Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren

Niclas Hein

Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren

Dissertation der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Philosophie

Vorgelegt von Niclas Hein

Tag der mündlichen Qualifikation 18.12.2015
1. Berichterstatter Prof. Dr. Christoph Krekel
2. Berichterstatter Prof. Volker Schaible
Direktorin Petra von Olschowski

Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart
Hochschulde des Landes Baden-Württemberg
Am Weißenhof 1
70191 Stuttgart

Inhalt

1. Einleitung ... 3

Kunsttransport, Monitoring, Schadensbewertung - eine konservierungswissenschaftliche Betrachtung — Teil 01

2. Kunsttransporte – ein Interessenkonflikt zwischen Bewahren und Vermitteln ... 11
2.1 Betrachtung der Akteure und ihrer unterschiedlichen Auffassungen ... 11
3. Kunsttransporte – eine gesteigerte Sensibilität und verbesserte Sensitivität ... 17
4. Kunsttransporte – die Optimierung von Transportabläufen ... 19
5. Kunsttransporte – eine Einschätzung ihres Ausmaßes über eine quantitative Sekundäranalyse ... 21
5.1 Eingrenzung der Datenbasis für die Analyse ... 22
5.1.1 Abgrenzung von Museen und Ausstellungshäusern ... 23
5.1.2 Spezifizierung der Museumsbesuche ... 24
5.1.3 Rückschlüsse auf den Leihverkehr ... 24
5.2 Ergebnisse der statistischen Auswertungen ... 25
5.2.1 Ausstellungen ... 25
5.2.2 Museen ... 29
5.2.3 Besuchzahlen ... 33
5.2.4 Korrelationsbetrachtung von Institutionen, Ausstellungen und Besuchzahlen ... 38
5.3 Abschlussbewertung zur Zunahme des Aufkommens von Kunsttransporten ... 40
6. Forschungslage über Klimaschwankungen und Objektveränderungen – eine Risikoeinschätzung ... 43
6.1 Richtwerte, Vorgaben oder Klimastandards zum Schutz der Objekte – eine Kontroverse ... 43
6.2 Stellungnahmen zur Kontroverse über das optimale Klima ... 49
7. Forschungslage zum Nachweis struktureller Oberflächen-veränderungen im Kontext von Transport und Klimaschwankungen ... 52
7.1 Nachweis struktureller Veränderungen an Gemälden durch Klimaschwankungen ... 53
7.2 Nachweis des mechanischen Schadenpotenzials bei Gemäldetransporten ... 66
7.3 Bildgebung über Gemäldestrukturen ... 69
7.4 Bildgebung über strukturelle Veränderungen an Gemälden durch Klimaschwankungen ... 71
7.5 Bildgebung über strukturelle Veränderungen an Gemälden durch Transport – ein erstes Transportschadensmonitoring ... 75
7.6 Streifenprojektion zum Monitoring struktureller Veränderungen ... 78
8. Abgrenzungsprobleme bei Veränderungen: Alterung versus Schaden ... 83
9. Schadensmerkmale – eine Systematisierung transportbedingter Schadensklassen ... 88
9.1 Schadenskatalog ... 91
10. Zwischenfazit Teil 1 ... 110

Technische Grundlagen des Streifenprojektionsverfahrens - eine Erprobung des ‘COMET-Systems‘ — Teil 02

11. Anforderungen an ein System zum Monitoring transportbedingter Objektveränderungen ... 117
12. Streifenprojektionsverfahren ... 120
12.1 Systemkomponenten ... 120
12.2 Messprinzip ... 121
13. Streifenprojektionsscanner ‘COMET 5 11M’ ... 124
13.1 Konfiguration des Streifenprojektions-scanners ‘COMET 5 11M’ ... 125
13.1.1 Objektive ... 127
13.1.2 Kalibrierung und ‘Verify-Test’ ... 128

13.2 Sensoreinstellungen und Messparameter – die Digitalisierung und Datennachverarbeitung 130
13.2.1 'Belichtungseinstellungen' 132
13.2.2 'Erweiterte Einstellungen' 134
13.3 Prozessablaufdiagramm zum Messablauf und zur Datennachverarbeitung in 'COMETplus' 136
13.4 Messablauf 138
13.4.1 Digitalisierung 138
13.4.2 Datennachverarbeitung (Punktewolke) 141
13.4.3 Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz) 143
13.5 Datenorganisation und Datenformate 150
13.6 Ergebnisprotokolle zur Auswertung der Messergebnisse 151
13.7 Kritische Bewertung der Sensor- und Auswertungssoftware, respektive der Bedienbarkeit 152
14. Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von 'COMET 5 11M' 154
14.1 Ausmaß der Messvolumina 154
14.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Messvolumina 154
14.2 Auflösungsvermögen 155
14.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Auflösungsvermögen 156
15. Detektion von Gemäldestrukturen 159
15.1 Detektion von Craquelé-Strukturen 160
15.2 Detektion von glänzenden Oberflächen 192
15.3 Detektion von dunklen Oberflächen 198
15.4 Kritische Bewertung zur Digitalisierung von Gemäldestrukturen 204
16. Methodische Ansätze zur Optimierung des Untersuchungs-verfahrens 205
17. Zwischenfazit Teil 2 214

Anwendung des Streifenprojektionsverfahrens zur Detektion von Veränderungen an Gemäldestrukturen TEIL 03

18. Experimente zum Monitoring von Veränderungen durch das Streifenprojektionsverfahren 217
19. Versuchsobjekte: Anforderung und Auswahlkriterien 220
19.1 Probekörper: Konzeption in Anlehnung an den Untersuchungsgegenstand Gemälde – eine maltechnische Definition 220
19.2 Realobjekte 227
19.3 Gemälde 235
20. Experimenteller Ablauf 237
20.1 Klimatische Gegebenheit / Konditionierung 237
20.1.1 Versuchsumgebung Klimabox 238
20.1.2 Versuchsumgebung Klimakammer 241
20.1.3 Versuchsumgebung Transport 242
20.2 Datenerhebung, Datennachverarbeitung und Dokumentation 242
20.3 Auswertungsstrategie der Experimente 243
20.3.1 Ausrichtung der Daten ('COMETplus') 243
20.3.2 Referenzierung der Daten ('INSPECTplus') 243
20.3.3 Auswertung der Daten über den Soll-Ist-Vergleich ('INSPECTplus') 246
20.3.4 Bildgebende Auswertung 246
20.3.5 Statistische Auswertung 250
20.4 Prozessablaufdiagramm zur Datenverarbeitung und -Aufbereitung in 'INSPECTplus' 251
20.5 Gliederung der Auswertung und Dokumentation 253
21. Experimente zur klimatischen Belastung: Probekörper Holz (VR1-VR6) 255
21.1 Ergebnisse der Konditionierung 255
21.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen 255
21.3 Ergebnisse der statistischen Auswertung 268
21.4 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR1-VR6) 284

22. Experimente zur klimatischen Belastung: Probekörper Textil (VR7-VR12) ... 287
22.1 Ergebnisse der Konditionierung ... 287
22.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen ... 290
22.3 Ergebnisse der statistischen Auswertung ... 312
22.4 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR7-VR12) ... 316
23. Experimente zur klimatischen Belastung: Realobjekt (VR13) ... 318
23.1 Ergebnisse der Konditionierung ... 318
23.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen ... 318
23.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR13) ... 352
24. Experimente zur klimatischen Belastung: Gemälde (VR14-VR15) ... 354
24.1 Ergebnisse der Konditionierung ... 354
24.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen ... 354
24.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR14-VR15) ... 369
25. Durchführung von Gemäldetransporten (VR16-VR17) ... 370
25.1 Gemäldetransport: Leinwandgemälde ('G_003', V_218) ... 370
25.2 Gemäldetransport: Leinwandgemälde ('G_003' verglast, V_219) ... 384
25.3 Gemäldetransport: Holztafelgemälde ('G_004', V_220) ... 392
25.4 Gemäldetransport: Holztafelgemälde ('G_004', V_221) ... 403
25.5 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR16-VR17) ... 412
26. Fazit ... 414
27. Ausblick ... 429
28. Zusammenfassung / Abstract ... 432

---

29. Anhang ... 435
29.1 Tabelle zur Auswertung der Daten des 'Institut für Museumsforschung' ... 435
29.2 Glossar zur Schadensterminologie: 'Associazione Giovanni Seccosuardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration' ... 436
29.3 Widersprüchlichkeit der Terminologie in der Restaurierung am Beispiel des Begriffes Craquelé ... 439
29.4 Broschüre zu den Sensorspezifikationen: 'COMET 5 3D-Digitalisierung, high-end Sensor' ... 446
29.5 Spezifikation des Leuchtmittels ... 450
29.6 Datenblätter Kameraobjektive (Firma 'Rodenstock') ... 451
29.7 Datenblätter Projektorobjektive (Firma 'Zeiss') ... 454
29.8 Bestimmung des Messvolumens von 'COMET 5 11M 80' ... 458
29.9 Bestimmung des Messvolumens von 'COMET 5 11M 1000' ... 463
29.10 Einordnung der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 1000' ... 463
29.11 Einordnung der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 80' ... 473
29.12 Evaluation und Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Sensorkonfiguration: 'Rauheitsnormal (ITO)' ... 483
29.13 Präzision der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 1000' ... 485
29.14 Präzision der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 80' ... 500
29.15 Praxiserprobung zur Auflösung von Strukturen am Original – 'COMET 5 11M 80' ... 511
29.16 E-Mail zur Sensoreinstellung und Konfiguration 'LoRes' / 'HiRes' ... 532
29.17 E-Mail zum Punktabstand ... 533
29.18 Überprüfung der Messgüte der verwendeten Datenloggern ... 535
30. Verzeichnisse ... 536
30.1 Verzeichnis der Abbildungen ... 536
30.2 Verzeichnis der Tabellen ... 539
30.3 Literaturverzeichnis ... 540
31. Eidesstattliche Erklärung ... 553
32. Danksagung ... 554

Anmerkungen zur vorliegenden Schrift

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen eines dankenswerterweise von der DFG geförderten Projektes: ‚Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte: Untersuchungen zu Detektion und Unterscheidung transport- und alterungsbedingter Schäden an Kunstwerken'.[5]

Sehr geehrte Damen, aufgrund der leichteren Lesbarkeit und einer besseren Verständlichkeit des vorliegenden Textes, wird sich in dieser Arbeit ausschließlich der männlichen Textform bedient. Im Hoffen auf Ihr Verständnis ist damit – gleichwohl stellvertretend – auch die weibliche Form gemeint.

Die Zitation der vorliegenden Arbeit ist an die Zitierrichtlinien der DIN-Norm 1505-2 angelegt,[6] bzw. ihrer Aktualisierung von 1995 – DIN 1505-3.[7] Angaben hierzu finden sich in der entsprechenden Normschriften selbst; weiter gibt LORENZ[8] hierzu einen Überblick. Die verwendeten Formelzeichen folgen der DIN-Norm 1304-1.[9]
Im fortlaufenden Text aufgeführte Autoren werden in Majuskeln geschrieben. Firmennamen und Produktbezeichnungen hingegen orientieren sich bezüglich ihres Layout an der Selbstdarstellung und dem Corporate Design des Herstellers bzw. dessen Produkte – sie werden als Wortzeichen verstanden und durch einfach Anführungszeichen kenntlich gemacht. In der Regel werden Unternehmen in ihrem vollen Namen, also auch ihrer Rechtsform ausgeschrieben. Eine Ausnahme wird bei der 'Steinbichler Optotechnik GmbH' gemacht. Aufgrund der häufigen Nennung des Unternehmens wird dieses zur leichteren Lesbarkeit des vorliegenden Textes unter dem verkürzten Namen 'Steinbichler' aufgeführt.
Im Literaturverzeichnis werden bei Internetquellen mit bekannten Autoren, diese angegeben. Im Falle einer unbekannten Autorenschaft, oft bei Unternehmen und Institutionen der Fall, wird der Firmen- Institutsname stellvertretend für den Autor aufgeführt. In Klammern ist diesem dann eine referenzierendes Stichwort hintenan stellt. Bedingt durch vorkommende Mehrfachnennung von Unternehmen und Institutionen reicht der Name und das Jahr des Seitenzugriffs zum sachgerechten Beleg der zitierten Stelle in der Fußnote allein nicht aus. Selbiges gilt für Dokumente mit unbekannten Autoren (bspw. Bedienerhandbücher, Broschüren, Datenblättern etc.).
Ein unbekannter Autor wird in der Fußnote mit 'ohne Verf.' und einem in Klammern hinter stellten Begriff zur Referenzierung in der Bibliografie, sowie das Jahr der Veröffentlichung aufgeführt.

5 DFG-Projektnummer: KR 3118/1-1). Vergleiche: Deutsche Forschungsgemeinschaft (Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte), 2013; Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (Projektwebsite), 2013

6 Ohne Verf. (DIN 1505-2), 2013

7 Ohne Verf. (DIN 1505-2), 2013

8 Lorenz, 2013

9 Ohne Verf. (DIN 1304-1), 2013

1. Einleitung

"Keines verbleibt in derselben Gestalt, und Veränderung liebend schafft die Natur stets neu aus anderen andere Formen, und in der Weite der Welt geht nichts - das glaubt mir - verloren; Wechsel und Tausch ist nur in der Form. Entstehen und Werden heißt nur anders als sonst angefangen zu sein, und Vergehen nicht mehr sein wie zuvor. Sei hierhin jenes versetzet, dieses vielleicht dorthin: Im Ganzen ist alles beständig. Unter dem selbigen Bild - so glaub' ich - beharrt auf die Dauer nichts in der Welt."[5]

Diese von Ovid in den 'Metamorphosen' angesprochene Wandlung gilt gleichermaßen auch für Kunstwerke. Zugleich ist das Verständnis über die Umformungsprozesse einerseits und das 'Aufhaltenwollen' andererseits grundlegende Absicht der Konservierungswissenschaft – die Agglomeration erfolgt hier letztlich in den Präventionsbemühungen. Dem Selbstverständnis nach zielen diese auf die Wahrung der Originalität und der Authentizität ab.[6] Um den genannten Maximen gerecht zu werden und die Objekte ihrem Wesen nach erhalten zu können, ist ein tiefgreifendes Verständnis soziologische kultur- und kunsthistorischer Aspekte notwendig – untermauert von profunden Kenntnissen über die künstlerische Intention, das Künstlermaterial und Einflussgrößen, die es verändern können.[7] An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Das leitende Forschungsinteresse wird dabei auf die Objektgruppe Gemälde eingegrenzt. Die thematische Reduktion betrifft die Aspekte Kunsttransport und den Nachweis etwaiger Objektveränderungen, die in dessen kausalem Zusammenhang stehen.[8] Hierzu soll ein geeignetes Monitoringverfahren auf Basis der Streifenprojektion evaluiert werden, welches sich bereits dem Prinzip nach in den eigenen Vorarbeiten an Skulpturen bewiesen hat.[9]
So soll untersucht werden, ob in einem bildanalytischen Ansatz sowie dem hochauflösenden, dreidimensionalen Soll-Ist-Vergleich, eine kritische Beurteilung kleinster struktureller Veränderungen von Gemäldeoberfläche erfolgen kann. Im Idealfall gelingt daraus wiederum der Rückschluss auf die Ursache für die Veränderung, sodass entsprechend induktive Empfehlungen zur allgemeinen Prävention abgeleitet werden können und somit ein nachhaltiger und verbesserter Kulturgutschutz gelingen kann.
Derzeit erfolgt die Transportschadensbewertung im musealen Bereich durch den subjektiven Vergleich von Zuständen – oftmals aus der Erinnerung heraus, unterstützt durch zweidimensionale Fotografien, Protokolle, aber auch in Form aufwendiger Dokumen-

5 Fink, 2000, Seite 88

6 Vergleiche: ICCOMOS (NARA Document on Authenticity), 2013, Seite 2; Janis, 2005, Seite 130

7 Vergleiche: Falser, 2011, Seite 2; Noll-Minor, 2011, Seite 17

8 Damit wird im Kern einem Gedankengang aufgegriffen und weitergeführt der bereits in gemeinsamen Vorarbeiten formuliert wurde. Vergleiche: Krekel & Hein, 2014, Seite 127 ff.

9 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 146 ff.

tationen. Im Zeitdruck des Ausstellungsaufbaus ist es jedoch auch erfahrenen Experten nicht immer möglich, einen neuen Schaden von einem alten zu unterscheiden bzw. die Ausweitung desselben angemessen und objektiv zu erfassen. Ferner bleiben mikrotopografische Materialveränderungen gemeinhin unentdeckt. Die Idee: 'Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren' skizziert sich daher als ein vielversprechender Lösungsansatz für eine Objektivierung dieses Problemfeldes.[10]
Beim Nachweis transportbedingter Veränderungen wird sich hierbei von jenen abgegrenzt, die ursächlich auf äußere mechanische Kraft-einwirkung zurückzuführen sind.[11] Auch wenn die Trennschärfe fraglos nicht immer gegeben ist, wird ihnen eine gewisse Offensichtlichkeit und damit eine sehr viel leichtere Nachweisführung unterstellt. Zur weiteren Betrachtung werden daher offenkundige Schadenereignisse bewusst ausgeklammert – hierzu existiert ein aktueller Forschungsstand.[12] Darüber hinaus veranlasst zur Abgrenzung einerseits die implizite Augenfälligkeit und andererseits die leichte Zuschreibung zu einem expliziten Ereignis, was die Attestierung des Schadensfalles erleichtert. Obgleich von den mechanischen Belastungen wie sie von einem Transport herrühren können – damit ist das Objekthandling jeglicher Art, die Verpackung und der Transport an sich gemeint – fraglos ein großes Schadenspotenzial ausgehen kann,[13] besteht das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit auf der Untersuchung derjenigen Belastungen, die durch sehr viel weniger augenfällige Ereignisse hervorgerufen werden können. Konkret: der Fokus ist auf materielle Mikroveränderungen gerichtet, die sich mit einem klimatisch-variablen Kunsttransportgeschehen in kausalen Zusammenhang stellen lassen.[14] Dem liegt die Hypothese zugrunde, dass mit dem Ortswechsel einhergehend auch eine klimatische Veränderung verbunden sein kann. So geht von einem Kunsttransport immer auch eine gesteigerte Belastung und ein größeres Schadensrisiko aus – so die Hypothese. Die Begründung dieser These ergibt sich dadurch,

10 ‚Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte: Untersuchungen zu Detektion und Unterscheidung transport- und alterungsbedingter Schäden an Kunstwerken' – gemeinschaftliches Forschungsprojekt des 'Institut für Technische Optik' ('ITO') der 'Universität Stuttgart', Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart (Antragssteller: Professor Dr. Wolfgang Osten; DFG-Projektnummer: OS 111/34-1) und der 'Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart' ('ABK'), Am Weißenhof 1, 70191 Stuttgart, (Antragssteller: Professor Dr. Christoph Krekel; DFG-Projektnummer: KR 3118/1-1). Vergleiche: Deutsche Forschungsgemeinschaft (Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte), 2013; Institut für Technische Optik (Projektwebsite), 2013; Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (Projektwebsite), 2013

11 Eine entsprechende Übersicht hierzu gibt COSTAIN. Der Autor orientiert sich dabei an MICHALSKI und gibt einen Überblick über mögliche Schadenursachen die beim Transport auftreten können. Zugleich benennt er Maßnahmen zur Prävention. Vergleiche: Costain, 1991, Seite 19 f.; Michalski, 1990a, Seite 589 ff.

12 Aus Gründen der thematische Abgrenzung werden jene Arbeiten, die sich der Erforschung mechanischer Einwirkungen wie Vibrationen und Stößen auf Gemälde befassen nicht näher ausgeführt. Diesbezüglich wird auf die Fachliteratur verwiesen. Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 1 ff.; Palmbach u. a., 2013, Seite 30 ff.; Ohne Verf. (KTI-Projekt Hochschule der Künste Bern), 2011; Kracht & Wagner, 2010, Seite 251 ff.; Caldicott, 1991, Seite 345 ff.; Marcon, 1991a, Seite 121 ff.; Marcon, 1991b, Seite 107 ff.; Michalski, 1990b, Seite 223 ff.

13 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 29

14 Vergleiche: Michalski, 1990b, Seite 241

dass Kunstwerke in der Regel größtenteils aus hygroskopischen Materialien bestehen. Sie befinden sich in stetiger Wechselwirkung mit der Umgebungsfeuchte und streben einen Gleichgewichtszustand an. Das Material quillt bei Adsorption und schwindet bei Desorption.[15] Für Temperaturschwankungen gilt die Akklimatisation in Form einer Volumenänderungen ex aequo. Da die verwendeten Werkstoffe nachgewiesener Weise unterschiedlich schnell und unterschiedlich stark auf Klimaschwankungen reagieren, können aus den Materialbewegungen Spannungen im Gefüge resultieren.[16] Diese Vorgänge sind vergleichsweise kompliziert, da sich das Objekt durch eine individuelle Vorgeschichte kennzeichnet, außerdem der maltechnische Aufbau sowie die verwendeten Künstlermaterialien oftmals sehr heterogen sind. Anzuführen ist hier die Schichtenfolge und Schichtstärke. So können bspw. hydrophobere Schichten die Wechselwirkung darunter liegender Schichten mit der Umgebungsfeuchte behindern – vice versa. Wird die Elastizitätsgrenze überschritten sind Schäden die Folge – ein Zusammenhang der in der Konservierungswissenschaft hinreichend bekannt ist.[17] Schadensmerkmale wie Risse, Verformungen, Schollen- und Schüsselbildungen, dachförmig aufstehende Malschichten und letztlich auch ein Malschichtverlust können auf Materialbewegungen zurückgeführt und unter dem Terminus ‘Klimaschaden’ zusammengefasst werden.[18] Weitaus weniger erforscht sind hingegen die zugrundeliegenden Vorgänge die letztlich zur phänotypischen Merkmalsausprägung der Veränderung führen. Hierbei besteht die erkenntnistheoretische Herausforderung darin, dass es sich bei solchen Veränderungen naturgemäß um kontinuierlich ablaufende und sehr subtile Prozesse handelt, die in ihrer Folgewirkung konstitutiv zu einer schleichenden Materialermüdung führen. Die Summierung mündet in Alterserscheinungen und, im fortgeschrittenem Stadium, letztlich im Schaden. Im Falle eines Gemäldetransportes ist ein solcher Gestaltwandel jedoch nicht sofort evident und abschätzbar. Bspw. können Beschädigungen durch klimatische Belastung zeitverzögert in Erscheinung treten, sodass der Zusammenhang zum Transportereignis nicht sofort erkennbar ist. Im Sinnzusammenhang der geschilderten Prozesskette wird daher zu klären sein, ob eine Abgrenzung von Alterung und Schaden gelingen kann. Zusätzlich wird im genannten Bedeutungszusammenhang von Kunsttransport und den angenommenen Folgewirkungen von Objektveränderungen pointiert die Frage nach einer gesteigerten Abnutzung unserer Kulturgüter gestellt. Aus moralphilosophischer Sicht wiederum müssen wir unsere Haltung demgegenüber hinterfragen – insbesondere, wenn wir Kulturgüter als sinnstiftend, bzw. Kunstwerke als einen Teil unseres kulturellen Gedächtnisses betrachten. Denn es handelt sich bei ihnen um

15 Vergleiche: Bratasz, 2013, Seite 11 f.; Kühn, 2001, Seite 318; Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 174; Sandner, 1990, Seite 192

16 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 316 und 318; Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 173 ff.

17 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 316; Erhardt & Mecklenburg, 1994, Seite 33 f.; Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 173 f.; Richard, 1990, Seite 279 ff.; Sandner, 1990, Seite 76 und 227; Schaible, 1990a, Seite 244 f.; Stolow, 1987, Seite 256

18 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 318

einmalige, unersetzbare materielle Zeugnisse, deren vielfältige Botschaften der Schlüssel zu unserem Verständnis der Geschichte ist. In gleicher Weise reichen damit deren Auswirkungen bis in die Gegenwart hinein und darüber hinaus. Aus ethischen Gründen müssen wir daher Bedingungen schaffen, Kulturgüter in ihrer expressiven Komplexität auch an die folgenden Generationen sicher weiterzugeben und Veränderungsprozesse möglichst zu verlangsamen.[19] Wie belegt werden wird, ergibt sich hier eine Infragestellung, durch eine signifikante quantitative Steigerung von Ausstellungen, was gleichzeitig auf eine Zunahme des Leihverkehrs rückschließen lässt. Grundsätzlich ist dieser Gesichtspunkt positiv zu werten, da wiederum vermutet wird, dass dementsprechend ein gesteigertes Interesse an Ausstellungen und dieser Form der Kultur- und Wissensvermittlung besteht. Zugleich wird hinterfragt, ob sich dieses in einer tatsächlichen Zunahme der Besucherzahlen ausdrückt oder ob es sich um eine bloße Aspiration handelt. Unter ethischen Gesichtspunkten werden entsprechende Erkenntnisse sicherlich die Akzeptanz oder Negation hypothetischer Abnutzungserscheinungen, bzw. beschleunigter Altersprozesse beeinflussen. Hier soll eine Diskussion evoziert und die bestehende Praxis kritisch überprüft werden. Damit beweist die vorliegende Arbeit Aktualität. Denn obgleich in den Museen zweifelsohne sehr umfangreiche Bemühungen unternommen werden, um den Fortbestand der Kunstwerke zu sichern und die Veränderungsprozesse möglichst hinaus zu zögern, sind ebenso antagonistische Tendenzen auszumachen. So wird gezeigt, dass diese in Form erheblich größerer Spannweiten für zulässige Klimaschwankungen in Erscheinung treten – wie sie bspw. aus der 'Bizot-Gruppe' heraus zugunsten einer Reduzierung des CO2-Ausstoßes proklamiert wurden.[20] Die Abkehr von den bisher bewährten Richtwerten hat zu umfangreichen Kontroversen und vergleichsweise emotional geführten Debatten beigetragen. Aus konservierungswissenschaftlicher Sicht wird ebenjenen Tendenzen mit dem Verweis auf mehr oder weniger aktuelle Fachliteratur in Teilen beigepflichtet, aber zugleich auch vehementer mit Ablehnung begegnet.[21] Insbesondere diese Uneinigkeit begünstigt aus Autorensicht argumentativ die als vorläufige Richtlinien titulierten Vorgaben der 'Bizot-Gruppe' – welche wiederum als Rechtfertigungsgrund einen Mangel an naturwissenschaftlichen Ergebnissen anbringen.[22] Zuge-

19 Seine Manifestation findet dieser Aspekt in der internationalen Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles – kurz: der sogenannten ‚Charta von Venedig' (25. - 31. Mai 1964, Venedig). In der Präambel dieses Grundsatzpapieres heißt es: „Als lebendige Zeugnisse jahrhundertelanger Traditionen der Völker vermitteln die Denkmäler der Gegenwart eine geistige Botschaft der Vergangenheit. Die Menschheit, die sich der universellen Geltung menschlicher Werte mehr und mehr bewusst wird, sieht in den Denkmälern ein gemeinsames Erbe und fühlt sich kommenden Generationen gegenüber für ihre Bewahrung gemeinsam verantwortlich. Sie hat die Verpflichtung, ihnen die Denkmäler im ganzen Reichtum ihrer Authentizität weiterzugeben." ICOMOS Deutschland, ICOMOS Luxemburg, ICOMOS Österreich, ICOMOS Schweiz u. a., 2012, Seite 47

20 Vergleiche: Graf u. a., 2012 , Seite 413; Schauerte & Graf, 2003, Seite 3. Hierbei handelt es sich um eine Vereinigung von Direktoren internationaler Museen und Ausstellungshäuser.

21 Vergleiche: Burmester & Eibl, 2013, Seite 1 ff.; Ohne Verf. (Bizot-Statement-Restauratoren), 2012

22 Vergleiche: Ohne Verf. (Verband der Restauratoren), 2014

gebenermaßen ist das letzte Argument triftig. Wie bereits MERRILL 1990 anmerkt sind unsere Erkenntnisse über die Auswirkung klimatischer Veränderungen auf das Materialgefüge von Gemälden immer noch lückenhaft.[23] Doch was hat sich seitdem getan? An dieser Stelle besteht tatsächlich immer noch ein eklatanter Forschungsbedarf der sich in der Notwendigkeit einer längst überfälligen, verlässlichen Faktenlage über das Veränderungspotenzial des Künstlermaterials als Folge von Klimaschwankungen konkretisiert.[24] An diesem Punkt ansetzend soll mit der vorliegenden Schrift, durch eine klare Positionierung auf Basis von Messdaten, ein substanzieller Beitrag geleistet werden – hin zu einer Objektivierung der Debatte. Abschließend lassen sich daraus zwei Fragestellungen der Arbeit zusammenfassen:
(1) ob dem Grundsatz nach aus einem Kunsttransport eine gesteigerte Abnutzung von Gemälden resultiert und
(2) inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren im genannten Kontext zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet.

Für eine solche Untersuchung gliedert sich die vorliegende Arbeit in drei Hauptteile:
Im ersten Teil wird das Thema Kunsttransport in der Konservierungswissenschaft verortet, indem zunächst im Kontext ethischer Maxime das Spannungsfeld des musealen Handelns zwischen Bewahren einerseits und Vermitteln andererseits skizziert wird (►Kapitel 2|). Ebenso wird untersucht, wie im genannten Kontext die aktuelle Wahrnehmung und Beurteilung von Objektveränderungen erfolgt(e). Dieses bezieht sich explizit sowohl auf die methodische Vorgehensweise, als auch auf die Strategie der Nachweisführung (►Kapitel 3|). Zur Einschätzung eines möglicher Weise vorhandenen Fortschrittes und gesteigerten Objektschutzes wird dabei auch die Umgangsweise mit den Objekten selbst betrachtet (►Kapitel 4|). Zudem wird eine Analyse des tatsächlichen Transportaufkommens vorgenommen (►Kapitel 5|). So wird, in diesem aufarbeitenden Teil der Frage (1) geklärt, inwiefern signifikant angestiegene Kunsttransporte vorliegen die infolgedessen zu *einer gesteigerten Abnutzung von Gemälden führen*. In einer Ableitung tatsächlicher Transportbelastungen besteht der Kernaspekt der vorliegenden Studie in der operationalisierten Untersuchung klimatisch induzierter Mikroveränderungen. Zu einer Risikoeinschätzung wird hierzu im weiteren Verlauf die aktuelle Forschungslage über Klimaschwankungen und Objektveränderungen zusammengefasst (►Kapitel 6|). Ebenso ist es Ziel des ersten Hauptteiles, einen fundierten Überblick über die aktuelle Forschungslage zum Nachweis struktureller Objektveränderungen im Kontext von Transport und Klimaschwankungen zu geben (►Kapitel 7|). Hier besteht besonderes Interesse an Methoden zur Bildgebung und dem Monitoring. Wie sich zeigen wird führt dieses zu einem Abgrenzungsproblem von Veränderungsprozessen und der Unterscheidung von Alters- und Schadensmerkmalen (►Kapitel 8|). Dabei wird hergeleitet, dass mit-

23 Vergleiche: Merrill, 1991, Seite 220

24 Vergleiche: Eibl & Burmester, 2013, Seite 218; Herdin, 2012, Seite 62

unter hierfür ursächlich eine unzureichende Schadensterminologie ist. Ein weiterer Schwerpunkt stellt daher ein synoptischer Schadenskatalog dar (►Kapitel 9|). Abgerundet wird der erste Teil von einer zusammenfassenden Betrachtung (►Kapitel 10|).
Der zweite Hauptteil umfasst vorrangig technischen Aspekte des für die spätere Laborstudie eingesetzten Streifenprojektionsscanners. Ausgangspunkt ist daher eine umfassende Darlegung der Anforderungen an ein Verfahren zum Transportschadensmonitoring von Gemälden (►Kapitel 11|). In Kongruenz zu diesen Leistungsanforderungen wird die theoretische Verfahrenseignung der Streifenprojektion Gegenstand der weiteren Untersuchung sein. Diese inkludiert eine Explikation der Funktionsweise des eingesetzten Messsystems 'COMET 5 11M' (►Kapitel 12|). Um später die Möglichkeiten wie auch die Grenzen des Scanners zur Digitalisierung von Gemäldeoberflächen abwägen zu können, werden des Weiteren software- und gerätetechnische Aspekte ausgeführt (►Kapitel 13|). Danach erfolgt eine Untersuchung der Leistungsfähigkeit des 'COMET-System' hinsichtlich technischer Gesichtspunkte (►Kapitel 14|). Dieses umfasst ebenso die explizite Verfahrenserprobung bei der Digitalisierung von Gemäldeoberflächen (►Kapitel 15|). Da hinsichtlich Frage (2), *nach der Eignung des Streifenprojektionsverfahrens zum Monitoring möglicher Transportfolgen*, nicht nur die Vorzüge und -Limitierungen festgehalten werden sollen, sondern auch seine Optimierungsmöglichkeit zu hinterfragen ist, sind im letzten Kapitel vielversprechende Lösungsansätze Gegenstand der Ausführung (►Kapitel 16|). Der Abschluss des zweiten, technischen Teiles erfolgt wiederum durch eine Zusammenfassende Betrachtung (►Kapitel 17|).
Der dritte Teil umfasst dann die einzelnen Experimente zur Erprobung der Streifenprojektion als Nachweisverfahren für klimatisch induzierte strukturelle Veränderungen von Gemäldeoberflächen. Als Einstieg erfolgt dafür die dezidierte Ausführung der leitenden wissenschaftlichen Fragestellung (►Kapitel 18|). Danach werden die einzelnen verwendeten Probekörper beschrieben und die Kriterien ihrer Auswahl expliziert (►Kapitel 19|). Für Transparenz hinsichtlich des experimentellen Ablaufes sorgt das Kapitel zwanzig (►Kapitel 20|); es skizziert sowohl die Versuchsumgebungen inklusive der jeweiligen klimatischen Konditionierungen, als auch die technische Seite, sprich die relevanten Aspekte der Datenerhebung, -verarbeitung und der Ergebnisdokumentation. Systematisch folgt dann die Rekapitulation der Laborexperimente zunächst bezogen auf die beiden Probekörpertypen: Holzbildträger (►Kapitel 21|); Probekörper auf textilem Bildträger (►Kapitel 22|) und danach bezogen auf die verwendeten Realobjekte (►Kapitel 23|) wie auf vollständige Gemälde (►Kapitel 24|). Abgeschlossen ist diese Versuchsreihe zur Eignungsprüfung des Streifenprojektionsverfahrens durch eine vollständige Simulation eines Gemäldetransportes in Realumgebung (►Kapitel 25|). Die Ergebnisse dieser Studie werden dann direkt im Fazit dieser Arbeit gebündelt, einander gegenübergestellt und mit den theoretischen und verfahrenstechnischen Ausführungen der ersten beiden Teile dieser

Arbeit in Zusammenhang gestellt (►Kapitel 26|). Konkrete Anhaltspunkte für weitere Forschungsbemühungen sind davon getrennt im Ausblick versammelt (►Kapitel 27|) – diese stellen neben dem Anhang den Abschluss der vorliegenden Schrift dar.

Anmerkung:
In Ergänzung zur verfahrenstechnischen Anwendung der Streifenprojektion, mit der ausschließlich strukturelle Veränderungen der Oberfläche untersucht werden können, erfolgt in einem zeitlich dazu parallel laufendem Projekt die analoge Erprobung und Verfahrensverbesserung der Shearografie.[10] Mit Einsatz dieses zweidimensionalen, zeitkritischen Messverfahrens können, in einer Erweiterung, solche Objektveränderungen detektiert werden, die sich bspw. unter der Objektoberfläche befinden. Dies umfasst strukturelle Imperfektionen wie Hohlstellen, Fraßgänge durch Insektenbefall oder auch Gefügeschwächen wie Risse, vormalige Restaurierungen etc.. Mit dieser verfahrenstechnischen Ausweitung sollen gegenseitige Vor- und Nachteile der beiden Messsysteme ausgeglichen werden; denn nur so kann, einem pluralen Lösungsansatz folgend, ein umfassendes Monitoring zu den komplexen Veränderungsmerkmalen an Gemälden gelingen. Ziel dieser Forschung ist es, sowohl deterministische als auch prognostische Erkenntnisse herleiten zu können. Im Kontext der musealen Anwendung ist bspw. die pragmatische Frage zur Gefügefestigkeit und Empfindlichkeit von hoher Relevanz, deren Beantwortung Anhaltspunkte für konkrete Präventionsstrategien und Ausleihfähigkeiten geben.
Ohne die großzügige finanzielle Förderung der ‘Deutsche Forschungsgemeinschaft’ würde ein solches einmaliges Kooperationsprojekt mit der Bezeichnung ‘3D_artscan’, aus dem Zusammenschluss von Ingenieuren, Physikern und Konservierungswissenschaftlern, nicht existieren. Auf erste Ergebnisse dieser Gemeinschaftsarbeit wird in der vorliegenden Studie jedoch ausschließlich in ►Kapitel 7.1| verwiesen.

Teil 01

Kunsttransport, Monitoring, Schadensbewertung
- eine konservierungswissenschaftliche Betrachtung

2. Kunsttransporte – ein Interessenkonflikt zwischen Bewahren und Vermitteln

„Selbst wenn 'nichts passiert', wenn der Kunsttransport unter größten Sicherheitsvorkehrungen reibungslos verläuft, […] kehrt kein Bild von einer Ausstellung in dem Zustand zurück, in dem es das Museum verließ."[25]

2.1 Betrachtung der Akteure und ihrer unterschiedlichen Auffassungen

Der Fokus Arbeit liegt auf der These, dass mit einem Ortswechsel eine klimatische Änderung einhergeht, die für das Kunstwerk nachteilig ist bzw. ein Schadensrisiko induziert. Gleichwohl sind Kunsttransporte ein zentraler Bestandteil des Ausstellungswesens. Kunst muss transportiert werden – sei es vom Depot in das Restaurierungsatelier, zum Fotografen, in den Ausstellungsraum oder in eine andere Institution – die Anlässe sind divers. Kunst erfährt seinen Sinn durch Rezeption. Museen sind hierbei, im Kontext ihres Bildungsauftrages, wichtige identitätsstiftende Institutionen, denn sie tragen zur Vermittlung unseres kulturellen Erbes bei. Zugleich haben sie sich auch dessen Erhalt verschrieben. Zwischen Vermittlung und Erhalt kann jedoch eine gewisse Unvereinbarkeit bestehen. Über den institutionellen Rahmen hinaus ist es die Hauptaufgabe von Restauratoren sich für den substanziellen Erhalt der Kunstwerke einzusetzen, um sie – wie in der Einleitung bereits angemerkt – als Original im vollen Reichtum ihrer Authentizität an die folgenden Generationen sicher weiterzugeben.[26] In der Konservierungswissenschaft wird daher oft das Gleichnis verwendet, dass Restauratoren die Rolle „[…] des »Anwalts« für die Bewahrung der Objekte übernehmen, wenn der politische Druck, die Dynamik des Ausstellungsmachens, die Routine des Museumsalltags oder andere Sachzwänge [… dieses erfordern]."[27] Legitimiert durch die prognostischen Annahmen nachteiliger Transportfolgen nehmen Restauratoren daher oft einem Kunsttransport gegenüber eine zurückhaltende oder gar ablehnende Haltung ein. KÜHN, der Verfasser eines konservierungswissenschaftlichen Standardwerkes, führt hierzu aus: „[…] insbesondere auch Transporte und wiederholte Verlagerung des Standortes, zum Beispiel für Wanderausstellungen [stellen eine Gefährdung für Kunstwerke dar]. Dem gealterten Materialgefüge

25 Mazzoni, 1994, Seite 114

26 Die entscheidende Quelle ist hier JOKILETHO, wobei JANIS deren Kern, aus Autorensicht, anschaulich zusammenfasst: „Im Mittelpunkt restauratorischer Bemühungen steht das Kulturgut selbst, an dem sich alle Überlegungen orientieren müssen. Es steht dem Restaurator nicht zur beliebigen Verfügung, sondern bildet in seinem unmittelbaren vorgefundenen Zustand den wichtigsten Bezugsmaßstab, dem sich alle konservatorischen und restauratorischen Erwägungen und Maßnahmen unterordnen müssen. […] Die Bewahrung des Originals und seiner Authentizität kann als das Leitprinzip der Restaurierungsethik angesehen werden und ist zugleich das allgemeine Ziel jeder Konservierung und Restaurierung." Janis, 2005, Seite 130 und vergleiche Seite 118 f.; vergleiche Jokiletho, 1995, Seite 32

27 Buczynski u. a., 2012, Seite 89; vergleiche: Janis, 2005, Seite 119 ff.; Bachmann, 1997, Seite 201

schaden Klimawechsel und mechanische Beanspruchung in starkem Maß, hinzu kommt die erhöhte Gefahr von Verletzungen bei falscher Handhabung oder unsachgemäßer Verpackung und Transport."[28] Weiter postuliert SANDNER: „Durch den »Ausstellungstourismus« sind Schäden an Kunstwerken enorm angestiegen. Unzureichende Transportbedingungen und kurzfristige Klimawechsel so wie mechanische Belastungen sind die Ursache."[29]
Seitens der Restauratoren hat eine abschlägige Entscheidung zu einer Leihanfrage mitunter für das Ausstellungswesen weitreichende Konsequenzen. So beeinflussen sie ob ein Werk ausgestellt und transportiert werden darf und/oder vielmehr zu welchen Bedingungen dies geschieht.[30] Dementsprechend nimmt ihre Beurteilung direkten Einfluss darauf, welche kunstwissenschaftlichen Thesen sich durch die in der Ausstellung gezeigten Objekte belegen lassen.[31] Ein resultierendes Konfliktpotenzial zur Interessenlage von Ausstellungsmachern ist evident.[32] Zugleich handelt es sich bei der geschilderten Position der Restauratoren nicht bloß um ein eigens auferlegtes, berufliches Selbstverständnis sondern vielmehr um eine Motivation, die ihre Rechtfertigung in den musealen Grundsätzen: Sammeln, Bewahren, Forschen und Dokumentieren, sowie Ausstellen und Vermitteln erfährt.[33] Der obigen Herleitung entsprechend ergibt sich daraus der dialektische Konflikt zwischen dem Bewahrungsauftrag von Museen einerseits und dem Vermittlungsauftrag andererseits. In Bezug auf den letztgenannten Aspekt wird in den internationalen Richtlinien für Museen postuliert: „Museen haben die wichtige Aufgabe, ihre bildungspolitische Funktion weiterzuentwickeln und ein immer breiteres Publikum aus der Gesellschaft, der örtlichen Gemeinschaft oder der Zielgruppe, für die sie eingerichtet sind, anzuziehen. Die Wechselbeziehung des Museums mit der Gesellschaft und die Förderung ihres Erbes sind unmittelbarer Bestandteil des Bildungsauftrages eines Museums."[34] Dem entgegengesetzt steht, nach eigener Definition des internationalen Museumsbundes, die zentrale Forderung, dass Museen jedoch „[…] in erster Linie die Verantwortung [haben] dieses [Kultur-] Erbe zu schützen und zu fördern.[35] So ist es „[d]ie wichtigste Aufgabe des Museums […], seine Sammlungen für

28 Kühn, 2001, Seite 9

29 Sandner, 1990, Seite 25

30 Geregelt wird dieses über einen Leihvertrag. Dort ist festgelegt auf welche Art und Weise die Verpackung und der Transport erfolgt, ob ein Kurier erforderlich ist und welche genauen Handlungsanweisungen zu befolgen sind. Zudem werden hier die klimatischen und lichttechnischen Vorgaben aufgeführt und etwaige Besonderheiten bei der Sicherung, der Verglasung und der Rahmung definiert. Vergleiche: Leisher, 1991, Seite 89 ff.

31 Vergleiche: Schürer, 2004, Seite 93

32 Anhand BACHMANNS Ausführungen wird das inkonsistente Verhältnis deutlich: „Besonders lästig muß [sic] es engagierten Ausstellungspromotoren sein, wenn Restauratoren immer wieder auf Gefahren hinweisen, in die Kunstwerke schon auf dem Transport geraten. Doch nach wie vor gilt: bereits jedes Hantieren mit den Exponaten, sowie der Einfluß [sic] unterschiedlicher Klimaverhältnisse verkürzt die Lebensdauer fast jeden Materialgefüges." Bachmann, 1997, Seite 201

33 Vergleiche: ICOM - Internationaler Museumsrat, 2010, Seite 12 ff.

34 ICOM - Internationaler Museumsrat, 2003, Seite 19

35 ICOM - Internationaler Museumsrat, 2010, 2010, Seite 9

die Zukunft zu bewahren und sie mit Hilfe von Forschung, Bildungsarbeit, Dauer- und Sonderausstellungen sowie Sonderveranstaltungen für die Entwicklung und Verbreitung von Wissen zu nutzen."[36] Ferner wird sich auch in den ethischen Richtlinien für Museen seitens des ICOM klar zur Rolle des Ausstellungswesens im Dissens zur Erhaltung positioniert, indem postuliert wird: „Dauer- und Sonderausstellungen [...] sollen mit dem erklärten Auftrag, den Richtlinien und den Zielen des Museums in Einklang stehen. Sie dürfen weder die Qualität noch die notwendige Pflege und Erhaltung der Sammlungen in Mitleidenschaft ziehen."[37] Die nationale Position des 'Deutscher Museumsbund' zur immanente Diskrepanz zwischen Ausstellen und Bewahren ist ebenso klar. So sind die Kernaufgaben der Museumsarbeit „[...] im Prinzip gleichrangig, doch wird man im Konfliktfall dem Bewahren Priorität einräumen [müssen], da es immer auf die längsten Fristen gerichtet ist und nur dieses den Museen ihre Objekte, also das Material für die Erfüllung der Aufgaben des Forschens, Ausstellens und Vermittelns, erhält."[38] So heißt es auch: „[d]as Bewahren ist die notwendige Voraussetzung für die anderen musealen Aufgaben: Nur was dauerhaft bewahrt wird, kann auch zukünftig gesammelt, erforscht und präsentiert werden."[39] Insbesondere mit dem Hinweis auf den Ursprung der eben zitierten Quellen, muss ihr Inhalt allein aus berufsethischen und moralischen Gesichtspunkten für alle Museumsmitarbeiter, unabhängig ihrer Position, als eine übergeordnete Maxime gelten. Dessen ungeachtet kann die alleinige Lösung für das ambivalente Verhältnis zwischen Bewahren, Ausstellen und Vermitteln nur in einem objektspezifischen, sachlichen und museumspolitischen Kompromiss gefunden werden, der ethisch vertretbar ist. Den Restauratoren und Konservierungswissenschaftlern muss hierbei eine besondere Verantwortung für das Objekt und in gleicherweise auch für die Gesellschaft auferlegt werden.[40] Sie sind diejenigen, welche über das maltechnische Fachwissen und damit als einzige Berufsgruppe über die Kompetenz verfügen, den Zustand und die Transport- und Ausstellungsfähigkeit fachkundig zu beurteilen. Auch mögliche Risiken und Objektveränderungen können durch sie am vorausschauendsten bewertet werden. Wobei anzumerken ist,

36 ICOM - Internationaler Museumsrat, 2003, Seite 7

37 ICOM - Internationaler Museumsrat, 2010, Seite 19 (Punkt 4.1). In der vorhergehenden Version der ethischen Richtlinien aus dem Jahr 2003 wird an entsprechender Stelle darüber hinaus dezidiert auf den Zusammenhang zum Bewahrungsauftrag verwiesen. Vergleiche: ICOM - Internationaler Museumsrat, 2003, Seite 7 (Punkt 2.9)

38 Deutscher Museumsbund (Ethik & Standards), 2014

39 Eggert, 2014, Seite 115

40 Dezidiert verweist JANIS auf diesen Zusammenhang. Die Autorin fordert Entscheidungskompetenzen für Restauratoren ein, damit diese die Möglichkeit haben sich wirksam für den Schutz der Kulturgüter einsetzen zu können. [Vergleiche: Janis, 2005, Seite 122] „Doch auch in nachgeordneter Position bedeutet Verantwortung zu übernehmen in jedem Fall, sich nicht kritiklos in ein bestehendes System ein[zu]passen und vermeintlich unabhängige »Sachzwänge« zu akzeptieren. Vielmehr sind Restauratoren gehalten, sich in ihrer Institution, in der Wissenschaft, in der Fachöffentlichkeit und darüber hinaus Verbündete zu suchen, um ihre Stellung und das Gewicht ihrer Expertise im Sinn der Durchsetzung anspruchsvoller restaurierungsethischer Standards aufzuwerten." Janis, 2005 , Seite 112, 118

dass diese Einschätzung nach verhältnismäßig subjektiven Kriterien erfolgt.[41]

Bei den Entscheidungen zur Transport- sowie Ausstellungsfähigkeit dürfen in jedem Falle wirtschaftliche Interessen Dritter keine Rolle spielen. Doch auch hier ist die Trennschärfe nicht immer gegeben. Kunst war und ist ein Wirtschaftsfaktor.[42] „Bis vor kurzem gingen alle Gemeinkosten bzw. internen Kosten generell zu Lasten des Leihgebers. Die Leihgeber-Institutionen sind inzwischen jedoch zunehmend dazu übergegangen, Gebühren zu erheben, um entweder ihre Kosten zu decken oder einen Gewinn zu erzielen."[43] Angeführt sei hier als prominentes Beispiel die sehr kontrovers diskutierten Kooperation des Pariser Louvre mit Abu Dhabi. Der Verhandlungsgegenstand bestand in der Gründung einer arabischen Dependance und dem Kapitalrückfluss nach Frankreich. Neben dem exklusiven Namen, der einer Wortmarke gleichkommt, sind ebenso exklusive Ausstellungsprojekte und Leihverträge ausgehandelt worden. Der Prestigegewinn der Emirate ist Kalkül. Die einstige Argumentation, dass die Finanzmittel den französischen Kulturgütern zugute kommen, wurde längst auf eine sehr viel gesellschaftlich-globalere und vor allem wirtschaftlich geprägte Ebene ausgeweitet. Gemäß eines Zeitungsartikels der 'New York Times' vom 7. März 2007 wurden, aufgrund der französischen Bereitwilligkeit zum kulturellen Austausch, vierzig – durchaus europäische – 'Airbus A308' von den Emiraten erworben.[44] Interessant ist, dass seitens der Leitung der Vereinigung Nationaler Museen Frankreichs, also die für die beteiligte Institution Verantwortlichen, an anderer Stelle hierzu indirekt eine kritische und verneinende Haltung einnehmen.[45] „Die Museen sollten Barzahlungen oder Sachleistungen für Leihgaben vermeiden, sie sollten davon abgehalten werden, Werke aus finanziellem Interesse zu verleihen oder zu häufig außer Haus zu geben. […] Und weiter:] Leihgaben als Gegenleistung, die keine künstlerische, wissenschaftliche Funktion haben, sind zu vermeiden ebenso wie das entsprechende Ausleihen von nicht transportfähiger Kunst. […] Museen sollten sich weder als Leihgeber noch als Leihnehmer irgendeiner Form externen politischen oder diplomatischen Drucks beugen."[46]

41 Vergleiche: Staniforth, 1991, Seite 335 ff.

42 In diesem Zusammenhang ist auf SCHAIBLE verwiesen, der in seinem Artikel ‚Die Bedeutung vom Bewahrungsauftrag und Inszenierungswunsch für die Arbeit des Restaurators' die Verbindung zwischen gesellschaftlich-wirtschaftlichen Interessen und der Institution Museum aufzeigt. Vergleiche: Schaible, 1997, Seite 187

43 Schauerte & Graf, 2003, Seite 12

44 Vergleiche: Riding, 2007

45 Vergleiche: Schauerte & Graf, 2003, Seite 14. Die hier zitierte Schrift entstammt dem Institut für Museumskunde und und entstand aus einer international besetzten Arbeitsgruppe. „Dahinter stehen gegenwärtig etwa 50 international bedeutende Museumsinstitutionen kunst- und kulturhistorischer Ausrichtung aus Europa und Nordamerika. Die Federführung hierbei hat Frau Irène Bizot [...Paris]." [Schauerte & Graf, 2003, Seite 3] Aus Deutschland haben das zugrundeliegende Papier unterschrieben: Staatliche Museen zu Berlin, Berlin; Staatliche Kunstsammlungen, Dresden; Städtische Kunsthalle, Düsseldorf; Hamburger Kunsthalle, Hamburg, Bayerische Staatsgemäldesammlung, München; Staatsgalerie, Stuttgart. Vergleiche: Schauerte & Graf, 2003, Seite 43

46 Schauerte & Graf, 2003, Seite 14 f.

Die Verbindung von Wirtschaft und Kulturpolitik wird als 'Public-Private Partnership' beschrieben und ist aus dem Mäzenatentum hervorgegangen. Es findet kaum noch eine Vernissage statt bei deren Eröffnungsrede nicht einem unterstützenden Unternehmen aus der Industrie oder der Finanzwirtschaft gedankt wird. Jedoch lassen sich die heutigen, üblicherweise sehr aufwendigen und oftmals sehr kostenintensiven Ausstellungen anders nicht mehr finanzieren. Selbiges gilt ebenso auch für den Ankauf von Kunst – dieses betrifft insbesondere die prestigeträchtigen Klassiker und moderne und zeitgenössische Kunst. Aufgrund deutlicher Preisanstiege auf dem Kunstmarkt sind solche Werke ohne Unterstützung aus der Privatwirtschaft seitens der öffentlichen Hand oftmals nicht mehr zu finanzieren.[47]
Auch auf kommunaler Ebene finden die genannten Verflechtungen ihre Entsprechung. Demnach kann eine Sonderausstellung für das Stadtmarketing und darüber hinaus ein wichtiger Faktor sein. So konstatiert THAMER: „Das Museum diente mehr und mehr als Ort sozialer Repräsentation und Distinktion, es befriedige zudem ein verändertes Freizeit- und Konsumverhalten. Spektakuläre Museumsgründungen und -bauten von prominenten Architekten gehören seither zur Imagepflege und Entwicklungsplanung einer Stadt wie zu den »weichen« Standortfaktoren im wirtschaftlichen Wettbewerb."[48]
Die ambivalente Entwicklung hin zum wachsenden Einfluss der Wirtschaft auf die (Kultur-)Politik und der daraus resultierende zunehmende Druck auf Museen, einem Eventanspruch zu genügen und dementsprechende Publikumszahlen zu generieren, äußert sich in einer angenommenen Zunahme an Sonderausstellungen – eine These die noch zu belegen sein wird. Im Kontext des Leihverkehrs sind fernerhin Konsequenzen der gegenseitigen nationalen und internationalen Verpflichtungen auszumachen, die die Museen eingegangen sind, um in großer Zahl spektakuläre und öffentlichkeitswirksame Sonderausstellungen hervorzubringen.[49] Dieses äußert sich in der Wortfügung des sogenannten 'Leih-Karussells'.[50] Neben dem gegenseitigen Austausch einzelner Werke hat dieses auch zur Weitergabe ganzer Ausstellungskonzepte inklusive der gezeigten Objekte im Rahmen sogenannter 'Wanderausstellung' geführt.
Inhärent betrifft das oben geschilderte Phänomen besonders die Inkunabeln der Kunstgeschichte und ihre prominentesten Künstlervertreter. Da zur Realisierung spektakulärer Sonderausstellungen prominente Objekte oftmals Gegenstand einer Leihanfrage sind, haben sich Sperrlisten etabliert, um diese wichtigen Meisterwerke zu schützen.[51]
Mittels festgelegter Zyklen können auf diese Weise die Belastungs- und Risikofaktoren, die äquivalent zur Häufigkeit des Transportes, bzw. zur Ausstellung sind, reduziert werden. Eine solche Statistik dient als wichtige Diskussionsgrundlage für künftige Leihanfragen.

47 Vergleiche: Thamer, 2012, Seite 36

48 Thamer, 2012, Seite 38 f.

49 Vergleiche: Staniforth, 1991, Seite 335 ff.; Hughes, 1991, Seite 85

50 Vergleiche: Schürer, 2004, Seite 92; Schauerte & Graf, 2003, Seite 12

51 Vergleiche: Staniforth, 1991, Seite 336

Aufgrund der obigen Herleitung zur trendfolgenden Bestrebung im Kunst- und Ausstellungswesen, einer angenommenen Steigerung von Kunsttransporten, kann hypothetisch eine dementsprechende beschleunigte Veränderung oder eine gesteigerte Abnutzung der Kunstwerke angenommen werden – sich begründend aus möglichen Transportbelastungen. Dieser in der Einleitung bereits formulierten These wird jedoch zu einem späteren Zeitpunkt nachgegangen. Im kultur-soziologischen Kontext stellt sich dessen ungeachtet die Frage nach unserer Haltung gegenüber der skizzierten Entwicklung. Gleichsam muss angenommen werden, dass Äußerungen, wie sie eingangs zitiert wurden, vergleichsweise subjektiv sind und der Tendenz nach allenfalls dem Bereich des Erfahrungswissens zuzuordnen sind. Auch solche wie: „Museums and art galleries are under increasing pressure to exhibit and loan works of art [...]“[52] sind aus Autorensicht eher tendenziös. Aus den genannten Gründen soll sich gemäß einer wissenschaftlichen Objektivierung der Diskussion um das Leihaufkommen und möglichen Abnutzungserscheinungen analytisch genähert werden. Einhergehend mit dieser muss gleichsam auch die Legitimität der restauratorischen Haltung, der Distanzierung einem Transport gegenüber, kritisch überprüft werden. Handelt es sich um ein internalisiertes ‘Bedenkenträgertum’? Worauf stützen sie ihr Urteil und die passive Haltung gegenüber dem Transport? Sind die Gründe empirisch bedingt, oder gibt es hierfür wissenschaftlich fundierte und objektive Anhaltspunkte?

52 Caldicott, 1991, Seite 345

3. Kunsttransporte – eine gesteigerte Sensibilität und verbesserte Sensitivität

Bei der Wahrnehmung und Beurteilung etwaiger Objektveränderungen sind verschiedene Gesichtspunkte relevant. Anzuführen ist die zeitliche Diskrepanz zwischen den Zuständen, die Sensitivität aber auch die Qualität der Untersuchungs- und Nachweismethoden. Bspw. ist die Nachweisführung einer eingetreten Farbveränderung, allein aus der Erinnerung heraus schwer möglich. Demgegenüber ist bei gegebener Offensichtlichkeit die Identifizierung eines strukturellen Schadenfalls mit dem Auge denkbar. Dient lediglich die Imagination des unbeschädigten Objektes als Vergleichsmoment, so ist ein entsprechendes Urteil in diesem Fall nur subjektiv und die Beweisführung unzureichend. Die Ablösung vom Tendenziösen gelingt erst mit dem Einsatz methodisch-technischer Verfahren, die eine zuverlässige, detaillierte, qualitative und bestenfalls auch quantitative Beurteilung von Veränderungen im Grundsätzlichen ermöglicht. Die zweifelsfreie Reproduzierbarkeit eines entsprechenden Urteils wird daher als Vorraussetzung für ein erfolgreiches Schadenmonitoring angesehen. Kommen hierbei bildgebende Untersuchungsverfahren zum Einsatz, so ist bei der Beweisführung von Objektveränderungen die Auflösung von entscheidender Bedeutung. Diese impliziert jedoch nicht zwangsläufig, dass sich das Verfahren zur Nachweisführung umso besser eignet je hochauflösender es ist. Zweifelsohne lassen sich mit einem sehr präzisen Verfahren die Veränderungsmerkmale im Detail besser untersuchen, wobei damit gleichzeitig auch eine Einschränkung globaler Gesichtspunkte verbunden ist.
Die Attestierung prinzipieller Veränderungsmerkmale an Gemälden steht in unmittelbarer Abhängigkeit zum methodischen Nachweis. So hat sich analog zur gesteigerten Sensibilität gegenüber der Schadensthematik und deren Prävention auch die Nachweismethodik grundlegend verbessert.[53] Damit ist der veränderte Stellenwert einer Dokumentation, aber auch der technische Fortschritt beim Schadensmonitoring selbst gemeint.[54] Insbesondere die Etablierung der Digitalfotografie und der digitalen Bildbearbeitung als Grundlage komplexer und aussagekräftiger Zustandsprotokolle ist an dieser Stelle hervorzuheben. Neben dem Wissen über Materialveränderungen und Altersprozesse ermöglicht uns heute die hochauflösende Sensortechnik der Digitalfotografie, aber auch die anderer Untersuchungsmethoden, einen weitaus detaillierteren Blick auf Objektveränderungen als früher: vom makroskopischen Bereich hin zum tendenziell mikroskopischen. Gemeinhin ist daher auch eine höhere Sensitivität bei der Beurteilung von Veränderungen zu erwarten. Sicherlich hat dieser Prozess auch zu einer gewandelten, tendenziell kritischeren Haltung und geringeren Akzeptanz von Objektveränderungen geführt – was wiederum in Bestrebungen zur Alters- und Schadensprävention zum Ausdruck kommt. Bis zur möglichen Falsifikation wird daher angenommen,

53 Vergleiche: Stolow, 1987, Seite 207 f.

54 Vergleiche: Schießl, 1991, Seite 9 ff.

dass sich die Bemühungen zur Reduzierung der Belastungs- und Schadensfaktoren in der letzten Zeit in jedem Fall qualitativ äußern und, in ihrer Konsequenz, zu einer verlangsamten Objektalterung beigetragen haben. Die Ausnahmen bestehen in Schadensereignissen, die sich aus Vandalismus oder Katastrophen begründen (►Kapitel 4|).

4. Kunsttransporte – die Optimierung von Transportabläufen

Grundsätzlich ist eine gesteigerte Sensibilität zum Veränderungspotenzial von Gemälden festzustellen. Diese lässt sich nicht nur über die Zunahme entsprechender Fachliteratur belegen,[55] sondern auch durch das Erfahrungswissen aus der restauratorischen Praxis. So hat sich die Achtsamkeit im Umgang mit den Werken selbst gewandelt. Der Fortschritt findet seinen Ausdruck in einem gesteigerten Aufwand bei der Lagerung, der Präsentation, der Verpackung[56] und dem Transport (►Abb. 1| und Abb. 2|). Ein weiteres Indiz für die zuletzt proklamierte These ergibt sich aus der belegbaren Verwissenschaftlichung der Restaurierung.[57] Diese entwickelte sich in den letzten vierzig Jahren von einem reinen Handwerksberuf hin zu einer akademischen Ausbildung. Der Restaurator ist heute ein mit naturwissenschaftlichen Kenntnissen ausgestattetem Konservierungswissenschaftler.[58] In diesem Zusammenhang ist auch der konstitutive Bedeutungswandel vom umfangreichen Restaurieren hin zur Prävention, einem sensiblen Konservieren, herauszustellen.[59] Die Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet und die Veröffentlichung wichtiger Erkenntnisse über Ursachen, Veränderungsfaktoren, Alters- und



Abb. 1| Illustrierendes Beispiel zum Wandel des Kunsttransportes: Wiedergabe eines historischen Schwarzweißfotos des Fotografen FELBERMEYER, kurz nach Kriegsende bei einem 'Central Art Collecting Point' in München aufgenommen. Erstaunlicherweise ist der Zierrahmen des Gemäldes vergleichsweise gut geschützt, wohingegen dieses auf die Malschicht nicht zutrifft.
Quelle: Felbermeyer, 1945

55 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 1ff.; Palmbach u. a., 2013, Seite 30 ff.; Burmester & Müller, 1992, Seite 335 ff.; Mecklenburg, 1991, Seite 9 ff.

56 Das Thema Verpackungsmethoden und -materialien ist vergleichsweise komplex. Hierzu besteht eine Fülle an Fachbeiträgen, sodass sich hierorts abgegrenzt wird. Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 1 ff.; Palmbach u. a., 2013, Seite 30 ff.; Erhardt, 1991, Seite 25 ff.; Green, 1991a, Seite 37 ff.; Green, 1991b, Seite 49 ff.; Hackney & Green, 1991, Seite 69 ff.; Marcon, 1991b, Seite 107 ff.; Marcon, 1991c , Seite 93 ff.; Richard, 1990, Seite 283 ff.

57 Vergleiche: Buczynski u. a., 2012, Seite 89

58 Einen Überblick über die Entwicklung des Restauratorenberuf gibt: Buczynski u. a., 2012 Seite 92 f.

59 Ein wichtigen Beitrag zu diesem Thema verfasste SCHAIBLE in dem der Autor auf zentrale Aspekte der Restaurierungsgeschichte eingeht. Konkret führt er aus: „Die Konservierung wäre eindeutig dem Begriff Erhaltung zuzuordnen, da eine konservierungstechnische Maßnahme gemäß heutiger Definition lediglich das Ziel verfolgt, den materiellen und strukturellen Bestand eines Kunstobjektes zu bewahren ohne gleichzeitig dessen Erscheinungsbild zu verändern. So schwer dieses Postulat in der Praxis auch durchführbar sein mag, wird hier der reine Bewahrungsauftrag überdeutlich." Schaible, 1997, Seite 190; Schaible, 1990b, Seite 118 ff.

Schadenphänomene haben zu einer Optimierung der Lager-, Ausstellungs- und Transportbedingungen von Kunst im Generellen geführt.[60] Hierbei spielt auch die kunsttechnologische Grundlagenforschung eine entscheidende Rolle. Erst sie ermöglicht das Ermessen von Wechselwirkungen zwischen Künstlermaterialien und Umgebungsbedingungen. Neben der Entwicklung neuer Restaurierungs- und Konservierungstechniken sind aus diesen Bemühungen heraus auch innovative Werkstoffe und Prozessabläufe zum Schutz der Kunst entstanden. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf neue inerte Verpackungsmaterialien, Klimaschwankung abpuffernde, maßgeschneiderte und hochkomplexe Transportkisten verwiesen. Darüber hinaus haben sich auch die Transportabläufe und Verfahren an sich verbessert.[61]



Abb. 2| Foto eines klimatisierten Laderaums eines Transporters mit individuell an die Objekte angepasste Klimakisten.
Quelle: Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2014a

60 Vergleiche: Merrill, 1991 ‚Seite 219 f.

61 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 2 ff.; Hiscox, 1991, Seite 81

5. Kunsttransporte – eine Einschätzung ihres Ausmaßes über eine quantitative Sekundäranalyse

Eine gewichtiger Teilaspekt zur Thesenführung der vorliegenden Arbeit beruht auf der Annahme eines signifikant angewachsenen Leihverkehrs und dessen negative Folgen für den Erhalt von Kulturgütern, wie dieses oft in konservierungswissenschaftlichen Kreisen kundgetan wird. Über das Hörensagen hinaus finden sich außerdem auch Belege in der Fachliteratur. So postuliert SANDNER: „Durch den »Ausstellungstourismus« sind Schäden an Kunstwerken enorm angestiegen. Unzureichende Transportbedingungen und kurzfristige Klimawechsel so wie mechanische Belastungen sind die Ursache."[62] Daneben erfolgt die Manifestation auch über aktuelle Aussagen: „Weltweit nimmt die Anzahl der Kunsttransporte kontinuierlich zu."[63] Aus Autorensicht wird die Diskussion hierzu jedoch oft vergleichsweise unsachlich geführt. Der Tatsachenbestand über quantitative Aspekte des Leihaufkommens, die Effizienz von Museen in Bezug auf Sonderausstellungen und deren Folgewirkung soll daher näher untersucht werden. Dementsprechend muss kritisch hinterfragt werden, ob es die immens angestiegene Zahl an Sonderausstellungen wirklich gibt. Nach THAMER kann im Laufe der siebziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts tatsächlich ein gesteigertes Interesse an Museumsausstellungen konstatiert werden, welches im Verlauf zunehmend, insbesondere durch das Aufkommen der ersten Großausstellungen begünstigt wurde.[64] In Hinblick auf aktuelle statistische Erkenntnisse zum Thema Sonderausstellungen skizziert der Autor, nach quantitativen Kriterien beurteilt, ein erstaunliches Bild über die Effizienz von Museen einerseits und dem oft proklamierten Zuwachs an Sonderausstellungen andererseits. So stellt der Autor den Zusammenhang zwischen den Besucherzahlen und dem 'Museumsboom' der letzten vierzig Jahre her und verweist auf ein verzerrtes Bild über die Effizienz dieses Kulturapparates und seiner Ausbringung. „Ungeachtet unterschiedlicher Verfahren der statistischen Erhebung weisen alle Untersuchungen darauf hin, dass die Zunahme der Museumsbesucher insgesamt relativ bescheiden ausfällt, während die Zahl der Museumsgründungen und -erweiterungen sehr viel spektakulärer ist."[65] Hierbei bezieht er sich auf die Angaben von GRAF, welcher konstatiert: „Es gab und gibt einen ungebrochenen Museums- und Ausstellungsboom, aber die Anzahl der Museumsinteressierten und die Besucherhäufigkeit ist nach absoluten Zahlen gemessen nicht gewachsen."[66] Weiter führt THAMER aus: „Nicht nur der Zuwachs

62 Sandner, 1990, Seite 25

63 Palmbach u. a., 2013, Seite 30

64 Vergleiche: Thamer, 2012, Seite 33 f.

65 Thamer, 2012, Seite 35. Das geschilderte Novum ergibt sich offenbar aus einer Neuberechnung, bzw. aus der Erkenntnis über vorangegangene Fehler bei der statistischen Berechnung der Besucherzahlen. „1992 besuchten 100 Millionen Menschen deutsche Museen und Ausstellungen. Doch wurden lange Zeit die Besucher kleinerer Museen kaum oder gar nicht erhoben, was bei deren späteren statistischen Berücksichtigung zu beträchtlichen, aber unrealistischen Steigerungsraten führte." Thamer, 2012, Seite 35

66 Graf, 2000, Seite 23

an Museen hat also zu einer Verzerrung der Wahrnehmung geführt, sondern auch eine verzerrte Wahrnehmung in Folge einer Verlagerung des Publikumsinteresses und der öffentlichkeits- und medienwirksamen Präsenz der großen Sonderausstellungen hervorgerufen, die mit ihren Warteschlangen vor den Kassen den Eindruck dramatischer Steigerungen der Besucherzahlen erweckten, während die Dauerausstellungen zunehmend weniger Besucher anzogen."[67] Nicht zuletzt diese vorgebrachten Erkenntnisse sollten die Debatte über den Sinn und die Effizienz von Sonderausstellungen und den musealen Vermittlungsauftrag en détail neu entfachen. Zudem gilt es in diesem Kontext die Rolle der Restauratoren und ihre vorgebrachten Argumente neu zu gewichten.

Da die eben geschilderte Faktenlage das gattungsübergreifende Ausstellungswesen im Allgemeinen tangiert, die Fragestellung der vorliegenden Arbeit jedoch auf den Untersuchungsgegenstand Gemälde eingegrenzt wurde, soll eine eigene statistische Auswertung der Daten vorgenommen werden, um damit Vorraussetzungen für trennscharfe und präzise Ergebnisse zu erzielen, die wiederum ein kritisches Meinungsbild zulassen. Für eine dezidierte Einschätzung des Leihverkehrs sind Zahlen zum Aufkommen, sprich quantitative Erhebungen zu den transportierten Objekten, notwendig. Eine entsprechende Datenquelle hierzu ist nicht bekannt. Anhaltspunkte für eine Bewertung auf quantitativer Ebene liefert alleinig das 'Institut für Museumsforschung'. Dieses ist bundesweit das Institut für Forschung und Dokumentation, welches sich den sammlungsübergreifenden Gesichtspunkten des Museumswesens widmet. So werden dort, über die gemeldeten Zahlen der Museen, die Entwicklung der Institutionen, Ausstellungen, Besuchzahlen sowie weitere Aspekte dokumentiert und untersucht. Im Folgenden wird auf Basis dieser Zahlen versucht, mittels einer statistischen Analyse ein Beitrag zur Objektivierung der Diskussion in der Fachöffentlichkeit zu bewirken.

5.1 Eingrenzung der Datenbasis für die Analyse

Für die Auswertung wird auf die statistische Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung' zurück gegriffen. Der Auswertung werden drei Aspekte zu Grunde gelegt: Ausstellungen, Institutionen (Museen und Ausstellungshäuser) und Besuchzahlen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Zahlen beziehen sich die ausgewerteten Daten nur auf die Jahre ab der Wiedervereinigung der alten und der neuen Bundesländer zur heutigen Bundesrepublik im Jahr 1990. Damit kann eine statistische Entwicklung über dreiundzwanzig Jahre belegt werden.

Für die statistische Auswertung wurden zunächst die für diese Arbeit relevanten Zahlen des 'Institut für Museumsforschung' exzerpiert und in einer umfassenden Tabelle zusammengetragen. Diese dient als Ausgangstabelle und befindet sich im Anhang der vorliegenden Schrift (►Kapitel 29.1|). Dort findet sich auch der Literaturverweis auf

67 Thamer, 2012, Seite 35. Vergleiche: Baur, 2012, Seite 151 f.

den entsprechenden Jahrgang des 'Institut für Museumsforschung' samt Seitenzahl. Aus praktischen Gründen wird bei der Thesenführung auf ausgekoppelte Auszüge dieser Tabelle verwiesen.[68]

5.1.1 Abgrenzung von Museen und Ausstellungshäusern

Vorab sind die Abgrenzungsinformationen der Datenquelle zu berücksichtigen. In den Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung' wird zwischen Museen, bzw. Museumskomplexen und Museumseinrichtungen einerseits sowie Ausstellungshäusern andererseits unterschieden. Ausstellungshäuser sind nicht-kommerziell, haben keine eigene Sammlung organisieren aber befristete Ausstellungen und Projekte zu ausgewählten Themen oder zum Werk einzelner Künstler. Sie haben einen musealen Charakter und sind hinsichtlich genannter Fragestellungen durch das ihnen immanente Prinzip wechselnder Ausstellungen und obligater Transporte von besonderer Relevanz.[69]
Weiter werden die Museen durch das 'Institut für Museumsforschung' gemäß ihrer Sammelgebiete in Gruppen zusammengefasst. Diese Gruppierung der Museen ist an die Klassifikation der UNESCO angelehnt. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist im Museumsbereich die Gruppe der Kunstmuseen von übergeordnetem Interesse, da davon ausgegangen werden kann, dass hier Gemäldetransporte stattfinden. Nach dem 'Institut für Museumsforschung' zählen zu Kunstmuseen folgende Sammelgebiete: Kunst und Architektur, Kunsthandwerk, Keramik, Kirchenschätze und kirchliche Kunst, Film und Fotografie.[70] Die anderen Museumsarten wurden für die hiesige Auswertung zusammengefasst und abgegrenzt.[71]
Weiter wird davon ausgegangen, dass Sonderausstellungen (zumindest in Teilen) Kunsttransporte vorangegangen sind. Demgemäß werden diese als Indikator zur Bewertung des Leihverkehrs herangezogen und den Zahlen der Dauerausstellungen gegenüber gestellt. Hierbei wird zwischen Sonderausstellungen im Allgemeinen und jenen im Kontext Kunst differenziert. Die erstgenannte Gruppe wird in den Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung' mit 'Sonderausstellungen in Museen' bezeichnet. Wohingegen sich die letztgenannte Gruppe in folgende Kategorien gliedert: 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst', 'Sonderausstellungen in Kunstmuseen' sowie

68 Weiterhin finden sich in den Tabellen Datenbereiche die nicht den Erhebungen des ‚Institut für Museumsforschung' entnommen sind, sondern kalkulatorischem Ursprungs sind. So wurden bspw. ‚Sonstige Museen mit Sonderausstellungen' über die Gesamtzahlen der ‚Museen' exklusive der ‚Kunstmuseen' kalkulatorisch ermittelt. Im Spaltenname ist dieses entsprechend angegeben.

69 „Hierbei handelt es sich häufig um Kunsthallen, wie z.B. die Kunsthalle Tübingen, die Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung in München, die Cubus-Kunsthalle in Duisburg und den Martin-Gropius-Bau in Berlin [die Schirn in Frankfurt, die Deichtorhallen in Hamburg], aber auch um Städtische Galerien, Präsentationsräume von Künstlervereinigungen etc." Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 8

70 Vergleiche exemplarisch: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 20

71 Die übrigen Museums- und Ausstellungshausarten werden gemäß ihrer Sammelgebiete in folgenden Gruppen untergliedert: Volks- und Heimatkunde, Naturkunde, Naturwissenschaft und Technik, Kulturgeschichte, Historie und Archäologie, Sammlungsübergreifend (Gebäudekomplex), sowie eine Rubrik ohne Angaben. Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 20

'Ausstellungen in Ausstellungshäusern mit Schwerpunkt Kunst'. Bei den Ausstellungshäusern entspricht der Anteil der 'Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' deutlich dem überwiegenden Teil, sodass die übrigen hier vernachlässigt werden, da „[es…] nur wenige Ausstellungshäuser [gab], die keine Kunstausstellungen präsentierten."[72]

5.1.2 Spezifizierung der Museumsbesuche

Generell wurden zur Erhebung der Museumsbesuche durch das 'Institut für Museumsforschung' nur die von den Museen auch tatsächlich gemeldeten Daten verwendet. Aufgrund der verschiedenen Erhebungsmethoden, welche museumsspezifisch sind – bspw. durch manuelle Zählung, durch den Eintrittskartenverkauf über die Registrierkasse, anhand des Besucherbuchs und/oder durch eine statistische Hochrechnung – können die tatsächlichen Besucherzahlen abweichen.[73] Fernerhin kann nicht unterschieden werden, ob es sich um Erstbesucher oder um wiederkehrende Museumsbesucher handelt. Demgemäß wird sich der Semantik des 'Institut für Museumsforschung' angeschlossen, welche aus diesem Grund Museumsbesuche und nicht die Anzahl der Museumsbesucher benennt.[74] Weiter ist der Hinweis entscheidend, dass die erhobenen Zahlen der Museumsbesuche nicht zwangsläufig repräsentativ für die Gesamtheit derselben sind, da nicht alle Museen und Ausstellungshäuser Besuchzahlen an das 'Institut für Museumsforschung' übermittelten. Die Annahme, dass im exemplarisch gewähltem Jahr 2012 die Gesamtheit der 6.355 Museen 112.807.633 Museumsbesuche zu verzeichnen haben ist falsch, da lediglich 4.848 Museen Besuchzahlen gemeldet haben (Rücklaufquote Fragebogen 82,4% (►Kapitel 29.1|). Die Besuchzahlen sind daher naturgemäß vergleichsweise pessimistisch. Gleichermaßen gilt dieses auch für die Daten der Ausstellungshäuser.[75]

Die Besuchzahlen in Museen sind nach Museumsart klassifiziert, wobei Kunstmuseen und übrige Einrichtungen separat ausgewiesen wurden. Eine Ausweisung der Besuchzahlen, die anteilig auf Dauer- und Sonderausstellungen entfallen, ist nicht möglich, da die Zahlen vom 'Institut für Museumsforschung' nicht getrennt voneinander erhoben wurden.[76] Für die Thesenführung der vorliegenden Arbeit ist dies ein eklatanter Nachteil. Somit sind Rückschlüsse über die Effizienz von Sonderausstellungen gegenüber Dauerausstellungen nicht möglich.

5.1.3 Rückschlüsse auf den Leihverkehr

Wie bereits erwähnt können evidente Aussagen zu der Entwicklung des Leihverkehrs nur anhand von Erhebungen zu den tatsächlich

72 Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 75. Das Zitat ist hier exemplarisch gewählt und ebenso für die übrigen Jahre gültig.

73 Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 83

74 Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 7

75 Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 7

76 Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 61

durchgeführten Kunsttransporten getroffen werden. Da hierzu dem Autor keine Daten bekannt sind, können Rückschlüsse nur indirekt auf der Basis von Sonderausstellungen getroffen werden. Im Übrigen ist, gemäß der vorliegenden Daten, eine Kategorisierung der Sonderausstellungen nach dem Objekttyp Gemälde nicht möglich, jedoch lässt die übergeordnete Kategorie 'Kunst' dementsprechende Folgerungen zu. Ein Ansatzpunkt ist die Anzahl der 'Sonderausstellungen in Kunstmuseen'. Jedoch kann nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass alle dort gezeigten Sonderausstellungen sich auf den 'Schwerpunkt Kunst' eingrenzen lassen.[77] Daher wird in der folgenden Bewertung des Leihverkehrs von Gemälden auf die Zahlen der 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' Bezug genommen, also jene, die unabhängig des institutionellen Rahmens erhoben worden sind. Ebenfalls berücksichtigt werden 'Ausstellungen in Ausstellungshäusern mit Schwerpunkt Kunst', da, wie bereits erwähnt, davon ausgegangen werden kann, dass es sich bei den dort gezeigten Ausstellungen grundsätzlich um Sonderausstellungen handelt. Für eine Gesamtbetrachtung der genannten Gruppen werden diese zu 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert'.

5.2 Ergebnisse der statistischen Auswertungen

Im Folgenden nun die statistische Auswertung der Museumszahlen und die Betrachtung der Entwicklung von Ausstellungen, Institutionen (Museen und Ausstellungshäuser) und Besuchzahlen.

5.2.1 Ausstellungen

Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst

In der Tat belegt die Statistik, wie oft propagiert, im ausgewerteten Zeitraum eine signifikante Zunahme von 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' in der Gesamtheit der Museumsarten. Im Jahr 1990 sind es 2.590 und im Jahr 2012 3.518 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' (►Tab. 1|). Dieses entspricht einer Steigerung um absolut 928 Ausstellungen, bzw. einer Zunahme um 35%. Wobei der Spitzenwert im Jahr 2002 mit 3.741 Ausstellungen zu verzeichnen ist. Danach folgt eine Phase der Regression, sodass im Jahr 2004 lediglich 3.119 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' gezählt wurden. Eine positive Entwicklung ist erst wieder ab dem Jahr 2009 zu belegen. Aufgrund der aufgezeigten Schwankungen sind Aussagen zur tendenziellen Zunahmen schwierig. Erst eine Berechnung der durchschnittlichen Wachstumsrate über die Jahre hinweg verdeutlicht, dass eine Steigerung von 1,014 (1,4%) zu verzeichnen ist.

77 Belegen lässt sich dieser Sachverhalt am exemplarisch gewählten Jahr 2012. In diesem Jahr entfallen im Gesamten 3.518 Sonderausstellungen auf den Schwerpunkt Kunst, wohingegen 1.792 Sonderausstellungen in Kunstmuseen stattgefunden haben und 1.422 dem Schwerpunkt Kunst zuzuordnen sind. Somit weisen nicht alle im Kunstmuseum gezeigten Sonderausstellungen einen Kunstbezug auf (ca. 20%). Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 64

Jahr	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst	Wachstumsrate Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst	Sonderausstellungen in Kunstmuseen	Wachstumsrate Sonderausstellungen in Kunstmuseen	Ausstellungen in Ausstellungshäusern mit Schwerpunkt Kunst	Wachstumsrate Ausstellungen in Ausstellungshäusern mit Schwerpunkt Kunst	Kunst-Sonder-ausstellungen kumuliert	Wachstumsrate Kunst-Sonderausstellungen kumuliert
1990	2.590	unbekannt	1.548	unbekannt	906	unbekannt	3.496	unbekannt
1991	3.008	1,1614	1.600	1,0336	1.239	1,3675	4.247	1,2148
1992	3.363	1,1180	1.616	1,0100	1.243	1,0032	4.606	1,0845
1993	3.206	0,9533	1.511	0,9350	1.366	1,0990	4.572	0,9926
1994	3.405	1,0621	1.681	1,1125	1.668	1,2211	5.073	1,1096
1995	3.189	0,9366	1.596	0,9494	1.730	1,0372	4.919	0,9696
1996	3.301	1,0351	1.587	0,9944	1.585	0,9162	4.886	0,9933
1997	3.433	1,0400	1.652	1,0410	1.523	0,9609	4.956	1,0143
1998	3.531	1,0285	1.715	1,0381	1.586	1,0414	5.117	1,0325
1999	3.544	1,0037	1.695	0,9883	1.587	1,0006	5.131	1,0027
2000	3.591	1,0133	1.698	1,0018	1.588	1,0006	5.179	1,0094
2001	3.582	0,9975	1.699	1,0006	1.535	0,9666	5.117	0,9880
2002	3.741	1,0444	1.812	1,0665	1.653	1,0769	5.394	1,0541
2003	3.282	0,8773	1.737	0,9586	1.539	0,9310	4.821	0,8938
2004	3.119	0,9503	1.662	0,9568	1.710	1,1111	4.829	1,0017
2005	3.312	1,0619	1.724	1,0373	1.803	1,0544	5.115	1,0592
2006	3.241	0,9786	1.789	1,0377	1.738	0,9639	4.979	0,9734
2007	3.120	0,9627	1.698	0,9491	1.596	0,9183	4.716	0,9472
2008	3.129	1,0029	1.667	0,9817	1.608	1,0075	4.737	1,0045
2009	3.126	0,9990	1.768	1,0606	1.562	0,9714	4.688	0,9897
2010	3.352	1,0723	1.786	1,0102	1.608	1,0294	4.960	1,0580
2011	3.412	1,0179	1.845	1,0330	1.614	1,0037	5.026	1,0133
2012	3.518	1,0311	1.792	0,9713	1.639	1,0155	5.157	1,0261
Jährl. Wachstumsrate		1,0140		1,0067		1,0273		1,0178
Jährl. Wachstumsrate bis 1995		1,0425		1,0061		1,1381		1,0707
Jährl. Wachstumsrate ab 1995		1,0058		1,0068		0,9968		1,0028

Tab. 1| Tabelle 1 Die Entwicklung der 'Sonderausstellungen mit dem Schwerpunkt Kunst'.
Quelle: Selbst

Sonderausstellungen in Kunstmuseen

Eine Teilbetrachtung der Gruppe der Kunstmuseen zeigt hinsichtlich der 'Sonderausstellungen in Kunstmuseen' über die Jahre hinweg eine relativ stabile Entwicklung, die sich in einer kontinuierlichen Zunahme der Sonderausstellungen ausdrückt (►Tab. 1|). Vom Jahr 1990 (1548 Sonderausstellungen) auf das Jahr 2012 (1792 Sonderausstellungen) ist eine absolute Zunahme von 16% zu ermitteln. Hierbei sind die Extremwerte im Jahr 1993 mit 1.511 Sonderausstellungen (min.) und im Jahr 2011 mit 1.845 Sonderausstellungen (max.) zu verzeichnen. Jedoch liegt der Anteil an 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst', die auf Kunstmuseen entfallen, bei höchstens 41%. Dies belegen die Zahlen aus den Jahren 2009 bis 2012.[78] Der größere Anteil von Sonderausstellungen wird demzufolge in Institutionen präsentiert, die nicht zur Kategorie der Kunstmuseen zählen.

Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern

Wiederum gesondert zu betrachten sind 'Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern', da ihr Ausstellungskonzept auf dem Prinzip der Sonderausstellung beruht. Die Ausstellungshäuser haben die Anzahl ihrer Ausstellungen innerhalb von fünf Jahren, beginnend im Jahr 1990 mit 906 Ausstellungen, um 91% auf 1.730 Sonderausstellungen im Jahr 1995 gesteigert (►Tab. 1|). Der Hochpunkt wird im Jahr 2005 mit 1.803 gezeigten Ausstellungen erreicht. Ab dem Jahr 1996 sind quantitative Einbrüche auszumachen, jedoch fallen diese nie höher als 15% im Vergleich zum Spitzenwert aus. Insgesamt liegt die jährliche Wachstumsrate bei 1,027 (2,7%).

'Kunst-Sonderausstellungen'

Bei der Gesamtbetrachtung von 'Kunst-Sonderausstellungen' in allen Institutionen (Museen sowie Ausstellungshäusern) ist die Entwicklung analog zu vorher Geschildertem. So beträgt der Anteil von 'Ausstellungen in Ausstellungshäusern' gegenüber 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' in der Gesamtbetrachtung der 'Kunst-Sonderausstellungen' in allen Institutionen (kumuliert) über die Jahre hinweg zwischen 30% und 35% (►Abb. 3|). Diese Entwicklung ist vergleichsweise konstant. Gemäß der parallelen Entwicklung ist der Hochpunkt im Jahr 2002 mit 5.394 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' zu konstatieren. Ebenso ist im darauffolgenden Jahr ein starker Einbruch von 11% zu verzeichnen. Ab dem Tiefpunkt im Jahr 2009 ist die Tendenz wieder steigend, so werden im Jahr 2012 5.157 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' angegeben. Die durchschnittliche Wachstumsrate der Gesamtheit aller 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' liegt bei 1,018 (1,8%). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die Anzahl der 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' im

78 Im Jahr 2009 beträgt der Anteil 43%. [Vergleiche:Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2010 , Seite 58] Im Jahr 2010 beträgt der Anteil 41%. [Vergleiche:Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2011, Seite 63] Im Jahr 2011 beträgt der Anteil 40%. [Vergleiche:Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2012, Seite 64] Im Jahr 2012 beträgt der Anteil 40%. [Vergleiche:Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 64] Dieses ergibt gemittelt 41%. Aus den übrigen Jahren liegen hierzu keine Zahlen vor.

gewählten Zeitraum grundsätzlich positiv entwickelt hat. Auf Basis der durchschnittlichen Wachstumsrate ist sowohl bei Ausstellungshäusern und Kunstmuseen als auch bei den übrigen Institutionen eine positive Tendenz auszumachen (►Abb. 3|).

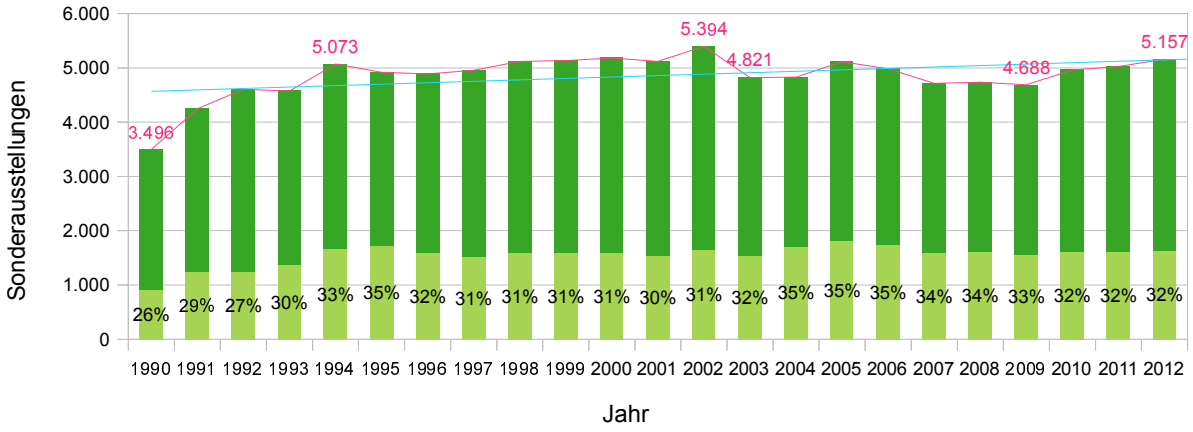


Abb. 3| Gesamtentwicklung der 'Kunst-Sonderausstellungen' ('Ausstellungen in Ausstellungshäusern' im Verhältnis zu 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' in allen Institutionen (kumuliert)).
Quelle: Selbst

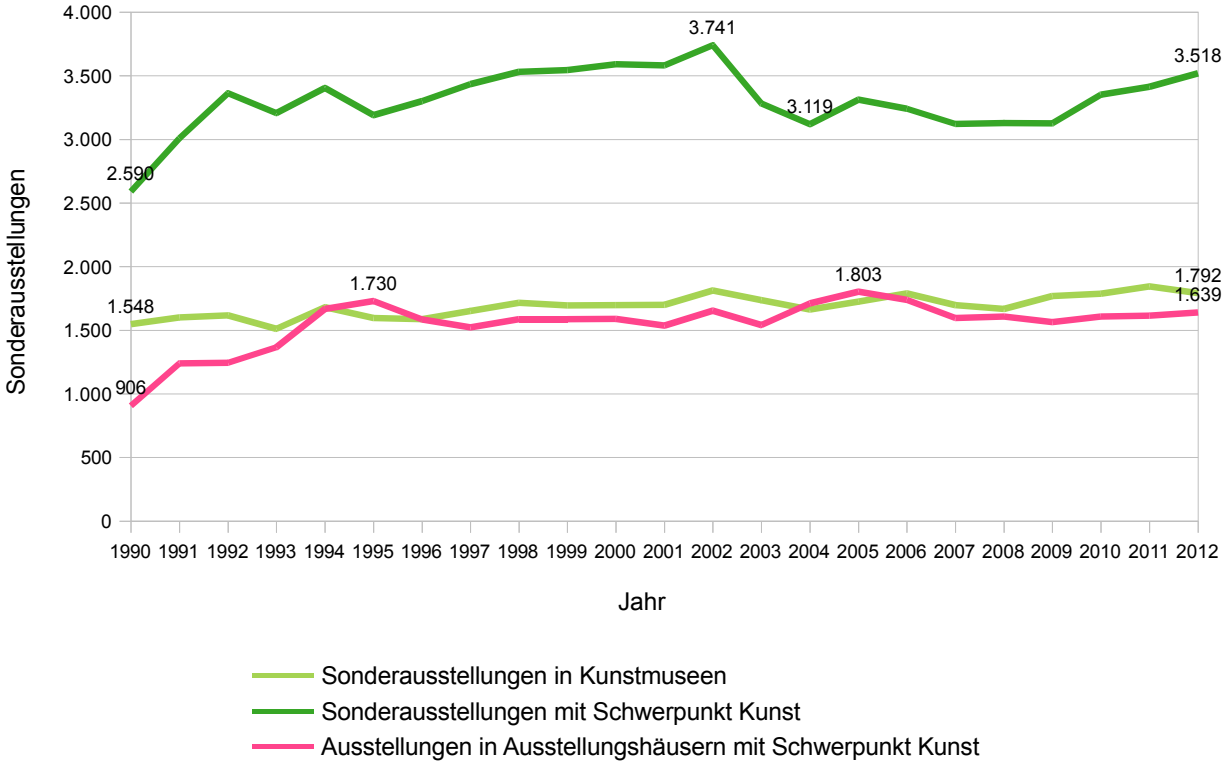


Abb. 4| Verdeutlichung der Entwicklung der Sonderausstellungen in den einzelnen Institutionen (nicht kumuliert, mit benannten Extremwerten).
Quelle: Selbst

Die detaillierte Betrachtung der Entwicklung von 'Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' hat jedoch gezeigt, dass der Zeitraum bis zur Mitte der 90er Jahre von signifikanten Zuwächsen geprägt war. Dies schlägt sich in einer dementsprechend hohen Wachstumsrate nieder

('Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst': 1,043 (4,3%); 'Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern': 1,138 (13,8%)) (►Tab. 1|). Hingegen zeigt die durchschnittliche Wachstumsrate ab dem Jahr 1995 eine tendenziell stagnierende Entwicklung ('Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst': 1,006 (0,6%); 'Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern': 0,997 (-0,3%)). Rückschließend ist zu konstatieren, dass Aussagen zur tendenziellen Entwicklungen maßgeblich von der Wahl des Auswertungszeitraums abhängig sind.

5.2.2 Museen

Im nächsten Schritt wird die Entwicklung der Institutionen untersucht, um mögliche Zusammenhänge über Sonderausstellungen abzuleiten. So zeigt eine Betrachtung der Museumsentwicklung über die Jahre 1990 bis 2012 einen deutlichen Anstieg von 4.034 auf 6.355 Institutionen (►Tab. 2|). Dieses entspricht einer Steigerung von ca. 57%. Abermals ist hier ein Vergleich, bzw. Rückschlüsse über die Entwicklung von Sonderausstellungen nicht legitim, da nicht alle der bezifferten Institutionen zwangsläufig auch Sonderausstellungen präsentieren. Interessenschwerpunkt gilt der Entwicklung der Institutionen mit Sonderausstellungen. Zu nennen sind Museen (inkl. Kunstmuseen) mit Sonderausstellungen und Ausstellungshäuser.

Museen mit Sonderausstellungen

Museen mit Sonderausstellungen verzeichneten einen Anstieg, beginnend bei 1.768 Institutionen im Jahr 1990 auf 2.750 Institutionen im Jahr 2012 (►Tab. 2|), was einer Steigerung um 55,5% entsprucht, wobei die jährliche Wachstumsrate von 1,020 (2%) die stetige positive Entwicklung belegt. Hingegen zeigt die Entwicklung der 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' eine leicht geringeres durchschnittliches Wachstum von 1,014 (1,4%).
Da über die Jahre hinweg eine signifikante Zunahme von Museumsneugründungen, die Sonderausstellungen im Allgemeinen zeigen stattfand, müssten im Umkehrschluss auf die Institutionen weniger 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' entfallen. Eine kalkulatorische Berechnung der durchschnittlichen Ausbringen von 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' je Museum belegen den Hochpunkt im Jahr 1992 mit 1,7 Ausstellungen und eine sukzessive Abnahme derselben bis ins Jahr 2012 mit 1,3 Ausstellungen.

Kunstmuseen

Die Gruppe der Kunstmuseen, die Sonderausstellungen zeigen, zeichnet sich, verglichen mit den Museen mit Sonderausstellungen im Allgemeinen, durch eine äquivalente Entwicklung aus. In Bezug auf Neugründungen sind im Jahr 1990 257 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' festzustellen, die sich bis in das Jahr 2012 auf 384 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' steigern (►Tab. 3|, Abb. 5|). Dieses entspricht einer Zunahme von 49% und einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 1,018 (1,8%). Erstaunlicher Weise ist der Anstieg der 'Sonderausstellungen in Kunstmuseen' wiederum weniger ausgeprägt – hier beträgt die durchschnittliche Wachstumsrate

1,01. Damit ergibt sich sogar eine Abnahme der im Durchschnitt gezeigten Sonderausstellungen: So zeigt ein Kunstmuseum im Jahr 1990 durchschnittlich sechs Sonderausstellungen, im Jahr 2012 sind es nur noch 4,7 (▶ Abb. 6|).

Jahr	Museen (gesamt)	Museen mit Sonderausstellungen (gesamt)	Wachstumsrate Museen mit Sonderausstellungen	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst je Museum (kalkulatorisch)	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst	Sonstige Museen mit Sonderausstellungen (exkl. Kunstmuseen)
1990	4.034	1.768	unbekannt	1,5	2.590	1.511
1991	4.316	1.868	1,0566	1,6	3.008	1.599
1992	4.475	1.929	1,0327	1,7	3.363	1.657
1993	4.682	2.021	1,0477	1,6	3.206	1.732
1994	4.827	2.125	1,0515	1,6	3.405	1.807
1995	4.919	2.212	1,0409	1,4	3.189	1.904
1996	5.040	2.219	1,0032	1,5	3.301	1.906
1997	5.219	2.385	1,0748	1,4	3.433	2.053
1998	5.376	2.502	1,0491	1,4	3.531	2.169
1999	5.629	2.518	1,0064	1,4	3.544	2.183
2000	5.827	2.598	1,0318	1,4	3.591	2.252
2001	5.897	2.585	0,9950	1,4	3.582	2.227
2002	6.059	2.649	1,0248	1,4	3.741	2.304
2003	6.135	2.747	1,0370	1,2	3.282	2.382
2004	6.177	2.694	0,9807	1,2	3.119	2.346
2005	6.155	2.661	0,9878	1,2	3.312	2.324
2006	6.175	2.652	0,9966	1,2	3.241	2.310
2007	6.197	2.714	1,0234	1,1	3.120	2.376
2008	6.190	2.664	0,9816	1,2	3.129	2.315
2009	6.256	2.781	1,0439	1,1	3.126	2.402
2010	6.281	2.729	0,9813	1,2	3.352	2.349
2011	6.304	2.829	1,0366	1,2	3.412	2.427
2012	6.355	2.750	0,9721	1,3	3.518	2.366
		Jährl. Wachstumsrate	1,0203			

Tab. 2| Entwicklung der Institution Museum, sowie der dort gezeigten Sonderaus stellungen/'Sonderausstellungen mit dem Schwerpunkt Kunst'.
Quelle: Selbst

Jahr	Kunstmuseen	Wachstumsrate Kunstmuseen	Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Wachstumsrate Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Kunstmuseen ohne Sonderausstellungen (kalkulatorisch)	Sonderausstellungen je Kunstmuseum (kalkulatorisch)	Sonderausstellungen in Kunstmuseen
1990	426	unbekannt	257	unbekannt	169	6,0	1.548
1991	456	1,0704	269	1,0467	187	5,9	1.600
1992	473	1,0373	272	1,0112	201	5,9	1.616
1993	506	1,0698	289	1,0625	217	5,2	1.511
1994	524	1,0356	318	1,1003	206	5,3	1.681
1995	534	1,0191	308	0,9686	226	5,2	1.596
1996	540	1,0112	313	1,0162	227	5,1	1.587
1997	555	1,0278	332	1,0607	223	5,0	1.652
1998	559	1,0072	333	1,0030	226	5,2	1.715
1999	577	1,0322	335	1,0060	242	5,1	1.695
2000	585	1,0139	346	1,0328	239	4,9	1.698
2001	600	1,0256	358	1,0347	242	4,7	1.699
2002	604	1,0067	345	0,9637	259	5,3	1.812
2003	611	1,0116	365	1,0580	246	4,8	1.737
2004	618	1,0115	348	0,9534	270	4,8	1.662
2005	616	0,9968	337	0,9684	279	5,1	1.724
2006	628	1,0195	342	1,0148	286	5,2	1.789
2007	631	1,0048	338	0,9883	293	5,0	1.698
2008	634	1,0048	349	1,0325	285	4,8	1.667
2009	653	1,0300	379	1,0860	274	4,7	1.768
2010	660	1,0107	380	1,0026	280	4,7	1.786
2011	668	1,0121	402	1,0579	266	4,6	1.845
2012	680	1,0180	384	0,9552	296	4,7	1.792
	Jährl. Wachstumsrate	1,0215		1,0184			

Tab. 3| Entwicklung der Kunstmuseen.
Quelle: Selbst

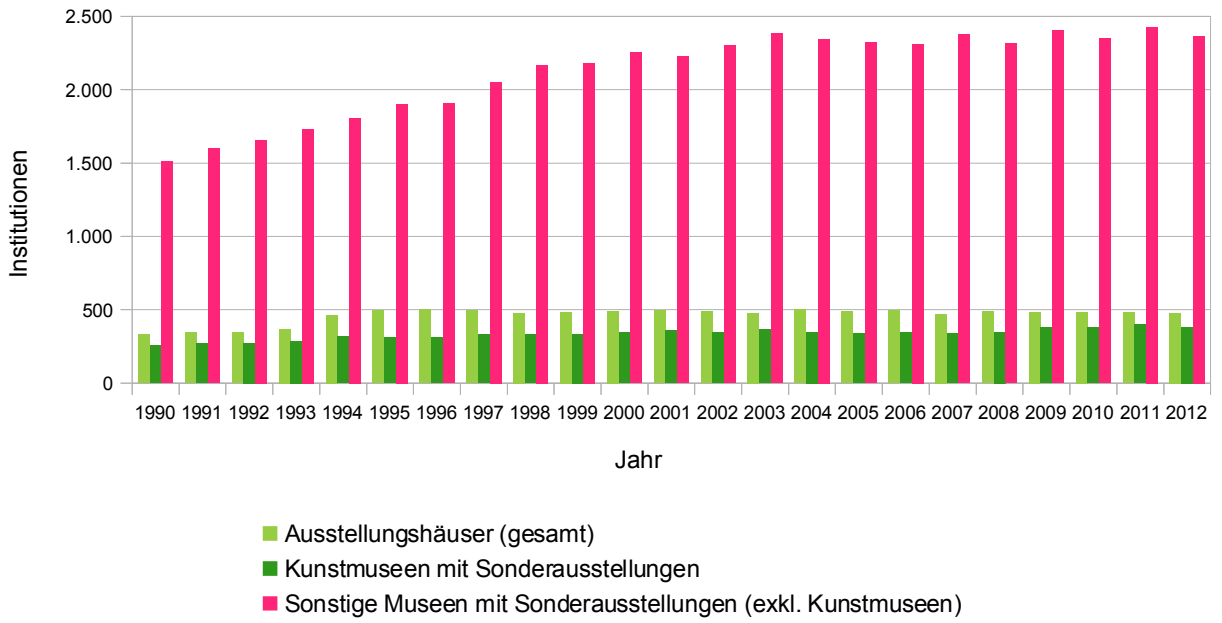


Abb. 5| Entwicklung der Institutionen mit Sonderausstellungen.
Quelle: Selbst

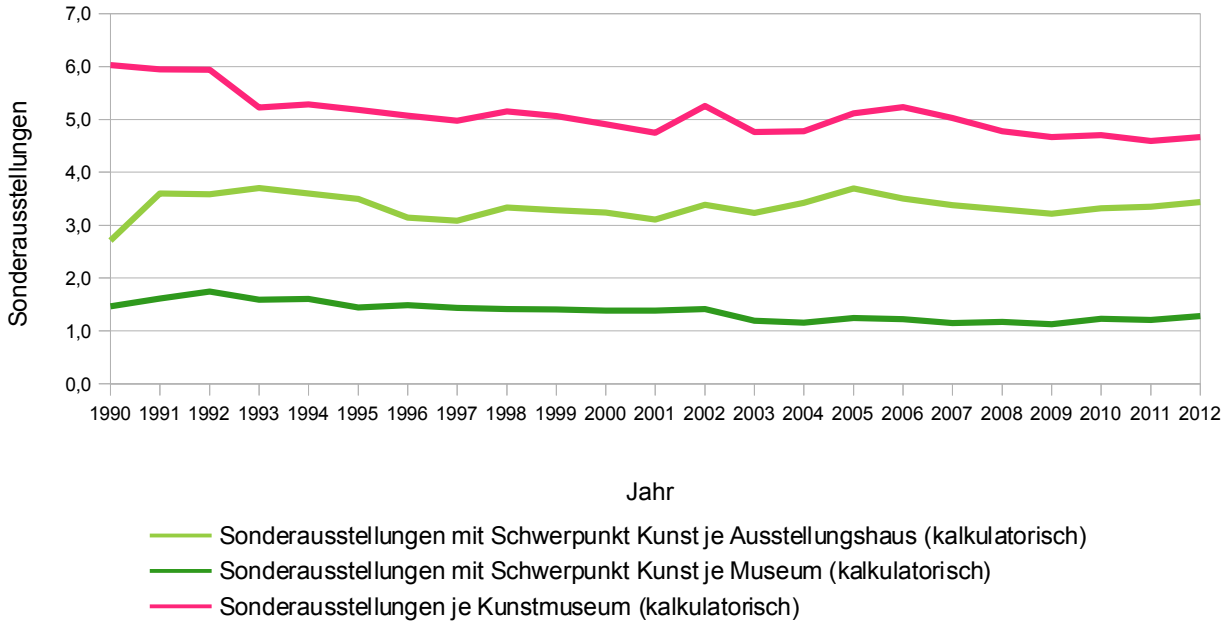


Abb. 6| Sonderausstellungen je Institutionen (kalkulatorisch).
Quelle: Selbst

Ausstellungshäuser

Um die Entwicklung der Sonderausstellungen möglichst vollständig skizzieren zu können, sind Ausstellungshäuser in die Betrachtung einzubeziehen. Die Entwicklung ihrer Neugründungen ist ab dem Jahr 1990 mit 334 Ausstellungshäusern, bis ins Jahr 1996 mit 504 Ausstellungshäusern, signifikant steigend (►Tab. 4|). In den folgenden Jahren sind Schwankungen um max. 6% zu verzeichnen sowie ein tendenzieller Rückgang. Für das Jahr 2012 sind 477 Ausstellungshäuser belegt. Die durchschnittliche Wachstumsrate liegt bei 1,016 (1,6%). Im Wesentlichen folgt die Entwicklung der ‘Ausstellungen

mit dem Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern' diesem Muster. Die Ausbringung, gemessen an der kalkulatorischen Anzahl von Ausstellungen je Ausstellungshaus, bewegt sich ab dem Jahr 1991 immer zwischen 3,1 und 3,7.

Jahr	Ausstellungshäuser (gesamt)	Wachstumsrate Ausstellungshäuser	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst je Ausstellungshaus (kalkulatorisch)	Ausstellungen in Ausstellungshäusern mit Schwerpunkt Kunst
1990	334	unbekannt	2,7	906
1991	344	1,0299	3,6	1.239
1992	347	1,0087	3,6	1.243
1993	369	1,0634	3,7	1.366
1994	463	1,2547	3,6	1.668
1995	495	1,0691	3,5	1.730
1996	504	1,0182	3,1	1.585
1997	494	0,9802	3,1	1.523
1998	476	0,9636	3,3	1.586
1999	484	1,0168	3,3	1.587
2000	490	1,0124	3,2	1.588
2001	494	1,0082	3,1	1.535
2002	488	0,9879	3,4	1.653
2003	476	0,9754	3,2	1.539
2004	500	1,0504	3,4	1.710
2005	488	0,9760	3,7	1.803
2006	496	1,0164	3,5	1.738
2007	472	0,9516	3,4	1.596
2008	488	1,0339	3,3	1.608
2009	486	0,9959	3,2	1.562
2010	484	0,9959	3,3	1.608
2011	482	0,9959	3,3	1.614
2012	477	0,9896	3,4	1.639
	Jährl. Wachstumsrate	1,0163		

Tab. 4| Entwicklung der Ausstellungshäuser.
Quelle: Selbst

5.2.3 Besuchzahlen

Museen mit Sonderausstellungen

Im weiteren Verlauf soll untersucht werden, inwiefern die Neugründungen und die entsprechende Ausbringung in Bezug auf 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' die Anzahl der Besuche beeinflusst.

Grundsätzlich belegen die Zahlen eine Zunahme der Museumsbesuche in 'Museen mit Sonderausstellungen' von 1990 (63608390 Besuche) zum Jahr 2012 (77759193 Besuche) um 22% (►Tab. 6|). Da die Statistik keine Besuchzahlen für Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst liefert, können Informationen lediglich aus den Daten auf Basis der Institutionen, also für Kunstmuseen und Ausstellungshäuser, abgeleitet werden.

Kunstmuseen

In Kunstmuseen stellt sich die Situation wie folgt dar: In der Gesamtheit zeigt der Vergleich des Jahres 1990 (16817988 Besuche) mit den Daten von 2012 (19663117 Besuche) eine Zunahme der Besuchzahlen um 17% (►Tab. 6|). Bei einer differenzierten Betrachtung der 'Kunstmuseen mit Sonderausstellung' ist eine Zunahme von 17% zu verzeichnen (Jahr 1990 (14404602 Besuche); Jahr 2012 (16884221 Besuche) ►Tab. 6|). Die Besuchzahlen für 'Kunstmuseen ohne Sonderausstellungen' fällt hingegen etwas geringer aus (15% im Vergleich der Jahre 1990 (2413386 Besuche) mit 2012 (2778896 Besuche)) (►Tab. 7|).

Um eine Bewertung der Besuchzahlen unter Berücksichtigung der institutionellen Entwicklung und ihre Verteilung auf die Museumstypen zu ermöglichen, ist es hilfreich, die durchschnittliche Anzahl der Besuche je Institution zu ermitteln. So zeigt die kalkulatorische Berechnung der Museumsbesuche je Kunstmuseum mit Sonderausstellungen, dass diese Schwankungen unterliegen (Minimum 34886 Besuche im Jahr 1997, Maximum 56049 Besuche im Jahr 1990). Um aus den Schwankungen dennoch eine tendenzielle Entwicklung ableiten zu können, wird die Wachstumsrate herangezogen. So ergibt sich für die kalkulatorischen Museumsbesuche je 'Kunstmuseum mit Sonderausstellung' eine Wachstumsrate von 0,99 (-1%) (►Tab. 6|) und je 'Kunstmuseum ohne Sonderausstellung' eine Wachstumsrate von 0,98 (-2%) (►Tab. 7|). Dies zeigt also eine marginale Abnahme der Besuche über die Jahre 1990 bis 2012 auf. Da die Anzahl der Kunstmuseen mit und ohne Sonderausstellungen über den Zeitraum steigend ist, kann dieses mit als Grund für die Zunahme der Museumsbesuche angenommen werden.

Weiterhin fällt auf, dass 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' (Jahr 2012 (43969 Besuche) ►Tab. 6|) einen sehr viel größeren Besuchzustrom erfahren als jene ohne Sonderausstellungen (Jahr 2012 (9388 Besuche)) – und das über den Zeitraum von 1990 bis 2012 (durchschnittlich im Verhältnis 4:1) (►Abb. 7|).

Jahr	Museumsbesuche in Museen mit Sonderausstellungen (gesamt, Meldezahl gemäß Fragebogen)
1990	63.608.390
1991	58.301.211
1992	60.326.580
1993	60.421.659
1994	59.390.387
1995	61.171.956
1996	58.225.734
1997	60.895.011
1998	63.245.831
1999	63.733.469
2000	64.688.256
2001	66.359.147
2002	64.686.451
2003	63.472.287
2004	68.268.130
2005	67.029.378
2006	66.819.090
2007	71.676.272
2008	67.641.075
2009	73.087.492
2010	74.748.734
2011	74.976.499
2012	77.759.193

Tab. 5| Entwicklung der Besuchzahlen in Museen mit Sonderausstellungen.
Quelle: Selbst

Jahr	Museumsbesuche in Kunstmuseen	Museumsbesuche in Kunstmuseen mit Sonderausstellung	Wachstumsrate Museumsbesuche in Kunstmuseen mit Sonderausstellung	Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Museumsbesuche je Kunstmuseum mit Sonderausstellung (kalkulatorisch)	Wachstumsrate Museumsbesuch je Kunstmuseum mit Sonderausstellung
1990	16.817.988	14.404.602	unbekannt	257	56.049	unbekannt
1991	15.796.903	12.853.483	0,8923	269	47.782	0,8525
1992	16.276.057	13.915.321	1,0826	272	51.159	1,0707
1993	15.376.521	12.122.923	0,8712	289	41.948	0,8199
1994	15.000.178	11.934.914	0,9845	318	37.531	0,8947
1995	14.649.422	11.301.824	0,9470	308	36.694	0,9777
1996	14.460.935	11.617.708	1,0279	313	37.117	1,0115
1997	14.439.129	11.582.305	0,9970	332	34.886	0,9399
1998	15.298.340	12.416.045	1,0720	333	37.285	1,0688
1999	15.923.959	13.270.789	1,0688	335	39.614	1,0625
2000	15.122.278	12.248.841	0,9230	346	35.401	0,8936
2001	16.251.180	13.010.544	1,0622	358	36.342	1,0266
2002	17.250.796	13.714.537	1,0541	345	39.752	1,0938
2003	17.040.504	13.548.090	0,9879	365	37.118	0,9337
2004	19.088.333	15.392.962	1,1362	348	44.233	1,1917
2005	19.230.660	15.188.011	0,9867	337	45.068	1,0189
2006	19.941.292	15.965.143	1,0512	342	46.682	1,0358
2007	21.410.435	17.466.823	1,0941	338	51.677	1,1070
2008	19.688.808	15.682.362	0,8978	349	44.935	0,8695
2009	18.333.890	15.368.559	0,9800	379	40.550	0,9024
2010	19.270.693	16.810.795	1,0938	380	44.239	1,0910
2011	18.604.073	15.705.847	0,9343	402	39.069	0,8831
2012	19.663.117	16.884.221	1,0750	384	43.969	1,1254
		Jährl. Wachstumsrate	1,0072			0,9890

Tab. 6| Entwicklung der Besuchzahlen der 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen'.
Quelle: Selbst

Jahr	Museumsbesuche in Kunstmuseen ohne Sonderausstellung	Wachstumsrate Museumsbesuche in Kunstmuseen ohne Sonderausstellung	Kunstmuseen ohne Sonderausstellungen (kalkulatorisch)	Museumsbesuche je Kunstmuseum ohne Sonderausstellung (kalkulatorisch)	Wachstumsrate Museumsbesuch je Kunstmuseum ohne Sonderausstellung
1990	2.413.386	unbekannt	169	14.280	unbekannt
1991	2.943.420	1,2196	187	15.740	1,1022
1992	2.360.736	0,8020	201	11.745	0,7462
1993	3.253.598	1,3782	217	14.994	1,2766
1994	3.065.264	0,9421	206	14.880	0,9924
1995	3.347.598	1,0921	226	14.812	0,9955
1996	2.843.227	0,8493	227	12.525	0,8456
1997	2.856.824	1,0048	223	12.811	1,0228
1998	2.882.295	1,0089	226	12.754	0,9955
1999	2.653.170	0,9205	242	10.964	0,8596
2000	2.873.437	1,0830	239	12.023	1,0966
2001	3.240.636	1,1278	242	13.391	1,1138
2002	3.536.259	1,0912	259	13.654	1,0196
2003	3.492.414	0,9876	246	14.197	1,0398
2004	3.695.371	1,0581	270	13.687	0,9641
2005	4.042.649	1,0940	279	14.490	1,0587
2006	3.976.149	0,9836	286	13.903	0,9595
2007	3.943.612	0,9918	293	13.459	0,9681
2008	4.006.446	1,0159	285	14.058	1,0445
2009	2.965.331	0,7401	274	10.822	0,7699
2010	2.459.898	0,8296	280	8.785	0,8118
2011	2.898.226	1,1782	266	10.896	1,2402
2012	2.778.896	0,9588	296	9.388	0,8616
Jährl. Wachstumsrate		1,0064			0,9811

Tab. 7| Entwicklung der Besuchzahlen der 'Kunstmuseen ohne Sonderausstellungen'.
Quelle: Selbst

Ausstellungshäuser

Für die Besuche von Ausstellungshäuser ist eine Zunahme der absoluten Besuchzahlen von 1990 (3855530 Besuche) zu 2012 (6594244 Besuche) auszumachen, was einer Steigerung um 71% entspricht (►Tab. 8|). Die Wachstumsrate (Jahr 1990 bis 2012) von 1,025 (2,5%) belegt zusätzlich die positive Entwicklung. Die Aufschlüsselung der Besuche je Ausstellungshaus zeigt im Vergleich des Jahres 1990 (11544 Besuche je Ausstellungshaus) mit 2012 (13824 Besuche je Ausstellungshaus) eine ebensolch positive Entwicklung, die ihren zusätzlichen Beleg in der Wachstumsrate von 1,008 (0,8%) findet.

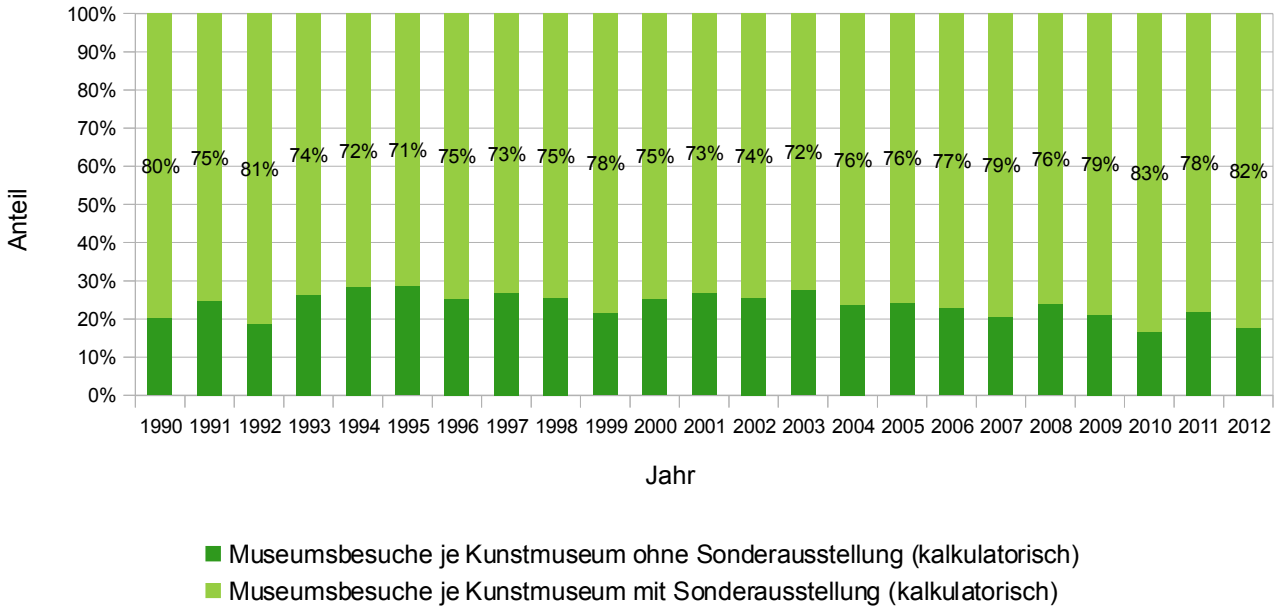


Abb. 7| Verteilung der Museumsbesuche nach Kunstmuseum mit und ohne Sonderausstellungen.
Quelle: Selbst

Jahr	Ausstellungshaus-besuche (Meldezahl gemäß Fragebogen)	Wachstumsrate Ausstellungshausbesuche	Ausstellungshäuser (gesamt)	Besuche je Ausstellungshaus (kalkulatorisch)	Wachstumsrate Besuchzahlen je Ausstellungshaus
1990	3.855.530	unbekannt	334	11.544	unbekannt
1991	3.585.454	0,9300	344	10.423	0,9029
1992	5.255.583	1,4658	347	15.146	1,4531
1993	4.685.813	0,8916	369	12.699	0,8384
1994	4.574.516	0,9762	463	9.880	0,7780
1995	4.679.077	1,0229	495	9.453	0,9567
1996	4.836.121	1,0336	504	9.595	1,0151
1997	5.671.696	1,1728	494	11.481	1,1965
1998	5.795.548	1,0218	476	12.176	1,0605
1999	5.824.950	1,0051	484	12.035	0,9885
2000	5.333.834	0,9157	490	10.885	0,9045
2001	7.658.381	1,4358	494	15.503	1,4242
2002	7.511.111	0,9808	488	15.392	0,9928
2003	6.088.957	0,8107	476	12.792	0,8311
2004	6.176.961	1,0145	500	12.354	0,9658
2005	6.924.337	1,1210	488	14.189	1,1486
2006	7.056.912	1,0191	496	14.228	1,0027
2007	6.155.155	0,8722	472	13.041	0,9166
2008	6.185.463	1,0049	488	12.675	0,9720
2009	6.422.298	1,0383	486	13.215	1,0426
2010	6.165.670	0,9600	484	12.739	0,9640
2011	6.381.081	1,0349	482	13.239	1,0392
2012	6.594.244	1,0334	477	13.824	1,0442
	Jährl. Wachstumsrate	1,0247			1,0082

Tab. 8| Entwicklung der Besuchzahlen in Ausstellungshäusern.
Quelle: Selbst

5.2.4 Korrelationsbetrachtung von Institutionen, Ausstellungen und Besuchzahlen

Ob es Zusammenhänge zwischen den eingangs genannten Aspekten Institutionen, 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' und den Besuchzahlen gibt, wird im Folgenden betrachtet. Ausprägung und Richtung einer Entwicklung, basierend auf quantitativen Erhebungen, können mittels einer Korrelationsbetrachtung nachgewiesen werden. So lassen sich klare Zusammenhänge zwischen der Anzahl gezeigter 'Kunst-Sonderausstellungen' und der Anzahl an Institutionen feststellen – sowohl bei Kunstmuseen (Korrelation 0,85) (►Tab. 9|) als auch bei Ausstellungshäusern (Korrelation 0,88) (►Tab. 10|). Ausgenommen davon ist die Gesamtheit aller Museen, da 'Kunst-Sonderausstellungen' nicht zwangsläufig ihrem Ausstellungsschwerpunkt entsprechen (►Tab. 11|).

Ganz grundsätzlich besteht ein Zusammenhang der Museumsneugründungen mit Sonderausstellungen und Museumsbesuchen (Korrelation 0,75). Ebendieses gilt für Ausstellungshäuser und deren Besuchzahlen (Korrelation 0,65 ►Tab. 10|). Bei der untersuchten Anzahl von Sonderausstellungen und ihren Besuchen konnte keine Abhängigkeit nachgewiesen werden – lediglich bei den Ausstellungshäusern scheint es hier eine leichte Korrelation zu geben (0,61 ►Tab. 10|).

Jahr	Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Sonderausstellungen in Kunstmuseen	Museumsbesuche in Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Korrelations-koeffizient
1990	257	1.548	14.404.602	
1991	269	1.600	12.853.483	
1992	272	1.616	13.915.321	
1993	289	1.511	12.122.923	
1994	318	1.681	11.934.914	
1995	308	1.596	11.301.824	
1996	313	1.587	11.617.708	
1997	332	1.652	11.582.305	
1998	333	1.715	12.416.045	
1999	335	1.695	13.270.789	
2000	346	1.698	12.248.841	
2001	358	1.699	13.010.544	
2002	345	1.812	13.714.537	
2003	365	1.737	13.548.090	
2004	348	1.662	15.392.962	
2005	337	1.724	15.188.011	
2006	342	1.789	15.965.143	
2007	338	1.698	17.466.823	
2008	349	1.667	15.682.362	
2009	379	1.768	15.368.559	
2010	380	1.786	16.810.795	
2011	402	1.845	15.705.847	
2012	384	1.792	16.884.221	

Korrelation Institutionen und Ausstellungen	0,85
Korrelation Ausstellungen und Besuchzahlen	0,55
Korrelation Institutionen und Besuchzahlen	0,49

Tab. 9| Korrelationsbetrachtung Kunstmuseen.
Quelle: Selbst

Jahr	Ausstellungshäuser (gesamt)	Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäusern	Ausstellungshaus-besuche (Meldezahl gemäß Fragebogen)	Korrelations-koeffizient
1990	334	906	3.855.530	
1991	344	1.239	3.585.454	
1992	347	1.243	5.255.583	
1993	369	1.366	4.685.813	
1994	463	1.668	4.574.516	
1995	495	1.730	4.679.077	
1996	504	1.585	4.836.121	
1997	494	1.523	5.671.696	
1998	476	1.586	5.795.548	
1999	484	1.587	5.824.950	
2000	490	1.588	5.333.834	
2001	494	1.535	7.658.381	
2002	488	1.653	7.511.111	
2003	476	1.539	6.088.957	
2004	500	1.710	6.176.961	
2005	488	1.803	6.924.337	
2006	496	1.738	7.056.912	
2007	472	1.596	6.155.155	
2008	488	1.608	6.185.463	
2009	486	1.562	6.422.298	
2010	484	1.608	6.165.670	
2011	482	1.614	6.381.081	
2012	477	1.639	6.594.244	

Korrelation Institutionen und Ausstellungen	0,88
Korrelation Ausstellungen und Besuchzahlen	0,61
Korrelation Institutionen und Besuchzahlen	0,65

Tab. 10|
Korrelationsbetrachtung Ausstellungshäuser.
Quelle: Selbst

Jahr	Museen mit Sonderausstellungen (gesamt)	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst	Museumsbesuche in Museen mit Sonderausstellungen (gesamt, Meldezahl gemäß Fragebogen)	Korrelations-koeffizient
1990	1.768	2.590	63.608.390	
1991	1.868	3.008	58.301.211	
1992	1.929	3.363	60.326.580	
1993	2.021	3.206	60.421.659	
1994	2.125	3.405	59.390.387	
1995	2.212	3.189	61.171.956	
1996	2.219	3.301	58.225.734	
1997	2.385	3.433	60.895.011	
1998	2.502	3.531	63.245.831	
1999	2.518	3.544	63.733.469	
2000	2.598	3.591	64.688.256	
2001	2.585	3.582	66.359.147	
2002	2.649	3.741	64.686.451	
2003	2.747	3.282	63.472.287	
2004	2.694	3.119	68.268.130	
2005	2.661	3.312	67.029.378	
2006	2.652	3.241	66.819.090	
2007	2.714	3.120	71.676.272	
2008	2.664	3.129	67.641.075	
2009	2.781	3.126	73.087.492	
2010	2.729	3.352	74.748.734	
2011	2.829	3.412	74.976.499	
2012	2.750	3.518	77.759.193	

Korrelation Institutionen und Ausstellungen	0,44
Korrelation Ausstellungen und Besuchzahlen	0,08
Korrelation Institutionen und Besuchzahlen	0,75

Tab. 11|
Korrelationsbetrachtung Museen.
Quelle: Selbst

5.3 Abschlussbewertung zur Zunahme des Aufkommens von Kunsttransporten

Auch wenn die Erhebungen des Institut für Museumsforschung keine konkreten Zahlen zu den transportierten Objekten liefern, so ist es doch möglich, anhand der Auswertung die Diskussion über die angenommen Effizienz von Museen bezüglich ihrer Sonderausstellungen zu objektivieren. Die Analyse der Daten bringt einige Indikatoren hervor, die eine Einschätzung des Leihverkehrs ermöglichen.

Besonders auffällig ist die signifikante Zunahme der Museums- und Ausstellungshausneugründungen im Auswertungszeitraum. Museen (exkl. Kunstmuseen) und Kunstmuseen, die Sonderausstellungen zeigen, als auch Ausstellungshäuser, haben absolut seit dem Jahr 1990 im Vergleich zum Jahr 2012 jeweils die Anzahl ihrer Institutionen um mindestens 40% erhöht und können durchschnittliche Wachstumsraten von etwa 1,02 (2%) vorweisen.

Insbesondere die Anzahl der Neugründung von Ausstellungshäusern kommt im Kontext der Bewertung des Leihverkehrs zum Tragen, da diese in der Regel auf keine eigene Sammlung zurück greifen können und per se auf den Leihverkehr angewiesen sind. Den ‘Sonstigen Museen’ kann zunächst kein direkter ‘Kunstbezug’ zugewiesen werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass ein Großteil der ‘Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst’ in Museen, die keine Kunstmuseen

sind, zu verorten ist. Bei diesen Museen ist davon auszugehen, dass sie, anders als Kunstmuseen, nicht auf eine eigene Gemäldesammlung zurückgreifen können (andernfalls wären sie per Definition Kunstmuseen), sie somit auf den Leihverkehr angewiesen sind. Es ist davon auszugehen, dass sie in einem nicht unerheblichen Maße die Entwicklung des Leihverkehrs beeinflussen.

So ist es naheliegend auf Basis der Neugründungen zu folgern, dass sich durch den Zuwachs der Institutionen auch eine Zunahme der 'Kunst-Sonderausstellungen' ergibt. In der Tat belegt die Statistik im ausgewerteten Zeitraum eine signifikante Zunahme von 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' in der Gesamtheit der Museumsarten sowie der 'Ausstellungen in Ausstellungshäusern'. Der Zuwachs von 'Kunst-Sonderausstellungen' ist in allen Institutionen von einer Art Boom in den Jahren 1990 bis 1995 geprägt - insbesondere bei den Ausstellungshäusern, die die Anzahl ihrer Ausstellungen innerhalb von fünf Jahren um 91% steigern konnten. Auch wenn bis Mitte der 90er Jahre die höchsten Zuwächse über einen längeren Zeitraum zu verzeichnen sind, so ist der absolute Hochpunkt der 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' im Jahr 2002 (3.741) und der der 'Ausstellungen in Ausstellungshäusern' im Jahr 2005 (1.803) zu verorten. So zeigt die durchschnittliche Wachstumsrate ab 1995 eine nur marginal steigende bis stagnierend Entwicklung. Jedoch ist auf Basis der Betrachtung des gesamten Zeitraums ab dem Jahr 1990, welcher durch Schwankungen geprägt ist, nicht auszuschließen, dass wieder eine Phase des Anstiegs folgt. Unter Ausschluss dieser spekulativen Aussage ist dennoch maßgeblich, dass über den gesamten Zeitraum das durchschnittliche Wachstum positiv ausfällt ('Kunst-Sonderausstellungen kumuliert' 1,018 (1,8%)).

Eine Analyse der Besuchzahlen sollte unter dem Gesichtspunkt der Zuwächse von 'Kunst-Sonderausstellungen' und/oder den Neugründung von Institutionen Aufschluss geben. Obgleich eine Ausweisung der Besuchzahlen nach Dauer- und Sonderausstellungen sowie nach 'Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst' auf Basis der Erhebungen nicht möglich ist. Fernerhin kann lediglich die Kategorisierung über den Typ der Institution einen Hinweis darauf geben, welchen Effekt 'Kunst-Sonderausstellungen' einnehmen. So fällt auf, dass 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' über die Jahre hinweg in der Regel viermal so viele Besuche aufweisen als jene ohne Sonderausstellungen, was mitunter jedoch auch an der Größe der Institution (Image) liegen kann. Sowohl für Ausstellungshäuser als auch 'Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' ist über den gesamten Auswertungszeitraum eine Zunahme der absoluten Besuchzahlen zu verzeichnen.[79] Bei Ausstellungshäusern ist dieser stärker ausgeprägt

79 Gleichwohl ist insgesamt analog zur Urbanisation eine Tendenz zur Zentralisierung der Ausstellungen belegbar. Gemäß der Datenerhebung des ‚Institut für Museumsforschung' ist eine deutlich gesteigerte Anzahl an Museumsbesuchen in Großstädten belegt, wohingegen die Besucherzahlen bei den Museen in Gemeinden zurück gegangen sind. [Vergleiche: Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013, Seite 676] Dieses trifft verstärkt auf das Besucherverhalten der jüngere Vergangenheit zu. Eine stetige Verlagerung der Besucher zu den großen Häusern ist nachgewiesen. Diese Zahlen korrelieren mit den Daten zu den Sonderausstellungen. Gemäß GRAF realisieren insbesondere die großen Häuser eine vergleichsweise große

– auch unter Berücksichtigung der Neugründungen ist die Tendenz leicht zunehmend.
Die grundlegend positive Entwicklung der Besuchzahlen untermauert die These, dass 'Kunst-Sonderausstellungen' in Museen und Ausstellungshäusern mehr und/oder häufiger rezipiert werden. Ein beeinflussender Faktor für diese Entwicklung sind vermutlich die Neugründungen im musealen Umfeld allgemein sowie die von Ausstellungshäusern (Korrelation > 0,65).[80]
Darüber hinaus haben die Museumsneugründungen zu einem weiteren positiven Effekt beigetragen, nämlich einem nachgewiesenen Zuwachs an 'Kunst-Sonderausstellungen'. Dieser kann hypothetisch als Ableitung bzw. Indikator für eine Zunahme des Leihverkehrs angenommen werden.

Anzahl an Sonderausstellungen. Weiter konstatiert der Autor exemplarisch für das Jahr 1997: „Nur 2.385 Museen von 5.219 angeschriebenen Häusern haben die 8.766 Sonderausstellungen gezeigt." Graf, 2000, Seite 23

80 Bei Kunstmuseen hingegen kann die aufgezeigte Abhängigkeit nicht eindeutig nachgewiesen werden, sondern lediglich eine entsprechende Tendenz (Korrelation 0,55).

6. Forschungslage über Klimaschwankungen und Objektveränderungen – eine Risikoeinschätzung

Nachdem der Transport von Gemälden und das Leihaufkommen bis hierher unter tendenziell kultursoziologischen und musealen Gesichtspunkten betrachtet wurde, wird im Folgenden der Belastungsfaktor Klimaschwankung näher untersucht, um eine Risikoeinschätzung vornehmen zu können. In der Einleitung wurden bereits auf vergleichsweise plakative Aussagen hingewiesen - diese gilt es zugleich kritisch zu überprüfen. „Die häufigste Schadenursache […] resultiert aus den Volumenänderungen des Holzes durch Feuchtigkeitsaufnahme oder -abgabe beim Wechsel der Relativen Luftfeuchte. Grundierung und Farbschichten stehen unter Einwirkung der Bewegung des Bildträgers."[81] Demzufolge soll sich der Forschungslage zu diesem Thema über eine Erörterung bestehender Vorgaben und Grenzwerte zum Schutz der Objekte genähert werden. Handelt es sich bei ihnen um allgemeine Empfehlungen, verbindliche Richtwerte oder gar streng eingehaltene internationale Standards? Wie stehen diesen den jüngsten Bestrebungen der in der Einleitung geschilderten Aufweichungen gegenüber? Sind die Vorwürfe mangelnder naturwissenschaftlicher Grundlagen zur Abhängigkeit von Klimaschwankung und Objektveränderungen legitim? Ferner soll die Frage erörtert werden, ob die Klimavorgaben aus dem Erfahrungswissen heraus abgeleitet worden sind, oder ob es wissenschaftlich fundierte Versuche gab, die entsprechende Rückschlüsse über zumutbare Klimabelastung rechtfertigen?

6.1 Richtwerte, Vorgaben oder Klimastandards zum Schutz der Objekte – eine Kontroverse

Im Zusammenhang auf klimatisch bedingte Abnutzungserscheinungen von Kunst und Kulturgut ist auf die Bestandsauslagerung der 'National Gallery London' während des zweiten Weltkrieges zu verweisen. Die Sammlung wurde in einem Stollen in Wales konstant bei 17 °C und 58 %RH eingelagert, sodass die klimatisch induzierten Veränderungen an den Gemälden zum Stilstand kamen. Mit der Betonung auf den konstanten Werten im Stollen wirkt dieses Ereignis bis heute nach.[82] So scheint sich der Glaube an ideale klimatische Bedingungen und die Gültigkeit der daraus resultierenden Werte als Richtwert etabliert zu haben. Eine Recherche in der aktuellen Standardliteratur offenbart bei KÜHN ähnliche Werte. In Bezug auf das Klima benennt er im Allgemeinen das Optimum der Temperatur mit 12 bis 18 °C wobei dieses nach seiner Ansicht tendenziell für Depots gilt.[83] In den Ausstellungsräumen sind Temperaturen im Bereich von 20 bis 22 °C zulässig – ein Zugeständnis an den Komfort

81 Sandner, 1990, Seite 227

82 Vergleiche: Kotterer, 2004a , Seite 114; Atkinson, 2014, Seite 208; Eibl & Burmester, 2013, Seite 218 f.

83 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 316

des Ausstellungsbesuchers.[84] Weiter befindet sich das Optimum der relativen Feuchte für anorganische Materialien zwischen 55 und 60 %RH, wobei jahreszeitliche Schwankungen im Bereich von 45 bis 65 %RH möglich sind.[85] Dem Grundsatz nach folgt KÜHN damit dem Postulat von HILBERT, dessen Werk im Bereich der präventiven Konservierung ebenfalls als Standard gilt. Dieser verortet die Temperatur in einer Spanne zwischen 18 und 25 °C und die der Relative Feuchte zwischen 40 bis 55 %RH.[86] SANDNER gibt wiederum nur für Holztafeln und Skulpturen die konkreten Werte von 6-18 °C und 55-65 %RH an.[87] Über Gemälde auf textilem Bildträger wird keine Aussage getroffen. Bereits in der eben zitierten Standardliteratur sind Diskrepanzen hinsichtlich der Klimaempfehlungen auszumachen.
Weitergehende Recherchen in der konservierungswissenschaftlichen Literatur führen unter anderem zu MECKLENBURG und TUMOSA, die für Museen Vorgaben um den Bereich von 24 °C und 50 %RH formulieren.[88] Auch STOLOW merkt an, dass sich in Europa die klimatischen Richtwerte von ca. 15-20 °C und 45-65 %RH etabliert haben, wobei in anderen Klimazonen davon abweichende Richtwerte gelten.[89] Dieser Gesichtspunkt regionaler klimatischer Besonderheiten wird von SAUNDERS aufgegriffen und in einer späteren Publikation ausführlich behandelt.[90] Es besteht Einigkeit darüber, dass von der relativen Feuchte im Vergleich zur Temperatur ein höheres Gefahrenpotenzial ausgeht – wobei Letztgenanntes Erstgenanntes direkt beeinflusst.[91] Niedrige Temperaturen gelten tendenziell als vorteilhaft, da dadurch die chemische Degradation verringert wird.[92]
Die oben genannten Empfehlungen sind nicht als Standard zu verstehen. Gemäß der Fachliteratur und der skizzierten Diskrepanzen gibt es jedoch eindeutige Hinweise darauf, dass ein mehr oder weniger international verbindlicher Richtwert um 55 % ± 5 %RH existiert.[93] Gleichwohl muss in Bezug auf gesteigerte Ansprüche der Schadensprävention im internationalen Leihverkehr die Frage nach der Gültigkeit und Verbindlichkeit regulierender Richtwerte nachdrücklich gestellt werden. STANIFORTH weist darauf hin, dass die Klimarichtwerte der Museen vergleichsweise diskrepant sind.[94] Zur Erörterung

84 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 316, mit Ergänzung von N.H.; Eibl & Burmester, 2013, Seite 219

85 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 318

86 Vergleiche: Hilbert, 1996, Seite 181 [Angaben zur Temperatur] und Seite 185 [Angaben zur relativen Feuchte]

87 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 287 und 292

88 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 173

89 Vergleiche: Stolow, 1987, Seite 14 ff. In einer früheren Publikation benennt der Autor die Klimarichtwerte mit 50-55 %RH und 20 °C. Vergleiche: Stolow, 1968, Seite 271

90 Vergleiche: Saunders, 1991, Seite 299 ff.; Atkinson, 2014, Seite 205

91 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 205; Bratasz, 2013, Seite 11; Kotterer, 2004a, Seite 115; mit Ergänzung von N.H.

92 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 209; Linden u. a., 2013, Seite 94

93 Vergleiche: Jeberien, 2014, Seite 45; Kotterer, 2004a, Seite 113

94 Vergleiche: Staniforth, 1991, Seite 335 ff.. Zugleich gibt die Autorin eine prägnante Zusammenfassung über den Ablauf eines Transportes, beginnend bei der Leihanfrage, über die Planung durch die Registrare, der klimatischen Konditionierung des Objektes, der Verpackung, bis hin zur Ausführungen zu eines Monitorings. Der letzte Aspekt wird

dieser Fragestellung ist auf ein EU-Forschungsprojekt zu verweisen.[95] Dessen Ergebnisse sind in einer Publikation von KOTTERER u.a. veröffentlicht,[96] wobei auf eine Zusammenfassung in der 'Restauro' referenziert wird.[97] So ergaben Recherchen gewichtige Hinweise, dass es einen entsprechenden Klimastandard nicht gibt.[98] Gemäß KOTTERER und GROßESCHMIDT beruhen die vom internationalen Museumsrat im Jahr 1960 herausgegebenen 'Richtwerte' auf einer allgemeinen nicht näher spezifizierten Umfrage von Archiven, Bibliotheken und Museen zu deren internen Klimaregelungen.[99] Diese Vorgehensweise wird mit der hierfür zugrundeliegenden Publikation von PLENDERLEITH & PHILIPPOT bestätigt (►Tab. 12|).[100] Im Laufe der Zeit wurden „[d]iese 'Standards' […] unkritisch verbreitet und verselbstständigten sich. Sie sind weder besonders überzeugend, noch wissenschaftlich untermauert."[101] Ebenso bestätigte eine aktuelle, aus dem Jahr 2013 stammende, entsprechend formulierte Umfrage von Forschern des IIC und des ICOM-CC dieses Ergebnis.[102]

Relevant ist die Tagung 'Climate for Collections, Standards and Uncertainties' im Jahr 2013 in München.[103] Aus dieser Konferenz ist ein Tagungsband hervorgegangen in welchem BRATASZ einen aufschlussreichen Überblick zur historischen Entwicklung von Klimastandards und der daraus resultierenden Parameter gibt.[104] Unter anderem zeigt sich auch bei BRATASZ, dass in der jüngeren Fachliteratur häufig auf den so genannte ASHRAE Standard (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers) referenziert wird, welcher in Zusammenarbeit mit Konservierungswissenschaftlern erarbeitet wurde.[105] Demnach besteht Konsens, dass analog zu den Jahreszeiten Langzeit-Klimaschwankungen im Bereich ± 10 %RH und zusätzliche Kurzzeit-Schwankungen von ± 5 %RH zu tolerieren sind – wobei 50 %RH den Ausgangswert bilden (Kategorie B ►Tab. 13|).[106] Eine entsprechende Aktualisierung erfährt dieser

jedoch vergleichsweise allgemein behandelt und stellt für diese Arbeit keinen weiteren Mehrwert da. Vergleiche: Staniforth, 1991, Seite 339 ff.

95 Vergleiche: Leissner & Fuhrmann, 2014, (EUROCARE EU-1383 PREVENT)

96 Vergleiche: Kotterer u. a., 2004, Seite 5 ff.

97 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 106 ff.

98 Vergleiche: Erhardt & Mecklenburg, 1994, Seite 32. Im genannten Zusammenhang sind auch die Ausführungen von ATKINSON aufschlussreich. Der Autor gibt einen detaillierten Überblick über die Entwicklung der Klimatisierung in Museen und Sammlungen und legt dar, dass die hieraus gewonnenen Erfahrungen die Etablierung von 'Klimastandards' beeinflusst haben. Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 205 ff.

99 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 114; Großeschmidt, 1998, Seite 51; Erhardt & Mecklenburg, 1994, Seite 32

100 Vergleiche: Plenderleith & Philippot, 1960, Seite 279

101 Kotterer, 2004b, Seite 97

102 Vergleiche: Bickersteth, 2014, Seite 221

103 Vergleiche: ICOMOS Deutschland, ICOMOS Luxemburg, ICOMOS Österreich, ICOMOS Schweiz u. a., 2012

104 Vergleiche: Bratasz, 2013, Seite 115 f.

105 Vergleiche: Bratasz, 2013, Seite 15 ff.; Broström u. a., 2013, Seite 105; Michalski, 2009, Seite 1 ff.; Kotterer, 2004a , Seite 115 f.

106 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 115

	Température / Temperature		HR / RH
	° C.	° F.	%
Archives et bibliothèques / Archives and libraries			
Antwerpen: Stadsarchief	15-20	59-68	45-60
London: H. J. Plenderleith [42, p. 11]	15.5-24	60-75	50-65
parchemins / parchments [42, p. 49]	15.5-23.5	60-75	55-60
papiers / papers [42, p. 54]	15.5	60	60
Paris: Bibliothèque nationale	12-24	53.5-75	40-60
Louvre, Cabinet des dessins	18-20	64.5-68	65
A. Noblecourt [25, p. 105]	16-24	61-75	45-63
Musées / Museums			
Amsterdam: Rijksmuseum	14-20	57-68	55-70
Antwerpen: Etnografisch Museum	20	68	45
Basel: Kunstmuseum	15-25	41-77	50-60
Berne: Musée des beaux-arts	16	61	55-65
Birmingham: Museum of Art	13.5-14	56-57	50
Bruxelles: Musées royaux des beaux-arts	12-18	53.5-64.5	50-70
Cleveland: Museum of Art	20-22	68-72	50-55
Detroit: Institute of Art	—	—	50-55
Hamburg: Kunsthalle	16-20	61-68	65-68
Karlsruhe: Staatliche Kunsthalle	12-18	53.5-64.5	60-80
Lille: Palais des beaux-arts	16-17	61-62.5	65-70
Lisboa: Museu Nacional de Arte Antiga	14-18	57-64.5	60
London: British Museum and Victoria and Albert Museum (Repository) [42]	15.5	60	60
National Gallery (Repository) [42]	17.2	63	58
F. I. G. Rawlins	15.6	60	55 ± 3
H. J. Plenderleith [42, p. 11]	17	63	58
New York: Metropolitan Museum of Art			
panneaux, bois / panels, wood	—	—	50
toiles, textiles, pierres / canvas, textiles, stones	—	—	30
Nürnberg: Germanisches Nationalmuseum	13	55.5	60-70
Oberlin, Ohio: Memorial Art Museum			
panneaux, bois / panels, wood	7-18.5	45-65	55
toiles, textiles / canvas, textiles	4.5-15.5	40-60	50
Intermuseum Laboratory	16-21	60-70	45-60
Paris: Louvre	—	—	55-70
A. Noblecourt [25]	18	64.5	58 ± 3
Regensburg: Museum der Stadt	—	—	55-65
Richmond, Va.: Virginia Museum of Fine Arts	20	68	40-60
San Diego: The Fine Arts Gallery	21	70	60-70
Stockholm: Nationalmuseum	18	64.5	50-60
Stuttgart: Staatsgalerie	17	62.5	66
Württembergisches Landesmuseum	—	—	60-70
Toronto: The Art Gallery	—	—	50-60
Viseu: Museu Regional de Grao Vasco	18	64.5	65
Washington: Freer Gallery of Art	18.5-25	65-75	40-55
National Gallery of Art	—	—	45-50

Tab. 12| Tabelle zu den Klimawerten aus 41 Institutionen.
Quelle: Plenderleith & Philippot, 1960, Seite 279

Standard in der Formulierung einer europäischen Norm – 'European Standard EN 15757:2010'.[107] Dieser berücksichtigt zusätzlich die durchschnittlichen Klimabedingungen des Standortes.[108]
Weiter zeigt der Vergleich der oben aufgeführten Standards mit den zu Beginn genannten Richtwerten um 55 % ± 5 %RH eine signifikante Ausdehnung zulässiger Klimaschwankungen. Beispielhaft zu apostrophieren: „[...] high risk begins outside the range 25%-75% RH."[109] Legitimiert wird diese Aufweichung in der konservierungswissenschaftlichen Literatur (!) durch die Berücksichtigung regionaler Klimabedingungen und jahreszeitlicher Schwankungen. Daher kann nach der Ansicht von KOTTERER „[v]on einer Aufweichung der Klimastandards im konservatorischem Sinn [...] nicht gesprochen werden. Änderungen finden in den engen Grenzen wie bisher statt, allerdings nicht mehr um einen internationalen überall gleichen Mittelwert herum, sondern langsam auf- und ableitend innerhalb bestimmter Sicherheitsbereiche, die je nach regionalen, saisonalen und sammlungsspezifischen Bedingungen zu formulieren sind."[110] Zur der selben Schlussfolgerung kommt BRATASZ, der den ASHRAE Standard befürwortet. Zusätzlich zu den regionalen und historisch bedingten Klimaschwankungen hält er eine langsam erfolgende Schwankung um den Mittelwert von 50 %RH mit maximal ± 15 %RH für zulässig, da für deren Unbedenklichkeit der wissenschaftliche Erweis erbracht ist – wobei der Autor hier einen entsprechenden Literaturbeleg zur Beweisführung vermissen lässt.[111] Zu einer ähnlichen Einschätzung kommt auch ATKINSON, wobei sich der Autor zur Beweisführung maßgeblich auf die Publikation u.a. von ERHARDT bezieht – zu der weiter unten Stellung bezogen wird.[112] Ein weiteres Argument, das zur Legitimation einer Ausdehnung der Spanne von Klimaschwankungen herangezogen wird, begründet sich aus der Empirie. So sind die Objekte trotz nicht immer optimaler klimatischer Bedingungen in der Vergangenheit unversehrt geblieben.[113] Ferner wird angefügt, dass obgleich vorhandener Klimaanlagen in den Museen und Sammlungen eine Klimatisierung in den engen Klimarichtwerten um 55 %RH mit einer Schwankung von ± 5 % herum in der Vergangenheit nur in seltenen Fällen praktisch realisiert werden konnte.[114]
Grundsätzlich ist eine dementsprechend motivierte Diskussion nicht neu. Ergo finden sich bereits bei MICHALSKI solche Hinweise.[115] Über die konservierungswissenschaftlichen Autorenkreise hinaus (!), wurde auch, wie bereits in der Einleitung angesprochen, mit dem Ziel

ASHRAE-Standard

– keine Einhaltung starrer Werte, sondern Kontrolle der Bandbreite von Schwankungen
– Ausgangswerte 50 % r.F., 15–20 °C
– dem alten Standard gleichgestellt jetzt A
– geringere Qualitätsstufen absteigend B, C, und D

Stufe AA

– ± 5 % r.F., ± 2 °C Kurzzeitschwankungen
– keine mit den Jahreszeiten gleitende r.F.
– Temperatur kann um 5 °C steigen oder fallen

Stufe A

– ± 10 % r.F., ± 2 °C Kurzzeitschwankung
– keine mit den Jahreszeiten gleitende r.F.
– Temperatur kann um 5 °C steigen oder um 10 °C fallen oder:
± 5 % r.F., ± 2 °C Kurzzeitschwankung
– mit den Jahreszeiten gleitende r.F. von ± 10 %
– Temperatur kann um 5 °C steigen oder um 10 °C fallen

Stufe B

wie Stufe A, jedoch unbegrenzter Temperaturrückgang im Winter (z.B. saisonale Museen)

Stufe C

– 25–75 % r.F. übers Jahr
– Sommertemperatur nicht über 30 °C

Stufe D

– >75 % r.F. übers Jahr

Tab. 13| Tabellarische Zusammenfassung der Kategorien des ASHRAE-Standard.
Quelle: Kotterer, 2004a, Seite 115

107 Vergleiche: Broström u. a., 2013, Seite 105

108 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 207

109 Michalski, 1993, Seite 628

110 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 115

111 Vergleiche: Bratasz, 2013, Seite 17; vergleiche darüber hinaus: Strojecki u. a., 2014, Seite 225

112 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 209

113 Vergleiche: Bickersteth, 2014, Seite 219; Bratasz, 2013, Seite 16

114 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 107 nach Cassar, 1995, Seite XII; Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 28 f.

115 Vergleiche: Michalski, 1993, Seite 624 ff.

die Kohlenstoffdioxid-Emission bei Museen zu senken, aus der 'Bizot-Gruppe' ein entsprechender Vorstoß zur Lockerung klimatischer Grenzwerte vorgenommen.[116] In einem internen, an die Öffentlichkeit gelangtem Protokoll konkretisiert sich dieses: „[...] a stable relative humidity (RH) is required in the range of 40–60 % and a stable temperature in the range 16–25 °C with fluctuations of no more than ±10 % RH per 24 hours within this range."[117] Dieser Vorstoß hat jüngst zu umfangreichen Diskussionen in der Fachpresse geführt. Der Vorwurf besteht hierbei darin, die Ausstellung und den Leihverkehr vereinfachen zu wollen, sowie wirtschaftliche Bedingungen zu optimieren, um den Handlungsspielraum bei der globalen Ausstellungstätigkeit zu erweitern.[118] Darüber hinaus heißt es am angegebenem Ort jedoch relativierend: „More sensitive objects will require specific and tighter RH control, depending on the materials, condition, and history of the work of art. A conservator's evaluation is essential in establishing the appropriate environmental conditions for works of art requested for loan."[119]

Neben den aufgezeigten Kontroversen über die klimatischen Grenzwerte, wird in der Fachliteratur übereinstimmend davon ausgegangen, dass das Gefahrenpotenzial hauptsächlich von den Klimaschwankungen selbst herrührt – dieses gilt sowohl für die Lagerung, den Transport als auch die Ausstellung.[120] Hier ist eine Abhängigkeit zum zeitlichen Aspekt gegeben.[121] So erörtert SANDNER im Kontext: „Bei Transporten von Kunst zu Ausstellungen […] [muss aus Gründen der Schadenprävention] darauf geachtet werden, daß die relative Luftfeuchte des Ausstellungs- bzw. Archivraumes etwa den Bedingungen am Standort entspricht. Auch die Klimabedingungen des Transportmittels und -weges sind zu beachten und die Verpackung entsprechend zu isolieren und zu klimatisieren. Bei Luftfracht muß [sic] der Frachtraum mit Druckausgleich ausgestattet sein. Weisen Standort und Ausstellungsort sehr divergierende Feuchtigkeitswerte auf, so muß [sic] eine Zwischenlagerung mit langsamer Akklimatisierung vorgesehen werden, die innerhalb eines Monats nicht mehr als 10 % betragen darf. Doch ist dieser Richtwert jeweils am allgemeinen Verhalten eines Gegenstandes zu orientieren und die spezifische Materialempfindlichkeit einzukalkulieren."[122] Nach KOTTERER sind für Leinwandgemälde „[...] Schwankungen von stündlich ± 2,5 %, täglich ± 5 % […] zu tolerieren, wobei] die Änderungsgeschwindigkeit des Raumklimas so gering wie möglich sein [sollte]."[123] Auch

116 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 205; Jeberien, 2014, Seite 45; Ohne Verf. (Verband der Restauratoren), 2014

117 Burmester & Eibl, 2013, Seite 2; vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 206

118 Burmester & Eibl, 2013, Seite 2. Die beiden Autoren erörtern in der durch sie initiierten Petition anhand fundierter Argumente Hintergründe und Motive.

119 Burmester & Eibl, 2013, Seite 2.

120 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 115; Kühn, 2001, Seite 9; Hilbert, 1996, Seite 186; Sandner, 1990, Seite 25; Thomson, 1986, Seite 82; mit Ergänzung von N.H.

121 Vergleiche: Hilbert, 1996, Seite 190; Saunders, 1991, Seite 229; Stolow, 1987, Seite 15 und 222

122 Sandner, 1990, Seite 25

123 Kotterer, 2004a, Seite 115

HILBERT zufolge sind Schwankungen zulässig „[…] solange sie hinreichend langsam erfolgen und damit auch kompakterem Material Zeit lassen, sich anzupassen, d. h. seinen Feuchtegehalt auf die veränderte rF [sic.] einzustellen und eventuelle durch Volumenänderungen verursachte innere Spannungen ohne Schaden zu verkraften."[124] Im Kontext des Gemäldetransportes grenzt sich HILBERT von weiteren Verallgemeinerungen ab: „[d]enn schon kleinere abrupte Änderungen des Luftzustandes können empfindliche Objekte gefährden."[125] Eine entsprechend geeignete Verpackung und eine behutsame Konditionierung an die Klimabedingungen des Transportzieles ist weiter die notwendige Vorraussetzung um mögliche Strapazen für das Objekt zu minimieren.[126] Die hierfür erforderliche Zeit „[…] wird sich nach der Sorptionsgeschwindigkeit und der Beschaffenheit des betreffenden Objektes richten müssen."[127] Vergleichsweise konkret quantifizieren HACKNEY & GREEN den Zeitraum der Akklimatisation mit etwa vierundzwanzig Stunden.[128]

6.2 Stellungnahmen zur Kontroverse über das optimale Klima

Trotz des oben dargelegten Dissensen über die zulässigen Klimaparameter besteht Konsens, dass sich bei der Forderung nach optimalen konservatorischen Bedingungen immer am Objekt selbst orientiert werden muss.[129] Anzuführen ist hier einerseits das allgemein hygroskopische Verhalten der verwendeten Materialien.[130] Andererseits ist auch die Schichtstärke für die Klimasensibilität maßgeblich verantwortlich.[131] Einen weiteren Aspekt stellt der Objektzustand dar. Strukturell beschädigte Materialien reagieren gemäß der Literaturlage schneller, da eine Feuchtigkeitsaufnahme über Risse begünstigt wird.[132] Ein experimenteller Beleg dieser These steht bis dato aus. Erschwerend kommt hinzu, dass in einem Museum in der Regel immer auch Objekte unterschiedlicher Gattungen gezeigt werden. Diese verschiedenen Gattungen erfordern gemäß der oben genannten Ausführungen unterschiedliche Klimatisierungen. Daraus ergibt sich in Bezug auf die Museumsklimatisierung eine erschwerte Vereinbarkeit.

124 Hilbert, 1996, Seite 186

125 Hilbert, 1996, Seite 190

126 Weiter gibt RICHARD einen detaillierten Überblick über die Anforderungen an Transportverpackungen. Der Autor erläutert den Zusammenhang innerhalb und außerhalb der Klimakiste und deren Konsequenz für das Mikroklima des Objektes. Vergleiche: Richard, 1990, Seite 283 ff.

127 Hilbert, 1996, Seite 190; vergleiche: Saunders, 1991 Seite 229; Stolow, 1987, Seite 15 und 222

128 Vergleiche: Hackney & Green, 1991, Seite 72

129 Vergleiche: Atkinson, 2014, Seite 205; Bratasz, 2013, Seite 17; Kotterer, 2004a, Seite 115; Huber & Lerber, 2003, Seite 21; Sandner, 1990, Seite 25; Thomson, 1986, Seite 82;

130 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 115; Hilbert, 1996, Seite 186; Erhardt & Mecklenburg, 1994, Seite 33; Stolow, 1987, Seite 16 [der Autor gibt einen Überblick über die einzelnen Materialien und ihre Anforderung an optimale Klimabedingungen]; Thomson, 1986, Seite 82

131 Vergleiche: Bratasz, 2013, Seite 12

132 Vergleiche: Martens & Schellen, 2013, Seite 373 mit Ergänzung von N.H.

Anzuführen ist hier bspw. die gleichzeitige Präsentation von Gemälden (Optimum ≥40 %RH) und Grafik (Optimum ≤40 %RH).[133] Eine einzelraumspezifische Klimatisierung ist aus Kostengründen oftmals nicht möglich.[134] Gewöhnlich werden daher besonders empfindliche Objekte mit spezifischen Klimaanforderungen in Klimavitrinen ausgestellt.[135] Aufgrund des belegten Dissens scheinen sich in jüngster Zeit objektspezifische, bzw. sammlungsspezifische Richtwerte durchzusetzen, wobei hier die untere Grenze bei 30 %RH liegt und die obere bei maximal 70%RH besteht.[136] Welche Klimaschwankungen die Verantwortlichen dabei zulassen, bzw. an welchen Richtwerten oder Standards sie sich dabei orientieren – hierüber finden sich keine Informationen: individuelle Regelungen werden angenommen. Die Synthesis formulieren EIBL und BURMESTER prägnant: „Specification of absolute values within this range seems to be more a question of belief or of subjective interpretation of real-life observations rather than being founded upon scientifically proven findings".[137]
In einer kritischen Stellungnahme über den Zusammenhang optimaler Klimawerte und deren Wechselwirkungen mit dem Künstlermaterial begründet HERDIN die oben aufgezeigten vorherrschenden divergenten Auffassungen mit der thematischen Komplexität und einer „[...] noch nicht abgeschlossenen Grundlagenforschung."[138] Nach Ansicht des Autors besteht ein zentrales Moment darin, jene Aussagen „[...herauszuarbeiten, die] messtechnisch an Kunstwerken belegt sind, [...] – wenn es solche denn gibt. Diese sind von [den, wie weiter unten belegten werden wird, praktizierten] Hochrechnungen, Annahmen, Vermutungen oder bloßen Erwartungen zu trennen. […] Vorraussetzung für diese nicht immer einfache Aufgabe ist sowohl die kritische Literaturrecherche, als auch die tiefgreifende Hinterfragung der gewählten Parameter für Materialtests (Probematerial, Testaufbau, Umgebungsbedingungen, etc.)."[139] Zugleich mahnt der Autor zur Vorsicht im Umgang mit den Quellen, da diese oft unabhängig ihrer Entstehungszeit und möglicher Einschränkungen als gültige Fakten unreflektiert verbreitet werden.[140] HERDIN kommt zu dem Schluss, dass die Ergebnisse bisheriger Forschung nicht zweifelsfrei belegen können, ob sich bspw. tägliche Schwankungen der relativen Feuchte von 5 % genauso am Materialgefüge äußern wie lediglich 2 %.[141] Weiter stellt der Autor die Frage, wie nun „[...] der Beweis erbracht werden [kann], welche Auswirkungen sich aus der Ausweitung von Klimavorgaben auf Kunstwerke ergeben?"[142] Damit ist der Brückenschlag zur vorliegenden Arbeit gemacht. Überdies ist

133 Vergleiche: Hilbert, 1996, Seite 185

134 Vergleiche: Kotterer, 2004a, Seite 114; Huber & Lerber, 2003, Seite21; Erhardt & Mecklenburg, 1994, Seite 37

135 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 342; Sandner, 1990, Seite 292 ff.

136 Vergleiche: Eibl & Burmester, 2013, Seite 218

137 Eibl & Burmester, 2013, Seite 218

138 Herdin, 2012, Seite 62

139 Herdin, 2012, Seite 65

140 Vergleiche: Herdin, 2012, Seit 64 f.

141 Vergleiche: Herdin, 2012, Seite 65

142 Herdin, 2012, Seite 65

die Forderung von HERDIN nennenswert, wonach er zum Nachweis von Schäden die Entwicklung neuer Untersuchungsverfahren fordert, bzw. die Verbesserung bestehender Methoden anmahnt, um die gängige Praxis der Restauratoren, bestehend aus einer Sichtkontrolle des Objektes mit dem Abgleich eines Fotos, zu objektivieren.[143]
Der Autor der hier vorliegenden Schrift teilt die dargelegten Einschätzungen von HERDIN. Die Heterogenität der oben angefügten Zitate führt zu den bestehenden Unsicherheiten. So ist anhand der Fachliteratur ein Fazit über die zulässigen klimatischen Grenzwerte nicht möglich. Erstaunlich erscheinen in diesem Zusammenhang die Hinweise, dass Erweiterungen vormals bestehender enger Klimagrenzwerte aus der Konservierungswissenschaft selbst heraus vorgenommen wurden. Den Argumenten der 'Bizot-Gruppe' wird hier entschieden widersprochen. Grundsätzlich sind die Bemühungen zum nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen zu begrüßen. Doch sind die Argumente nicht glaubwürdig und stichhaltig. Zumindest steht dieser Vorwurf im Raum, so lange sich bei Museumsneubauten am Maß des Spektakulums der Architektur und weniger an der Zweckmäßigkeit der selben orientiert wird. Zu denken ist an repräsentative Neubauten mit großen Glasfronten, die mit extrem hohen und langfristigen Klimatisierungskosten und Problemen verbunden sind. Dessen ungeachtet wird abermals auf die Notwendigkeit einer Objektivierung der Diskussion hingewiesen. Diese kann nur durch eine zuverlässige Datenlage über das Verhalten des Künstlermaterials in Dependenz zum Umgebungsklima und seiner Schwankung erfolgen.

143 Vergleiche: Herdin, 2012, Seite 65 f.

7. Forschungslage zum Nachweis struktureller Oberflächenveränderungen im Kontext von Transport und Klimaschwankungen

Aus Gründen der Schadensprävention reist bei einem Transport das Klima gemeinsam mit dem transportierten Objekt mit, bzw. Ausgangsort und Zielort des Transportes weisen das gleiche Klima auf.[144] So postuliert LEISHER die Forderung: „The borrower´s responsibility is to ensure that the painting is shipped to the museum or exhibition site and returned to the lender in exactly the same condition as it was when it departed."[145] Zugleich wird hier im Kontext von Klimaschwankungen auf die bereits angesprochene Kritik einer mangelhaften Datenlage zum klimatischen Verhalten von Gemälden hingewiesen. Dieses führt – auch im Transportfall – zu einer gegebenen Unsicherheit einer klimatischen Risikobewertung. Die vorliegenden Arbeit widmet sich hier der Untersuchung nach einem geeigneten bildgebenden Verfahren zum Nachweis möglicher Transportfolgen. So wird untersucht, welche Vorarbeiten hierfür bereits geleistet wurden und ob eine Ableitung relevanter Forschungsergebnisse möglich ist.

Der für die Sondierung der Studien zentrale Aspekt ist die Nachweisführung von transportbedingten strukturellen Veränderungen. In engerer Eingrenzung geht es um klimatischbedingte strukturelle Veränderungen. Ein weiteres Auswahlkriterium ist die Verfahrensanwendung der Streifenprojektion mit dem Anspruch an ein bildgebendes Monitoring – wobei auch eine Ausweitung auf die Betrachtung anderer Untersuchungsmethoden vorgenommen wird. Bei der dargelegten Forschungslage ist das verbindende Element der Untersuchungsgegenstand Gemälde.[146] Die Gliederung des Forschungsstandes erfolgt systematisch nach aufsteigender Relevanz. Beginnend mit der kleinsten Übereinstimmung – also der geringsten Schnittmenge aller Gesichtspunkte – erfolgt die Erörterung von Beiträgen über den Nachweis klimatischbedingter struktureller Veränderungen an Gemälden. Hier sind zu nennen die Arbeiten von DUPONT, MECKENBURG u. a., HEDLEY, ASHLEY-SMITH u. a., PRAST, BREWNER und FORNER sowie HEINEMANN u. a.. Darauf hin werden Forschungsbeiträge von HOPFNER und BÄSCHLIN untersucht, die sich einem anderen Aspekt, nämlich dem Nachweis des mechanischen Schadenspotenzials bei Gemäldetransporten widmen. Der Darlegung der Forschungslage zum bildgebenden Nachweis über strukturelle Veränderungen an Gemälden wird anhand der Studien von MAIRINGER, PATFIELD u. a., GUIDI, HEILIG und EIPPER nachgegangen. In nächster Eingrenzung sind die Arbeiten von SCHAIBLE und ZEHNDER zu nennen, die klimatischbedingte strukturelle Veränderungen untersuchen – jedoch mit einem bildanalytischen Forschungsansatz. Die größte, aber dennoch nicht vollständige Schnittmenge mit

144 Vergleiche: Saunders, 1991, Seite 299

145 Leisher, 1991, Seite 89

146 Die Ausnahme besteht hierbei in den eigenen Vorarbeiten. Hier wurde sich dem Schwerpunkt nach Skulpturen gewidmet.

der Fragestellung der Arbeit besteht in der Forschungsleistung von VASARI, die erstmals ein bildgebendes Transportschadensmonitoring über strukturelle Veränderungen an Gemälden vornehmen – jedoch ohne die Verfahrensanwendung der Streifenprojektion. Seine erstmalige Anwendung im genannten Kontext erfährt das Verfahren durch HEIN und KREKEL. Der Fokus lag hier jedoch auf dem Untersuchungsgegenstand Skulptur.
Grundsätzlich abgegrenzt werden jene Forschungsprojekte, die zwar eine Schnittmenge durch die Verfahrensanwendung der Streifenprojektion aufweisen, dieses jedoch nicht für das Monitoring von Strukturveränderungen einsetzen, sondern es vielmehr für die Kopieerstellung, reine Objektdigitalisierung und nur indirekt zur Dokumentation nutzen. Beispielhaft zu apostrophieren ist hier das aktuell von der Fraunhofer-Gesellschaft geförderte Projekt 'Cultlab3D' einerseits,[147] und ein Gemeinschaftsprojekt der TU Delft und des Druckerherstellers Canon Océ andererseits.[148] Weiterhin unberücksichtigt blieben Forschungsarbeiten, die sich zwar dem Thema Transport zuwenden, aber nicht den Ansatz eines Monitoring verfolgen – bspw.: Verpackung und Transportablauf. Hier ist auf den übersichtgebenden Tagungsband von MECKLENBURG zu verweisen.[149]

7.1 Nachweis struktureller Veränderungen an Gemälden durch Klimaschwankungen

Es lassen sich zahlreiche Publikationen auffinden, die sich der systematischen Untersuchung struktureller Objektveränderungen, hervorgerufen durch Klimaschwankungen, widmen. Zur Erörterung dieser Fragestellung wurden verschiedene Untersuchungsmethoden verwendet und Lösungsansätze verfolgt. In einer Übersicht wird die existierende Fülle der Fachliteratur zum hygroskopischen Verhalten von Gemälden unter der Prämisse der Methodik und hinsichtlich der Relevanz eingegrenzt. Hierbei besteht jedoch aufgrund des Literaturumfanges nicht der Anspruch auf Vollständigkeit.
Frühe Hinweise zur experimentellen Erfassung hygroskopisch bedingter Veränderungen können über die Publikation von DUPONT im Jahr 1967 nachgewiesen werden.[150] Seine Arbeit fand große Resonanz in der Fachliteratur und wurde von anderen Autoren aufgegriffen. Der Autor untersuchte nach optischen Kriterien an Holz- als

147 Vergleiche: Santos, 2015 Ziel des Projektes ist es, die Objekte „[...] industriell, kostengünstig und schnell zu scannen, [...um die] durch Umwelteinflüsse und Katastrophen gefährdeten Kunstwerke [...] im aktuellen Erhaltungszustand [zu sichern] und gleichzeitig für die weltweite Forschung [zu erschließen]." [Santos, 2015] In diesem Kontext steht auch das Konzept hybrider Ausstellungen und die Verwendung hochpräziser 3D-Modelle als Ersatz für Originale. „Diese müssen [dann] künftig weniger auf Reisen gehen. Man vermeidet Schäden und Abnutzung [...]." Sentker, 2015

148 Ziel der Forscher und Ingenieure ist die Digitalisierung von Gemälden Rembrandts und van Goghs auf Basis der Streifenprojektion. Von diesen Datensätzen ausgehend steht die folgende Herstellung farbiger, hochpräziser reliefierter Gemäldekopien im Zentrum der Bemühung, um damit Gemälde in ihrem ursprünglichen Aussehen zu rekonstruieren. Vergleiche: Wollny, 2014

149 Vergleiche: Mecklenburg, 1991, Seite 3 ff.

150 Vergleiche: Dupont, 1967, Seite 76 ff.

auch an Textilproben die Verformungen und Längenänderungen bei Schwankungen der relativen Feuchte über einen Zeitraum von sechs Wochen.
Als Untersuchungsgegenstand wurden sowohl ungefasste, als auch einseitig und beidseitig gefasste Eichenholztafeln sowie Textilstreifen verwendet. Bei den Holzproben berücksichtigte der Autor holzanatomische Gegebenheiten, bzw. die Sägerichtung im Verhältnis zum Stammverlauf. Die Nachweisführung erfolgte über das Ablesen von Markierungen im Millimeterbereich. Die Reaktion der Proben auf die veränderte relative Feuchte – die Messergebnisse – dokumentierte er über Graphen.
Messtechnisch konnte er belegen, dass die Bretter mit stehenden Jahrringen nur geringfügig auf Klimaschwankungen reagierten, wohingegen die Reaktion bei Tangential-Brettern sehr viel ausgeprägter war. Weiter konnte bei vorhandener Farbfassung der Schichtseite ein maßgeblicher Einfluss zugeschrieben werden. Damit konnte der Autor frühere Ergebnisse zur konkaven oder konvexen Verformung gefasster Holztafeln bestätigen. Zudem belegte DUPONT die gegenteilige Richtungsänderung der untersuchten Holzproben in Abhängigkeit zur wechselnden relativen Feuchte. Gleichermaßen konnte er dieses für Textilproben nachweisen.
Dem Grundsatz nach verwehrt die Publikation jedoch tiefergehende wissenschaftliche Erkenntnisse, da eine dezidierte Darlegung des Versuchsaufbaus und -durchführung sowie der Messergebnisse ausbleibt. Daher sind keine Rückschlüsse zu strukturellen Veränderungen in Abhängigkeit zur Klimaschwankung möglich.

Aus rechtlichen Gründen keine Abbildung

Abb. 8| Charles Tumosa and Marion Mecklenburg.
Quelle: Dougherty, 1991

Weiterhin ist die Arbeit der Forscher um MECKLENBURG u. a. zu nennen (►Abb. 8|). Entsprechende Publikationen sind gehäuft zitiert und haben zu einem großen Echo in der Fachwelt geführt.[151] Zudem sind die Ergebnisse oftmals interpretiert worden, um klimatische Empfehlungen für den Transport, die Lagerung und die Präsentation von Gemälden zu formulieren. Bemerkenswert dabei: die Vorarbeiten der Forscher gehen bereits auf das Jahr 1975 zurück.[152]
Im Rahmen einer computergestützten Simulation erforschten und berechneten sie die Auswirkung definierter Klimata hinsichtlich der sich am Material äußernden Dimensionsveränderung.[153] Hierbei kam die Finite-Elemente-Methode zur Anwendung, mit der sich idealisierte Modelle berechnen ließen und Prognosen über die zu erwartende Veränderung getroffen werden konnten.[154] Die näherungsweise Berechnung erfolgte anhand mehrerer partieller Differentialgleichungen, die wiederum die Kraftvektoren der Belastung charakterisierten (►Abb. 9|).

151 Ein entsprechender Beleg ergibt sich aus dem weiteren Verlauf des hiesigen Kapitels durch die Referenzierung anderer Autoren auf die Arbeit von MECKLENBURG.

152 Vergleiche: Colville u. a., 1982, Seite 146

153 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 173 ff.; Mecklenburg u. a., 1994, Seite 464; Colville u. a., 1982, Seite 146 ff.

154 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 183 ff.; Colville u. a., 1982, Seite 146 ff.

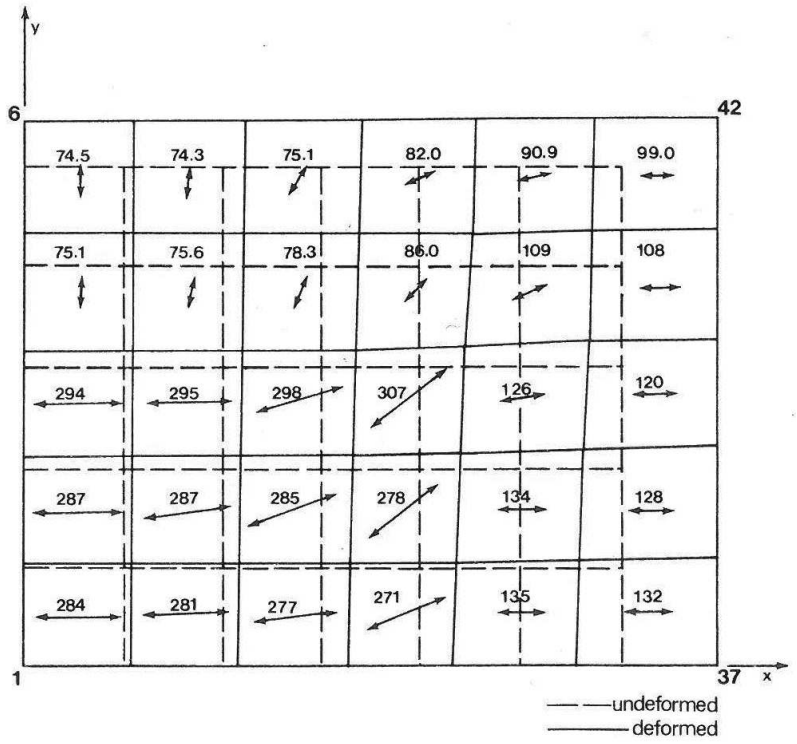


Abb. 9| Anwendung der Finite-Elemente-Methode bei der Modellbildung zum Veränderungsverhalten von Gemälden – Grafik mit eingezeichneten Kraftvektoren.
Quelle: Colville u. a., 1982, Seite 148

Gemäß der bei COLVILLE u. a. beschriebenen Vorgehensweise widmete sich die Forschung einer idealisierten Modellbildung. Aus Gründen der Komplexität wurde hierzu ein simplifizierter maltechnischer Schichtenaufbau angenommen. Hierbei kennzeichnete sich jede Bildschicht ausschließlich durch zweidimensionale Raumeigenschaften. Aufgrund individueller Materialeigenschaften wurde das Verhalten einzelner Schichten zunächst selektiv berechnet. Im Anschluss wurden dann deren Einzelergebnisse zu einer vollständigen Modellbildung komplettiert.[155]

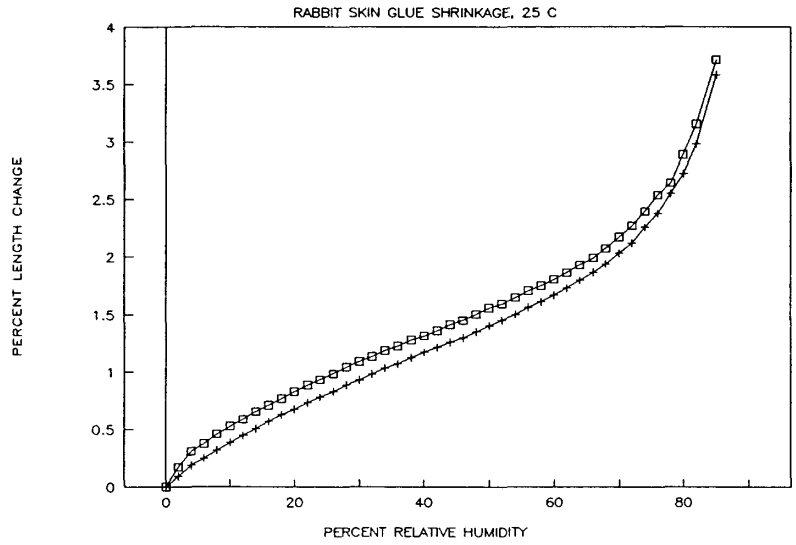


Abb. 10| „Percent length change of two samples of rabbit skin glue versus percent relative humidity during desiccation. Glue's dimensional response to relative humidity is greater than any of the other artists' materials". [Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 197]
Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 197

Eine Grundvoraussetzung bestand darin, genaue Kenntnisse über das individuelle Materialverhalten des Schichtengefüges bei Klimaschwankungen zu haben. Daher kategorisierten die Forscher in umfangreichen Laborstudien das Künstlermaterial gemäß des

155 Vergleiche: Colville u. a., 1982, Seite 147

Schichtenaufbaus in die Stoffgruppen Öl- und Acrylfarbe, Hasenleim und Kreide sowie Textil und letztlich Holz. Aus Gründen der Verifizier- und Vergleichbarkeit fertigten die Autoren von diesen Materialien Standardproben an und untersuchten deren klimatisches Verhalten.[156] Methodisch erfolgte die Detektion über miniaturisierte Zug-Test-Maschinen (►Abb. 10|). Die Konditionierung der Proben wurde in Klimakammern mittels Silikagel vorgenommen.[157] Auf diese Weise erstellten die Autoren eine umfangreiche Datensammlung über das Materialverhalten (►Abb. 11|).

In einer frühen Publikation von COLVILLE u. a. konnte zunächst die generelle Machbarkeit bewiesen werden. Hierzu berechneten die Autoren unter simulierter, wechselnder relativen Feuchte das Verhalten eines unbeschädigten Testgemäldes, bestehend aus einem industriell vorgrundierten, textilen Bildträger. Die klimatische Konditionierung erfolgte in den Etappen 90-50-20 %RH.[158]

Die Simulation erbrachte den Nachweis auftretender Spannungen zwischen den Schichten. Im Bereich der Ecken der Keilrahmenschenkel ergab die Modellberechnung Spannungen, welche die Elastizitätsgrenze des Materials übertrafen und daher den Rückschluss einer Rissentstehung ermöglichten (►Abb. 12|).[159] Bei Originalen ist dieses Phänomen als Ehrensprung bekannt (►Kapitel 9|, Tab. 15|).

Aus rechtlichen Gründen keine Abbildung

Abb. 11| Laborfoto zu denTestmaterialien am Smithsonian Institut.
Quelle: Herdin, 2012, Seite 62

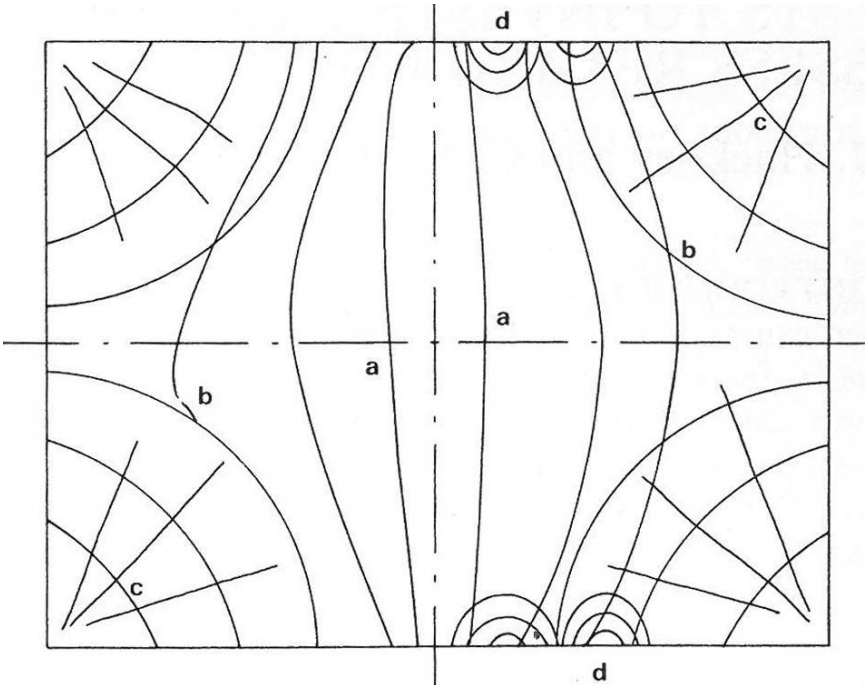


Abb. 12| Grafik zum Nachweis auftretender Spannungen bei Gemälden. Der Modellberechnung nach kam es durch klimatische Belastung und die Überschreitung der Elastizitätsgrenze zum oben gezeigten Rissmuster. Dieses deckt sich der Empirie nach mit dem beobachteten Rissmuster an Originalen.
Quelle: Colville u. a., 1982, Seite 150

In später folgenden Publikationen wird neben der Berechnung des Verhaltens von Holztafeln auch eine Modellerstellung über das Verhalten vorgeschädigter und künstlich gealterter Materialgefüge vorgenommen. Hier ergab die Modellberechnung wichtige Erkenntnisse über die Schadenentstehung. So konnte bei einem simulierten Leinwandgemälde der methodische Nachweis erbracht werden, dass im

156 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991b, Seite 139
157 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991b, Seite 139 f.
158 Vergleiche: Colville u. a., 1982, Seite 146 ff.
159 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 189

Randbereich vorhandener Risse durch die Trocknung um 20 %RH (von 70 % auf 50 %RH und wiederum auch von 50 % auf 30 %RH) die Elastizitätsgrenze überschritten wurde und Bildschichten abblättern können (►Abb. 13| und Abb. 14|).[160] Inwiefern eine Trocknung kleiner des bezifferten Wertes ebenfalls zu möglichen Schäden führt oder wie es sich bei einer Befeuchtung verhält, wurde nicht publiziert.

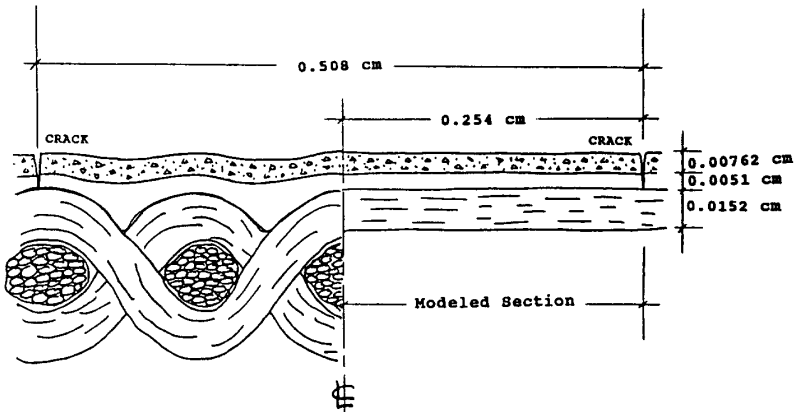


Abb. 13| „Detail section view of a painting from crack to crack, illustrating the difference between the actual structure and the computer model of the same structure". [Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 210]
Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 210

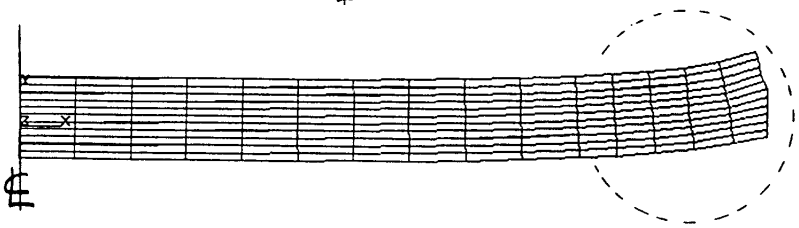


Abb. 14| „The computer calculated distortion of "cupping" for a numerical model of a typical canvas supported oil painting with existing cracks as illustrated in [...the figure before]. The model section was numerically desiccated from 70% to 10% RH at 23°C. The left-hand edge of the model is the center of the painting section detail and the right-hand edge is the crack location.". [Mecklenburg & Tumosa, 1991b, Seite 211]
Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 211

Die Finite-Elemente-Methode konnte erfolgreich zur Modellbildung genutzt werden. In diesem Zusammenhang steht auch die theoretische Nachweisführung, dass es aufgrund materialspezifischer Ausdehnungs- und Schrumpfungskoeffizienten zwischen den Schichten zu Spannungen kommen muss. Dem Grundsatz nach ist die von den Forschern vorgenommene Eingrenzung der untersuchten Stoffgruppen legitim, doch kann und wird die selektive Untersuchung und folgend simulierte Kombination der Eigenschaften einzelner Schichten, dem komplexen Aufbau realer Gemälde nicht gerecht. So ist kritisch zu bewerten, dass die Ergebnisse der Modellbildung nicht an einem originalen Gemälde verifiziert wurden. In ihrer Publikation merken die Autoren diesen einschränkenden Faktor bereits selbst an.[161] Ungeachtet der damaligen technischen Möglichkeiten besteht ein weiterer limitierender Aspekt in der rein zweidimensionalen Betrachtung des Bildschichtengefüges. Hierzu zählt auch die Annahme gleichbleibend

160 Da diesem Ergebnis eine entscheidende Bedeutung beigemessen wird, erfolgt zum Beleg und Ausschluss von Übersetzungsfehlern die Zitation des original Textes: „Paintings with existing cracks appear to be the governing case regarding restricting the allowable fluctuation in relative humidity. Computer modeling of a section of a painting containing preexisting cracks revealed intense stress concentrations in the crack tip region. With changes in relative humidity from 70% to 50% at 23¨C, the resulting stresses in the paint-glue interface easily exceeded the paint's ultimate strength. This would be also true of drops from 50% to 30% RH. This analysis suggests that for paintings with an active glue layer (recently exposed to high relative humidity), 20% depressions in relative humidity can conceivably initiate active flaking of the paint layer. The analysis also suggests that the region of stress concentration is so localized and confined to the area of the crack [...]." Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 189; vergleiche: Seite 210 f.

161 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 182

dicker, eindeutig voneinander abgegrenzter Schichten.[162] Malschichten liegen durchaus auch gemischt vor und sind nicht zwangsläufig scharf voneinander zu trennen. Gleichwohl ist diese Annahme eine Grundvorraussetzung für die mathematische Berechnung. Gemäß des Emergenz-Prinzips mindern die aufgeführten Vorbehalte die Übertragung der Erkenntnisse aus der Modellbildung auf das Original und damit einen Wirklichkeitsanspruch.[163] Eine weitere Kritik besteht hinsichtlich der Datenlage. In der 1991 herausgebrachten Publikation wird sich ausdrücklich der Beschreibung des Probematerials und seiner Herstellung gewidmet. Jedoch werden darin weder Angaben zu deren Zusammensetzung noch deren Herkunft gemacht.[164] Nicht zuletzt mit dem Anspruch auf eine Verifizierbarkeit und einem möglichen Vergleich der Ergebnisse wären Detailangaben und Metadaten aus wissenschaftlicher Sicht relevant.[165] Weiter muss auf die eingeschränkte Nachvollziehbarkeit der Daten hingewiesen werden. So finden sich in den untersuchten Publikationen von MECKLENBURG u. a. für den generellen Thesenbeleg nur eine Auswahl an Tabellen über das klimatische Verhalten der Probematerialien, auf denen letztlich die Modellberechnungen beruhen.[166] So ist auch der bei COLVILLE u. a. erbrachte Literaturbeleg, der zum Herkunftsnachweis am angegebenem Ort mit „[...] unpublished test results [...]"[167] aufgeführt wird, aus wissenschaftlicher Sicht als unzureichend zu werten.
Insbesondere im Kontext der oben dargelegten Erörterung über die idealen Klimabedingungen wäre ferner ein systematisch untersuchtes Reaktionsverhalten der Proben um 50 %RH und eine Veröffentlichung dieser Ergebnisse von übergeordnetem Interesse. Wie von den Autoren selbst angegeben, hatte dieser Wert bereits damals schon den Stellenwert eines Standards, den es, aufgrund bestehender Unstimmigkeiten in der Fachwelt, zu überprüfen galt.[168] In Bezug auf die Benennung zulässiger Grenzwerte für Gemälde ergeben sich in den frühen Publikationen keine konkreten und validen Hinweise – außer die oben genannten, die über den Extremwerten von 30 %RH und 70 %RH Schäden erwarten lassen. Darüber hinaus ist die bereits oben erwähnte mathematische Modellbildung über das Verhalten eines vorgeschädigten Malschichtaufbaus auf textilem Bildträger und das Ergebnis bedeutsam, dass eine gesteigerte Klimasensibilität vorliegt.

162 Vergleiche: Colville u. a., 1982, Seite 148

163 Vergleiche: Herdin, 2012, Seite 63; Lipinski, 2010, Seite 32 ff. und Seite 88. So merken bereits ASHLEY-SMITH u. a. an:„Theoretical knowledge of the relationship between the environment and dimensional change in organic object has not been matched by an understanding of how real objects react in actual display conditions." Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 28. Vergleiche zur Übertragung naturwissenschaftlich-theoretischer Erkenntnisse zum Materialverhalten auf die Praxis: Wiese, 2010, Seite 273 ff. und Wangermann, 1984, Seite 49 in Wiese, 2010, 2010, Seite 273

164 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991b, Seite 139

165 Zugleich wird eingeräumt, dass dieses durch das damaligen Wissenschaftsverständnis vertretbar ist.

166 Damit sind die Publikationen bis 1994 gemeint. Trotz bestehender Unvollständigkeit finden sich Hinweise zum Materialverhalten bei Klimaschwankungen im exemplarischen Tabellen- und Grafikteil. Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 191 ff.

167 Colville u. a., 1982, Seite 150

168 Vergleiche: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 173

So stellt sich die Frage, ob 30 %RH als Untergrenze und 70 %RH als Obergrenze klimatische Empfehlungen zu verstehen sind.

Des Weiteren wird auf eine Fortführung der Forschungstätigkeit der Wissenschaftler um MECKLENBURG aus dem Jahr 1994 verwiesen. Es handelt sich um eine Konkretisierung der Modellbildung zum Verhalten der Holztafelgemälde bei Klimaschwankungen.[169] Dem oben beschriebenem Muster folgend erhoben sie Spannweiten zulässiger Klimaschwankungen für die getesteten Materialien und eruierten die Grenzbereiche, ab denen ihrer Berechnung nach bleibende plastische Verformungen bzw. Schäden auftreten.

Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassen:
- Maximal zulässige Klimaschwankungen für verspanntes Pappelholz: 35 % - 60 %RH[170]
- Maximal zulässige Klimaschwankungen für Kreidegrund: 26 % - 76 %RH[171]
- Maximal zulässige Klimaschwankungen für Ölfarbe (Bleiweiß in Distelöl): 20 % - 90 %RH[172]

Die angegebenen Werte beziehen sich auf den Ausgangspunkt von 50 %RH.[173] Der limitierende Faktor ergibt sich, gemäß der obigen Werte, aus der Klimasensibilität des Pappelholzes. Für Holztafelgemälde besteht der Modellberechnung nach die untere Grenze bei 35 %RH und die obere Grenze bei 60 %RH. Der Bereich möglicher Schwankungen der relativen Feuchte, bei dem keine Schäden zu erwarten sind, ergibt daher eine Spannweite von Δ25 %RH. Ein weiteres Defizit ist, dass die Autoren keine Angaben über zeitliche Aspekte anführen. Werden die jüngsten Ergebnisse mit den früheren Publikationen verglichen, so zeigen sich Unstimmigkeiten hinsichtlich der Spannweite zulässiger Klimaschwankungen. Während in früheren Publikationen für vorgeschädigte Materialgefüge auf textilem Träger die Spannweite zulässiger Klimaschwankungen mit Δ20 %RH angegeben wurde, so beträgt diese, der jüngsten Ergebnisse entsprechend, für Holztafelgemälde Δ25 %RH. Dem Erfahrungswissen nach werden Holztafelgemälde im Vergleich zu Gemälden auf textilem Bildträger gemeinhin als weitaus empfindlicher eingeschätzt, sodass die zulässige Spannweite für Holztafelgemälde geringer ausfallen müsste. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf historische Holztafelgemälde ist nicht möglich, da die Modellbildung an dieser Stelle das Verhalten vorgeschädigter Objekte nicht berücksichtigt. Denkbar

169 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 464 ff.

170 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 470. Die Berücksichtigung möglicher Verspannungen ist bei der Berechnung der Grenzwerte relevant und bereits inkludiert, da sich hierdurch mögliche Belastungsgrenzen verringert. Zudem entspricht dieses der Realsituation da Holztafeln parkettiert sein können oder zumindest in der Regel eingerahmt sind, wovon Verspannungen herrühren können. Weiter weisen die Autoren darauf hin, dass bei den Bestimmung der plastischen Deformationsgrenzen sich beim Naturstoff Holz umfangreiche Streuungen ergaben. Vergleiche a.a.O. Seite 470

171 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 475

172 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 477

173 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 481 f.. Die vorgenommenen Angaben beziehen sich auf den Temperaturbereich von 22 °C. Vergleiche a.a.O. Seite 467

wären in diesem Kontext zusätzliche Limitierungen der Spannweite zulässiger Klimaschwankungen. Außerdem wird im Fazit der Publikation von 1994, über die Modellbildung zum Verhalten von Holztafelgemälden hinaus, eine weitere signifikante Eingrenzung der oben genannten Spannweite vorgenommen. Die Autoren bezeichnen diese als den Bereich der strukturellen Stabilität (45 % und 55 %RH), in dem das hygroskopische Materialverhalten am geringsten ausfällt.[174] Abgrenzungskriterien zur Definition der Grenzwerte über die strukturelle Stabilität werden nicht dargelegt, auch eine Herleitung anhand von Messergebnissen bleibt aus.
Mit der oben vorgebrachten Kritik an der Arbeit der Forscher um MECKLENBURG soll diese nicht grundsätzlich in Frage gestellt werden. Vielmehr soll auf Schwachpunkte und verfahrensspezifische Besonderheiten hingewiesen werden, um die Relevanz für die Konservierungswissenschaft besser einschätzen zu können. Allen voran ist damit die Modellbildung gemeint. So scheinen entsprechende Ableitungen klimatischer Richtwerte für Originale in diesem Kontext fragwürdig zu sein – wie dies, bereits oben dargelegt, auch schon von anderen Autoren bemängelt wurde. Darüber hinaus konnte belegt werden, dass die Angaben der Autoren zu den klimatischen Spannweiten schwanken und grundsätzlich in Abhängigkeit zum Veröffentlichungszeitpunkt zu sehen sind.

Im Kontext der Erforschung von Klimaschwankungen untersuchte HEDLEY im Jahr 1988 das durch Schwankungen der relativen Feuchte verursachte Spannungsverhalten textiler Gemäldefragmente.[175] HEDLEY griff bei seinen Laborexperimenten auf historische Proben zurück, die er in die Zeit zwischen 1825 und 1912 datierte. Vereinzelt waren die Proben mit einer Wachsimprägnierung versehen oder wiesen eine Leim-Kleisterdoublierung auf.[176] Die Versuche von HEDLEY beschränkten sich auf die messtechnische Nachweisführung der Reaktionen des Probenmaterials in axialer Richtung. Dazu unternahm er Zugspannungstests und erforschte die Längenänderung freihängender Proben. Für die erstgenannten Versuche erstellte der Autor Proben mit den Abmessungen von 15 x 2,5 cm.[177] Diese wurden in Intervallen von 24 Stunden in den Schritten 15-90-15 %RH, bei 21 °C konditioniert.[178] Die Zugversuche erfolgten maschinell, wobei die durch die Klimaänderung verursachten Kräfte gemessen wurden. Die Proben zur Ermittlung der Längenänderung wiesen wiederum die Abmessungen 10 x 2,5 cm auf.[179] Sie wurden in jeweils 12 Stunden auf 30-80-30 %RH, bei 21 °C konditioniert.[180] Die Erfassung

174 Vergleiche: Mecklenburg u. a., 1994, Seite 482

175 Dem Grundprinzip nach greift der Autor dabei die frühe Arbeit von DUPONT auf. Vergleiche: Dupont, 1967, Seite 76 ff.

176 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 133

177 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 134

178 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 135 f.

179 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 134

180 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 135 f.

der Längenänderung erfolgte mechanisch über einen Zeiger.
Als Ergebnis kann der Autor ein prinzipielles Verhaltensmuster des historischen Probematerials vorweisen. Dieses bezieht sich auf plastische Längenänderung und die auftretenden Kräfte bei Klimaschwankungen.[181] So konnte unterhalb von 80 %RH bei Desorption der Proben unter Zugbelastung eine Straffung nachgewiesen werden, wohingegen sie bei Sorption erschlafften. Oberhalb von 80 %RH war das Verhalten der Proben entgegengesetzt.[182] Ferner gelang HEDLEY der messtechnische Beleg, dass sich ein mit Wachs imprägniertes Materialgefüge vergleichsweise unsensibel gegen Klimaschwankungen verhält.[183]
Die Forschungsarbeit des zitierten Autors stellt eine wichtige Grundlage zum Verständnis über das Verhalten historischer Gemäldefragmente dar. In Abkehr zur oben geschilderten Modellbildung gelang dem Forscher damit ein größerer Realitätsbezug – der Autor bezieht sich ausdrücklich auf die Forschung von MECKLENBURG.[184] Unter Vorbehalt lassen sich die Ergebnisse auch auf originale Leinwandgemälde übertragen, wobei darauf hinzuweisen ist, dass eine Berücksichtigung biaxialer Gesichtspunkte ausbleibt.
Die Arbeit von HEDLEY findet ihre Aktualisierung in Laborexperimenten von LIPINSKI. LIPINSKI untersucht, ebenfalls mittels einer Zugtest-Maschine, das Verhalten einer Vielzahl von Textilproben unter biaxialer Dehnung und klimatischer Belastung. Seine Untersuchungen eröffneten auf diesem Gebiet ein weiter bestehendes umfangreiches Forschungspotenzial, welches sich aus der Vielzahl unterschiedlicher, bisher nicht geklärter Aspekte ergibt.[185]
Für den Kontext der vorliegenden Arbeit und die kritische Bewertung klimatischer Richtwerte wären Informationen über strukturelle Veränderungen der Malschichtoberfläche in Abhängigkeit zu den Belastungszyklen interessant. Außerdem verwehrt die Arbeit von HEDLEY Rückschlüsse über das Verhalten originaler Gemälde, da biaxiale Gesichtspunkte wie sie durch LIPINSKI untersucht wurden, unberücksichtigt bleiben.

In weiterführender Konkretisierung zum Einfluss des Klimas auf Kunstwerke wird auf das Projekt 'The Wooden Artifact Rheology Project (WARP)' am 'Victoria and Albert Museum' (1994) verwiesen. In diesem wurde dem Nachweis hygroskopischer Veränderungen an Modellen von Ikonen im Ausstellungsbetrieb nachgegangen.[186] Hierzu fertigten die Forscher um ASHLEY-SMITH u. a. nach konstitutiven Bedingungen die Kopie einer Ikone an. Der Untersuchungsgegenstand bestand aus zwei, mittels Proteinleim verklebten Kiefernholzbrettern. Diese waren mit einem Intelaggio aus Leinwand überzogen,

181 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 146

182 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 146

183 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 146

184 Vergleiche: Hedley, 1988, Seite 133

185 Vergleiche: Lipinski, 2010, Seite 89

186 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 30 f.; Umney & Ford, 1993

grundiert sowie partiell vergoldet. Als Farbfassung wurde gemäß des historischen Vorbildes Eitempera verwendet. Das so gefertigte Modell der Ikone wies die Abmessung von 875 x 568 x 27 mm auf. Gemäß des historischen Vorbilds wurde rückseitig ein Eichenholzparkett angebracht.[187] Die Detektion möglicher Dimensionsänderungen erfolgte über mechanisch arbeitende Sensoren. Diese wiesen ihre Empfindlichkeit über eine Spannweite von ± 5 mm, bei einer Abtastrate von 0,025 mm und einer Reproduzierbarkeit von ± 0,015 mm auf. Darüber hinaus erfolgte die Erfassung von Temperatur und relativer Feuchte. Weiter sah der Versuchsaufbau vor das Objekt samt Sensorik in einer vorderseitig verglasten Holzkiste zu positionieren. Damit konnte der Präsentation historischer Ikonen in einer Ausstellung entsprochen und zugleich eine messtechnische Dokumentation durchgeführt werden.[188]
Mit Hilfe der wegmessenden Sensoren konnten die Autoren die klimatischbedingte Dimensionsänderung der Ikone in tangentialer Richtung mit 0,06mm quantifizieren.[189] Dem lag eine Trocknung um 8 %RH über den Zeitraum von 10 Tagen zugrunde. Die Autoren geben an, dass die Tagesfluktuation der relativen Feuchte während der Ausstellung sich nicht direkt in einer Dimensionsänderung äußert. Dementsprechend plädieren sie im Fazit für eine Lockerung enger Klimavorgaben.[190] Zugleich belegten jedoch Ergebnisse eines außen an der Klimavitrine des Ikonennachbaus angebrachten Vergleichssensors, im Verhältnis zu einem weiteren Sensor in der Raummitte der Ausstellung, signifikante Klimaschwankungen. Die detektierten Schwankungen begründeten die Autoren mit der Verortung des Testaufbaus in Nähe eines Ventilatorschachtes.[191]
Aus eigener Sicht wird den Ergebnissen aufgrund von Mängeln beim Versuchsaufbau und den zuletzt angeführten Besonderheiten mit Vorbehalt begegnet. So wäre zu erwarten gewesen, dass Messungen mit bekanntem Fehlerpotenzial (Vergleichssensor in Luftschachtnähe), wiederholt werden, bzw. die fehlerbehaftete Ergebnisse für ein Fazit ausgeschlossen werden. Diese Haltung erfährt ihre indirekte Bestätigung durch die Arbeit von PRAST, der drei Jahre später im Rahmen eines Monitoring zu einem anderen Ergebnis als die Forscher um ASHLEY-SMITH u. a. kommt.

PRAST unternimmt mechanische Distanz- und Kräftemessungen, um Aufschlüsse über das Bewegungsverhalten eines spätmittelalterlichen Holztafelgemäldes von Conrad Laib zu erhalten. Gleichwohl handelt es sich hierbei, in Abgrenzung zur oben genannten Forschung, um Untersuchungen an einem über fünfhundert Jahre alten, vorgeschädigten Original. Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass bei Klimaschwankungen von 55 %RH auf 65 %RH die Verformung

187 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 30

188 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 31

189 Eine aufschlussreichere Angabe in Prozent wird in der Publikation nicht gegeben.

190 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 31

191 Vergleiche: Ashley-Smith u. a., 1994, Seite 31

der Holztafel im Randbereich ca. 4 – 5 mm beträgt.[192] Da sich in der Publikation keine Angaben zur Objektgröße finden lassen, sind Rückschlüsse über die Relation der Verformung zunächst nicht möglich. Lediglich über einer Abbildung kann die Tafel als etwa mannshoch geschätzt werden.
In Anbetracht der quantifizierten Deformationsextremata im Randbereich wird die Verformung daher als vergleichsweise gravierend bewertet. Trotz der Berücksichtigung von Unterschieden bezüglich Objektgröße, Objektzustand sowie maltechnische Besonderheiten verwundert eine Gegenüberstellung der Messergebnisse von PRAST und ASHLEY-SMITH u. a.. Während PRAST gravierende Dimensionsänderungen bei Klimaschwankungen von 8 %RH feststellt, kommen ASHLEY-SMITH u. a. zu dem Schluss, dass Schwankungen im Bereich 10 %RH als unbedenklich einzustufen sind. Dies wirft die Frage nach dem Einfluss des Objektzustands und seines -alters auf die Empfindlichkeit gegenüber Klimaschwankungen auf.

Eine weitere Methode zum Monitoring klimatisch bedingter Veränderungen stellen BREWER und FORNO im Jahr 1997 vor.[193] Die Forschung bezieht sich hierbei auf die Anwendung und Erprobung einer Inspektionstechnik zur Strukturanalyse auf Basis von Moiré-Streifen, wie sie bereits bei BERTANI u. a. publiziert wurde.[194] Untersuchungsgegenstand waren Holztafeln. Bei der vorgestellten Technik handelt es sich nicht um ein Realbild liefernde Inspektionstechnik, sondern um ein Monitoring, abzielend auf die Visualisierung von Verspannungszuständen in Form einer 'Pseudo-Bildgebung'. Diese werden als Moiré-Muster dargestellt.[195] Die Forscher konditionierten in einer Klimakammer Holztafelprobekörper mit und ohne rückseitiger Parkettierung über gesättigte Salzlösungen. In der Laborumgebung sollten daraufhin eintretende Dimensionsänderungen und Wölbungen detektiert werden.[196] Hierbei erstellten sie sowohl Langzeitmessungen über dreihundert Stunden, als auch Kurzzeitmessungen im Abstand von fünfzehn Minuten über einen Zeitraum von sechs Stunden. Besonderes Augenmerk galt hierbei der Untersuchung des Einflusses rückseitig aufgebrachter Parkettleisten.[197] Hier konnten die Forscher Spannungen zwischen den fixierten Brettern visualisieren.[198] Im Kontext der schädigenden Wirkung von Schwankungen der relativen Feuchte ergaben die Kurzzeittests, dass ausgehend von 30 %RH und der Befeuchtung auf 80 %RH bereits nach fünf Minuten Objektverspannungen nachgewiesen werden konnten.[199] Folgerichtig kommen die Autoren zu dem Schluss, dass zum Schutz der

192 Vergleiche: Prast, 1997, Seite 163 und 167

193 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 211 ff.

194 Vergleiche: Bertani u. a., 1995, Seite 1 ff.

195 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 213 ff.

196 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 227 und 215 f.

197 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 211 ff.

198 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 227

199 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 216 f.

Objekte Klimaschwankungen – auch im Bereich weniger Minuten – zu vermeiden sind.[200]
Bei dem eingesetzten Untersuchungsverfahren besteht die Einschränkung, dass trotz der optischen Funktionsweise, die Anbringung eines feinen Punktemusters auf der Objektoberfläche erforderlich ist.[201] Damit ist es nur bedingt berührungslos und nicht an Originalen anzuwenden.
Mit dem Verfahren wiesen die Forscher nach, dass sich die Technik zum grundsätzlichen Nachweis klimatisch induzierter Belastungen eignet, wobei die Bildgebung nur die Objektverspannungen visualisiert. Informationen über die Oberflächenfarbe und -struktur sind nicht gegeben.

In Fortführung der zuletzt genannten Forschungsarbeit ist eine Reihe von Publikationen entstanden. Jüngst ist die Arbeit von HEINEMANN u. a. aus dem Jahr 2014 anzuführen.[202] Hierbei handelt es sich, wie einleitenden erwähnt, um einen Teilbereich des Projektes '3D_art-scan'. Dem Grundsatz nach besteht bis dato die Einschränkung auf Holztafelgemälde. Zum Nachweis verborgener Imperfektionen kommt das Verfahren der digitalen Shearografie zur Anwendung. Zusätzlich wurde eine Verfahrensverbesserung für die Zustandsanalyse von Gemälden untersucht.
Zunächst wurden Experimente an selbst hergestellten Probeköpern durchgeführt. Diese wiesen unter der Oberfläche liegende Imperfektionen (Hohlstellen, Fraßgänge) auf, wobei ihre laterale Verortung und Größe bekannt war.
Detektionsvorraussetzung ist die thermische Belastung (im Bereich von Sekunden) der darauf sensitiv reagierenden Probekörper. Die Detektion von Objektveränderungen erfolgte mittels kohärenter Strahlung und eines durch Interferenzen an der Gemäldeoberfläche erzeugten Specklemusters.[203]
Mit dem Verfahren konnten Imperfektionen unter der Oberfläche nachgewiesen werden. Anzuführen sind hier Hohlstellen bis zu einer Größe von 3 x 3 mm, aber auch Risse in der Grundierung,[204] ebenso Fraßgänge mit einer Breite von 1 mm im Holzbildträger.[205] Darüber hinaus gelang der Nachweis verborgener Strukturschwächen am Original wie bspw. Risse im Bildträger, Deformationen und Kittungen.[206]

200 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 227

201 Vergleiche: Brewer & Forno, 1997, Seite 215

202 Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 51 ff. Der Arbeit liegt eine Diplomarbeit zugrunde, in der neben einem Versuchsteil unter anderem systematisch das Funktionsprinzip und der Stand der Forschung erläutert wird. Vergleiche: Heinemann, 2013, Seite 1 ff. Vergleiche fernerhin: Buchta u. a., 2015a, Seite 1 ff.; Krekel u. a., 2013, Seite 721 ff.; Morawitz u. a., 2013a, Seite 951 ff.; Morawitz u. a., 2013b, Seite 721 ff.

203 Eine detaillierte Erörterung des Funktionsprinzips des Verfahrens findet sich bei HEINEMANN u. a.. Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 47 ff.; Heinemann, 2013, Seite 7 ff.

204 Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 51 ff.

205 Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 53 f.

206 Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 54 ff.

Verfahrenseinschränkungen bestehen grundsätzlich im Millimeterbereich die der Bestimmung von Form, Größe und Lage der detektierten Imperfektionen.[207] Diese sind verfahrensimmanent (Funktionsprinzip Scherung).
HEINEMANN u. a. weisen in ihrer Publikation auf den Vorteil hin, der sich aus der Kombination verschiedener, bildgebender Untersuchungsmethoden ergibt. Hierzu zählen Tageslichtaufnahme, Röntgenbild, Infrarotreflektogramm, 3D-Scan und in Ergänzung das Shearogramm.

In Weiterführung der vorangegangene Arbeit haben BUCHTA u. a. im Jahr 2015 das Verfahren modifiziert, sodass es auch auf die Objektgruppe Gemälde mit textilem Bildträger angewandt werden konnte.[208]
Da es sich um eine Fortführung der Forschung handelt, waren Versuchsaufbau und -durchführung weitestgehend identisch. Jedoch wurden dieselben Probekörper in diesem Fall nun neben thermischen auch anderen Belastungen wie Druck und Feuchteschwankungen ausgesetzt. Außerdem erfuhr die Objektgruppe eine Erweiterung um Gemälde auf textilem Bildträger.
Die Verfahrensmodifikation zur Anwendung an Objekten auf textilem Bildträger war erfolgreich, sodass bspw. bei einer Trocknung um 25 %RH innerhalb weniger Sekunden Topografieverformungen nachgewiesen werden konnten.[209] Weiter gelang der Beleg von Rissen im Bildschichtengefüge, die sogar mit fotografischen Makroaufnahmen kaum oder gar nicht nachzuweisen waren (►Abb. 15|).
Obwohl die Forschung und Verfahrenserprobung noch nicht abgeschlossen ist, wird die digitale Shearografie bereits zu diesem Zeitpunkt als eine vielversprechende Methodik bewertet. Trotz der vorgebrachten Einschränkungen zur Verortung und Ortsauflösung von Imperfektionen skizziert sich bereits jetzt wie aussichtsreich die Kombination, bzw. die Ergänzung zu anderen Untersuchungsmethoden ist. So kann abschließend konstatiert werden, dass sich die digitale Shearografie bereits jetzt als Prognose-Instrument eignet um erstens: Gefährdungsbereiche einzuschätzen; zweitens: Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen lokal anzusetzen und sie im Folgenden zu evaluieren; sowie drittens: um Aussagen zur Ausleih- und Transportfähigkeit vorzunehmen.[210] Einschränkend muss gleichwohl noch einmal betont werden, dass es sich bei der hier vorgestellten Technik nicht direkt um ein bildgebendes Verfahren handelt – detektiert wird immer nur die Reaktion einer Verspannung in Folge einer Belastung.

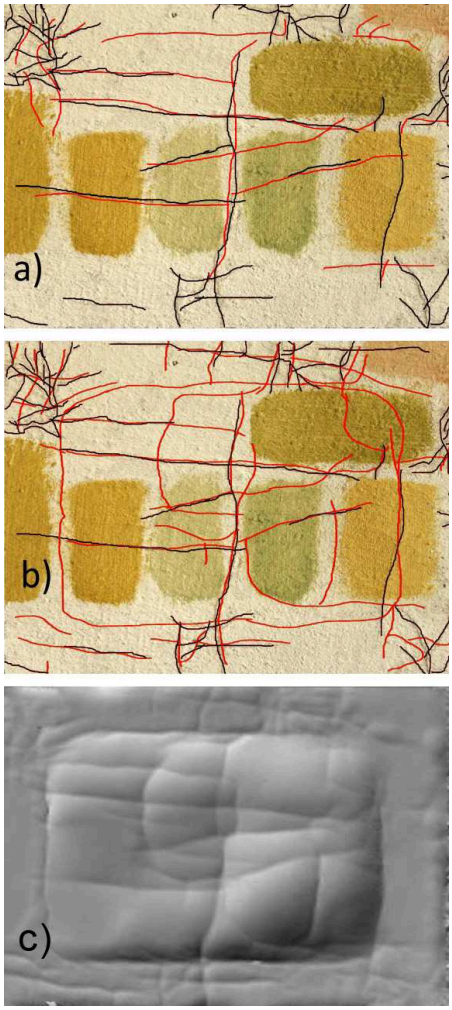


Abb. 15| Vergleich eines Tageslichtbildes mit sichtbaren Rissen (schwarz) und zusätzlich eingezeichnetn Rissen, die aus dem Shearogramm (c)) hervorgehen (rot). Die Belastung wurde durch Veränderungen der relativen Feuchte (a)) und von Druck (b)) erzeugt.
Quelle: Buchta u. a., 2015a, Seite 8 f.

207 Vergleiche: Heinemann u. a., 2014, Seite 51 ff.

208 Vergleiche: Buchta u. a., 2015a, Seite 1 ff.

209 Vergleiche: Buchta u. a., 2015a, Seite 8 f.

210 Vergleiche; Heinemann u. a., 2014, Seite 57; Morawitz u. a., 2013a, Seite 955

7.2 Nachweis des mechanischen Schadenpotenzials bei Gemäldetransporten

HOPFNER beschäftigte sich im Jahr 2011 mit der Verformungsmessung von Holztafelgemälden, bzw. der Detektion von Verspannungen als Folge von Klimaschwankungen und Transport. Sie untersuchte eine im Zuge von Restaurierungsmaßnahmen gedünnte und parkettierte Holztafel von Pietro Perugino aus dem Jahr 1493/95 (►Abb. 16|).[211] Ziel der Untersuchung war einerseits die Detektion der Oberflächenverformung im Millimeterbereich und andererseits die Erfassung von Spannungen der Holztafel im Bereich von 0,1 bis 20 Newton.[212] Die Holztafel wies nach Angabe der Autorin eine Stärke von 4-12 mm auf und reagierte sehr sensibel auf Klimaschwankungen. Neben einer ausgeprägten Oberflächendeformationen offenbarte eine Untersuchung malschichtseitig Risse, dachförmig aufstehende Bereiche sowie vorhandene Delamination, die in Zusammenhang mit einer Parkettierung stehen.[213]

Die Erfassung der Oberflächentopografie erfolgte punktuell durch einen nicht näher spezifizierten Laser, wobei die gezeigten Abbildungen hier allgemein den Rückschluss auf ein Lichtschnittverfahren erlauben (►Abb. 17|).[214] Die aus dem Monitoring gewonnenen Erkenntnisse dienten als Bewertungsgrundlage bei der Konzepterstellung zur Restaurierung. Bestandteil dieser war die Abnahme der starren Parkettierung. Darüber hinaus wurde auf Basis der Erkenntnisse eine neuartige Stützkonstruktion angefertigt: eine Aluminiumplatte mit lokal justierbaren Haftungsbereichen zur Holztafel (►Abb. 18|).[215] Die Detektion der Verspannung des Holzbildtägers wurde über rückseitig an der Holztafel angebrachte Drucksensoren der Firma 'MSR Electronics GmbH' realisiert. Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit wurden zusätzlich Beschleunigungssensoren der selben Firma angebracht, um ein umfassendes Monitoring der Belastung zu gewähren, wie sie im Laufe eines Transportes auftreten können.[216]

Zentrales Ergebnis der Forschungsarbeit ist, dass gemäß der gemessenen Beschleunigungswerte die mechanische Belastung während der Verpackung und Umlagerung von einer horizontalen Lage hin zu einer vertikalen, annähernd so groß ist wie die beim Transport des sachgemäß verpackten Objektes durch einen LKW.[217] So hat sich das Verfahren zum Nachweis mechanischer Belastungen bewährt.

In der genannte Publikation wurde im Rahmen des Transportschadensmonitorings der Aspekt der Klimaschwankungen nicht berücksichtigt bzw. es wurde nicht auf deren Ergebnisse eingegangen,



Abb. 16| Streiflichtaufnahme des Holztafelgemäldes von Pietro Perugino 1493/95
Quelle: Hopfner, 2011, Seite 206



Abb. 17| Digitalisierung der Oberfläche der Holztafel durch ein nicht näher spezifiziertes Lichtschnittverfahren.
Quelle: Hopfner, 2011, Seite 207

211 Vergleiche: Hopfner, 2012, Seite 2 ff.; Hopfner, 2011, Seite 205 f.

212 Vergleiche: Hopfner, 2011, Seite 205

213 Vergleiche: Hopfner, 2011, Seite 205

214 Vergleiche: Hopfner, 2012, Seite 7; Hopfner, 2011, Seite 206 f. mit Ergänzungen von N.H.

215 Vergleiche: Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2014a; Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 10 ff.; Hopfner, 2011, Seite 206 ff.

216 Vergleiche: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 2 ff.

217 Vergleiche: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 15 ff.

obgleich diese Bestandteil der Fragestellung waren. In Anbetracht des historischen und vorgeschädigten Schichtenaufbaus wäre ein dokumentiertes Materialverhalten in Abhängigkeit zu Klimaschwankungen von besonderer Relevanz.

Parallel zur eigenen Arbeit läuft seit 2010 ein Schweizer Forschungsprojekt, dass ebenfalls auf den Aspekt des Monitoring im Kontext des Kunsttransportes rekurriert. Es widmet sich jedoch einer anderen Kernfrage und verfolgt überdies eine divergente Methodik.[218] In Ergänzung und Abgrenzung zur vorliegenden Arbeit wird der Detektion mechanischer Kräfte nachgegangen, wie sie während eines Gemäldetransportes auftreten können. Ausgangspunkt der Arbeit war auch hier die These, dass weltweit eine Zunahme von Kunsttransporten zu verzeichnen ist, welche trotz Umsichtigkeit zu einer Belastung der Objekte führen kann.
Die beteiligten Forscher entwickelten daher eine Methode zum Monitoring der auftretenden Schock- und Vibrationsimmissionen. Ziel war hierbei, die Veränderungsprozesse zu erforschen und eine Risikoeinschätzung vorzunehmen. Davon ausgehend sollten Toleranzwerte abgeleitet werden, bestehende Erkenntnisse überprüft und Empfehlungen für eine Optimierung des Transportes, respektive für die der Gemäldeverpackung formuliert werden.[219] Zudem sollte „[...] die messtechnische Begleitung besonders heikler Gemälde […] auch als Argumentationshilfe bei der Entscheidungsfindung der Verantwortlichen in den Museen [genutzt werden, um zu beurteilen], ob ein Gemälde trotz etwaiger Risiken transportiert werden darf oder nicht."[220] Hierzu sammelten die Forscher systematisch und umfangreich Daten der auftretenden Immissionen. Die Datenerhebung bezieht sich sowohl auf Gemäldetransporte im Rahmen des internationalen Leihverkehrs als auch auf komplexe Laborstudien. Mit beteiligten Ingenieuren und der Privatwirtschaft entwickelten sie hierzu eine eigene Sensorik sowie eine den Transport simulierende Rüttelmaschine (►Abb. 19|). Ein Novum stellte dabei der Einsatz triaxialer Beschleunigungssensoren dar. So konnten alle raumdimensionalen Objektbewegungen und entsprechende Immissionen detektiert werden (►Abb. 20| und Abb. 21|). Die Sensoren waren hierfür bei Originalen am Keilrahmen und bei Testgemälden direkt an der Leinwandrückseite angebracht. Wiederum erfolgte die Detektion des Schwingungsverhaltens von Originalen über eigens entwickelte Datenlogger.[221] Diese wurden rückseitig am Keilrahmen angebracht und protokollierten neben den mechanischen Kräften auch Klimawerte.[222] Da aus konservatorischen Gründen an der Leinwandrückseite von Originalgemälden keine Sensoren angebracht werden konnten, erfolgte die Detektion hier über

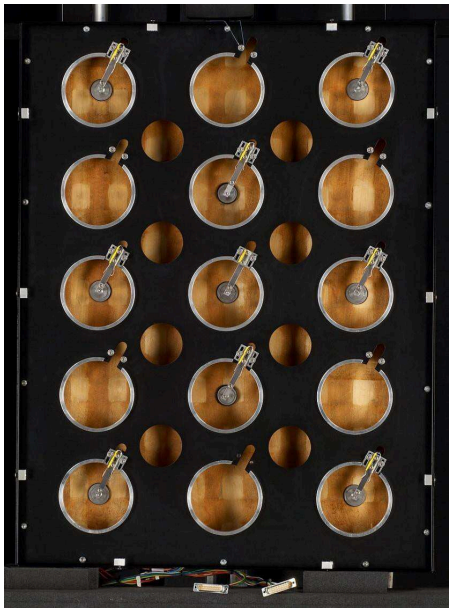


Abb. 18| Rückseite der Holztafel mit der lokal zu justierenden Stützkonstruktion.
Quelle: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 12

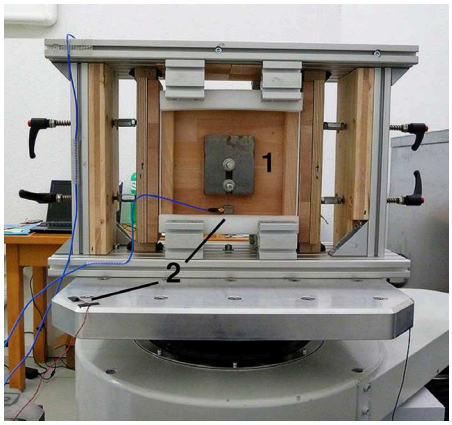


Abb. 19| Rüttelmaschine zur mechanischen Belastung von Testgemälden. 1) Die Masse ist variabel. 2) zeigt die Beschleunigungssensoren.
Quelle: Läuchli u. a., 2014, Seite 3

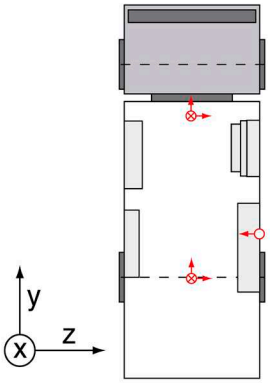


Abb. 20| Angabe der Bewegungsrichtung während des Transportes im Lkw.
Quelle: Läuchli u. a., 2014, Seite 3

218 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 30 f.. Zu dem Projekt existiert eine Website in der die beteiligten Projektpartner benannt werden. Vergleiche: Ohne Verf. (KTI-Projekt Hochschule der Künste Bern), 2011

219 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 1 ff.

220 Palmbach u. a., 2013, Seite 31

221 Vergleiche: Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2014b

222 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 33 f.

optische Sensoren gemäß des Triangulationsprinzips (►Abb. 22|).[223] Zur Diskriminierung des Schwingungsverhaltens, bzw. der Eigenfrequenzen, wurden Messungen mit hoher Messrate an verschiedenen Stellen durchgeführt: am Lkw, an den Transportkisten, dem Verpackungsmaterial und am Objekt. Im Projektverlauf wurden dabei unterschiedliche Verpackungen wie bspw. Einfach-Umhüllungen aus Luftpolsterfolie, aber auch aufwändige Verpackungen wie komplexe Klimakisten getestet.[224]

Die während eines Kunsttransportes gewonnenen Immissionsdaten setzten die Forscher in Beziehung zu den Transportereignissen, also dem Ablauf, der geografischen Position und den entsprechenden Zeitpunkten. Hierdurch waren kausale Rückschlüsse möglich. Grundsätzlich stellte sich die Auswertung der sehr umfangreichen Messdaten als aufwändig heraus.[225] Die Forscher entwickelten hierzu in dem Datenauswertungs- und aufbereitungsprogramm 'MATLAB' entsprechende Skripte.[226] Die Ausgabe der durchschnittlichen Beschleunigung, der Extremwerte, der Frequenzen und der Varianzen erfolgte in Grafiken und Tabellen über einheitliche Protokolle. Fernerhin wurde hier auch die Zusammenfassung der Schockereignisse sowie die Bestimmung ihrer Intensität vorgenommen.

Die Wissenschaftler konnten über ihre Experimente nachweisen, dass für die kritische Beurteilung der Transportfolgen alle drei Raumdimensionen als Bewegungsrichtung in die Bewertung mit einfließen müssen – ein bis dato unbeachteter Gesichtspunkt.[227] Weiter konnten sie belegen, dass die gemessenen Durchschnittswerte der Belastung deutlich über jenen liegen, wie sie in bisherigen Publikationen angegeben wurden.[228] Hingegen deckten sich ihr Ergebnisse über ein großes Immissionsaufkommen beim Objekthandling mit denen anderer Autoren.[229] Darüber hinaus konnten sie grundsätzlich belegen, dass insbesondere die niedrigeren Vibrationsimmissionen als Belastungsfaktoren zu apostrophieren sind. Sie kommen um eklatant häufiger vor als wenige Spitzenwerte durch ein Schockereignis.[230]

Weiter merken die Forscher an, dass hinsichtlich des Transportmittels sich das am meisten verwendete negativ hervorgetan hat: der Lkw. Die Ursache liegt hier in der Eigenfrequenz des Transportmittels, welche nahe der von Gemälden ist.[231] So liegen die Belastungen während

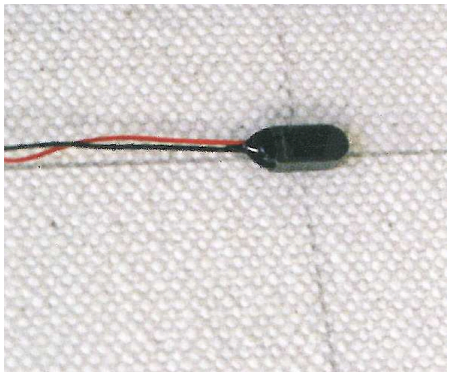


Abb. 21| Ein an der Rückseite des textilen Testgemäldes angebrachter Beschleunigungssensor.
Quelle: Palmbach u. a., 2013, Seite 33

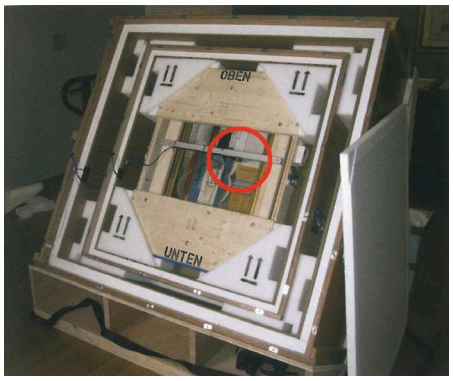


Abb. 22| Optische Schwingungsmessung über einen an einer Brücke befestigten Lasers.
Quelle: Palmbach u. a., 2013, Seite 35

223 Hierbei greifen sie methodisch auf die Vorgehensweise der Forscher um BRATASZ zurück. [Vergleiche: Lasyk u. a., 2008, Seite 64 f]. Ein ähnlicher Laser wurde auch bereits von HOPFNER verwendet. Vergleiche: Hopfner, 2011, Seite 23 f.

224 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 2; Palmbach u. a., 2013, Seite 31 f.

225 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 34 f.

226 Vergleiche: Ohne Verf. (The MathWorks GmbH: Matlab), 2015

227 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 36

228 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 37 f.

229 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 37; Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 15 ff.

230 "Während eines Langstreckentransports ist ein Gemälde nur rund 20 mal einem Schock von 30 m/s2 ausgesetzt. Tiefere Immissionswerte von 1-5 m/s2 sind hingegen während demselben Transport rund 200000-500000 mal zu verzeichnen." Palmbach u. a., 2013, Seite 39

231 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 1 und 6 ff.; Palmbach u. a., 2013, Seite 37 ff.

des Transportes mit dem Flugzeug deutlich darunter – ebenso bei den Transportmitteln Schiff und Bahn. Auch die Dämpfungseigenschaften einiger verwendeter Verpackungsmaterialien werden als unzureichend bewertet, da sie nicht die Immissionsfrequenz von Lkws ausgleichen konnten.[232] Zudem konnten die Forscher beweisen, welche große Bedeutung der Passgenauigkeit von Dämpfungsmaterialien zuzuschreiben ist.[233] So dürfen weder Hohlräume noch Stauchungen vorhanden sein. Gleichermaßen bedeutsam ist auch der feste Verbund von Gemälde und Zierrahmen.[234]

Das hier vorgestellte 'KTI-Projekt' zum Schwingungsverhalten von Gemälden und deren Verpackungen ist hinsichtlich der Prävention von Schaden durch Kunsttransporte als Meilenstein zu werten. Ohne die bedeutende Arbeit der Schweizer Wissenschaftler zu mindern, beschränkt sich das Forschungsprojekt ausschließlich auf Gemälde mit textilem Bildträger – diese unterliegen in Bezug auf die Vibrationsimmission zweifelsohne einem höheren Schadenspotenzial. Gleichwohl wären ebenso Erkenntnisse über das Verhalten von Holztafelgemälden interessant, da diese Objektgruppe oftmals als besonders empfindlich eingeschätzt wird. Darüber hinaus steht, aus der Warte des hiesigen Projektes, die Frage zu strukturellen Veränderungen der Gemäldeoberfläche und der darunter liegenden Schichten im Raum. Eine Aussage darüber, ob diese nachgewiesen oder dokumentiert werden konnten, wird nicht getroffen. In etwaigen Fällen wäre dann der Zusammenhang zur einwirkenden Kraft und Rückschlüsse über das ihnen vorausgegangene Ereignis vielversprechend.

7.3 Bildgebung über Gemäldestrukturen

Die Ursprünge der Oberflächenstrukturanalyse lassen sich im fotografischen Verfahren finden. So ist eine in der Kunstwissenschaft allgemein bekannte und einfach anzuwendende Methode die Streiflichtaufnahme – so wie sie im Standardwerk von MAIRINGER beschrieben wird.[235] Hier beruht die Bildgebung auf dem Prinzip einer senkrecht zum Objekt ausgerichteten Kamera und einer Beleuchtungsquelle, die wiederum die Oberfläche des Untersuchungsgegenstandes aus schräger Sicht beleuchtet (►Abb. 23|) – analog des Funktionsprinzips der Streifenprojektion. Aus dem oberflächenspezifischen Schattenwurf können anhand der Streiflichtaufnahme Rückschlüsse über die Struktur abgeleitet werden. Wie bei MAIRINGER angegeben, lassen sich bei Gemälden neben kunsttechnologischen Besonderheiten auch Schäden wie Schollen, Blasen und Risse visualisieren (►Abb. 24|).[236] Naturgemäß ist dieses Verfahren jedoch ein rein zweidimensionales,

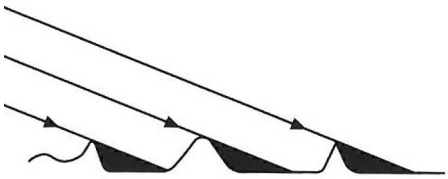


Abb. 23| Schematische Darstellung einer konturierten Oberfläche und Schattenbildung durch schräge Beleuchtung.
Quelle: Mairinger, 2003, Seite 34

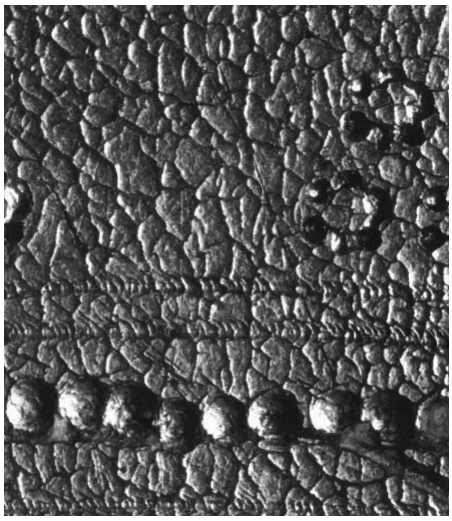


Abb. 24| Visualisierung einer Punzierung und eines ausgeprägten Craquelés durch eine Streiflichtaufnahme.
Quelle: Mairinger, 2003, Seite 34

232 Vergleiche: Palmbach u. a., 2013, Seite 40. Eine Übersicht zu den üblicherweise verwendeten und in ihrer Dämpfungseigenschaften getesteten Materialien finden sich in einer anderen Publikation (Polyethylen-Schaum (Ethafoam), Polyurethan-Schaum und Polyurethan-Misch-Schaum). Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 3 ff.

233 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 7

234 Vergleiche: Läuchli u. a., 2014, Seite 8

235 Vergleiche: Mairinger, 2003, Seite 34 ff.

236 Vergleiche: Mairinger, 2003, Seite 36

welches eher einen vergleichsweise dokumentarischen Charakter besitzt. Für ein zuverlässiges Transportschadensmonitoring eignet es sich weniger, zumal es keine quantitativen Rückschlüsse zulässt.

Eine der Streiflichtaufnahme verwandte Technik ist die RTI-Technologie (Reflectance Transformation Imaging), wie sie PADFIELD u. a. vorstellen.[237] In dieser rein digitalen Aufnahme- und Darstellungstechnik erfährt die Streiflichtaufnahme ihre Aktualisierung. Anhand einer Vielzahl von Einzelaufnahmen aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln, bei gleichbleibender Beleuchtungsrichtung (bzw. vice versa), können Oberflächenstrukturen in einem speziellen 'Viewer' interaktiv durch eine rekonstruierte virtuelle Rundumbeleuchtung visualisiert und untersucht werden. Seine Anwendung fand das Verfahren bisher, dem Schwerpunkt nach, bei der Dokumentation von Strukturen archäologischer Objekte. Am Untersuchungsgegenstand Gemälde konnte seine Eignung bisher vorrangig zur Klärung maltechnischer Fragen unter Beweis gestellt werden.[238]
Doch auch für diese Technik gelten letztlich die gleichen Einschränkungen wie für die der Streiflichtaufnahme. Da keine echte 3D-Bildgebung erfolgt, können quantitative Aspekte nur indirekt und vergleichsweise ungenau abgeleitet werden. Diese Technologie eignet sich daher weniger für ein Transportschadensmonitoring. Da die RTI-Technik in der Konservierungswissenschaft jedoch breiten Anklang gefunden hat, bleibt abzuwarten wie hier die weitere Entwicklung verläuft.

Eine Forschungsarbeit, in der die Streifenprojektion bei Gemälden ihre Anwendung findet, ist jene von EIPPER (2010). Er untersuchte die Eignung der 3D-Streifenprojektion auf Mikrospiegelbasis zur Beurteilung des Reinigungserfolges von Ölfarbenoberflächen. Zur messtechnischen Nachweisführung nutzte der Autor den Scanner 'MikroCAD' der Firma 'GFMesstechnik'.[239] Dieses speziell zur Bestimmung von Mikroprofilen entwickelte Gerät kann mit einer variablen Messfeldgröße im Bereich von 0,7 x 0,7 bis 40 x 40 mm² betrieben werden, wobei eine Tiefenauflösung > 0,1 µm gewährt werden kann.[240] Anhand digitalisierter Malschichtoberflächen analysierte der Autor die Wirkung verschiedener Reinigungsmethoden und -stoffe. Im Zuge einer optischen Auswertung hinsichtlich der Oberflächenrauheit verglich er den Vor- und den Nachzustand repräsentiert über zwei Dreiecksnetze.[241] Eine zusätzliche Beurteilung der Strukturveränderung erfolgte über Querschnittlinien durch die beiden Dreiecksnetze.
Der Autor leistete mit seiner Forschung eine wichtigen Beitrag zur Folgenabschätzung von Reinigungsmaßnahmen, da er eine

237 Vergleiche: Ohne Verf. (Cultural Heritage Imaging), 2015

238 Vergleiche: Padfield u. a., 2005, Seite 506 ff.

239 Vergleiche: Eipper, 2010, Seite 55 und 75; Ohne Verf. (GFMesstechnik GmbH), 2015

240 Vergleiche: Eipper, 2010, Seite 76 f.

241 Vergleiche: Eipper, 2010, Seite 100 ff.

Empfehlung zur optimalen Vorgehensweise aussprach und grundsätzlich zu einer thematischen Sensibilisierung beitrug.[242] Weiterhin konnte der Autor mit seiner Arbeit die Verfahrenseignung der Streifenprojektion zur Darstellung von strukturellen Objektveränderungen im mikroskopischen Bereich nachweisen. Methodisch bedingt waren die Ergebnisse vorrangig qualitativ. So wies der Autor selbst auf Schwierigkeiten hin, welche aus der eingeschränkten Reproduzierbarkeit der Schnittlinien resultierten.
Hieraus ergeben sich in Ableitung zur vorliegenden Arbeit vergleichbare Herausforderungen hinsichtlich der Referenzierung von Messpunkten für eine Reproduzierbarkeit und einem damit validen Soll-Ist-Vergleich.

7.4 Bildgebung über strukturelle Veränderungen an Gemälden durch Klimaschwankungen

SCHAIBLE gelingt erstmals der bildgebende Nachweis über strukturelle Veränderungen von Gemäldeoberflächen, hervorgerufen durch Klimaschwankungen. So beschreibt und analysiert SCHAIBLE 1990 das Thema Schüsselbildung an Leinwandgemälden. Der Autor untersuchte erstmals über eine sequenzielle Bildgebung hygroskopisch bedingte Bewegungen des Bildschichtengefüges durch künstlich hervorgerufene Klimaschwankungen.[243] Da sich die Bewegungen aufgrund ihrer Langsamkeit unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze befinden, visualisierte sie SCHAIBLE mittels Zeitraffertechnik. Hierfür stellte er Einzelaufnahmen zu einem Film zusammen. Ausgangspunkt der zitierten Forschungsarbeit waren Beobachtungen, dass sich bei Klimaschwankungen oftmals die durch das Craquelé „[...] gebildeten Farbschollen an ihren Rändern konkav nach oben wölben."[244] Den kausalen Zusammenhang erläutert der Autor über die Sorptions-, Desorptions- und Permeationseigenschaften zwischen dem Werkstoffgefüge des Gemäldes und der Umgebungsfeuchte, bzw. deren Konzentrationsgefälle.[245] In Laborversuchen gelang ihm die anschauliche Beweisführung. Hierzu spannte er das Fragment eines historischen Leinwandgemäldes auf einen kleinen Glasrahmen.[246] Beides diente als Verschluss einer Plexiglasschale, die wiederum in eine größere Schale gestellt wurde. Letztere wurde durch einer Glasscheibe dampfdicht verschlossen (►Abb. 25| - Abb. 28|). Beide Schalen wurden wechsel- oder gleichzeitig mit Silikagel (4-8 %RH) oder Ammoniumdihydrogenphosphatlösung (96 %RH) gefüllt. Durch die so entstandene Klimakammer und das Konzentrationsgefälle konnte die Gemäldestruktur entsprechend konditioniert und mittels Sorptions-, Desorptions- und Permeationszyklen belastet werden.
Mit seinen Laborexperimenten konnte der Forscher eine künstlich

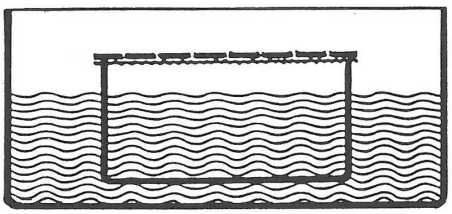


Abb. 25| „Fall 1: Sorption (Wasseraufnahme / Befeuchtung). Beide Schalen mit gesättigter Salzlösung gefüllt. Klimabedingung 20 °C bei 96 %RF." [Schaible, 1990a, Seite 237]
Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237

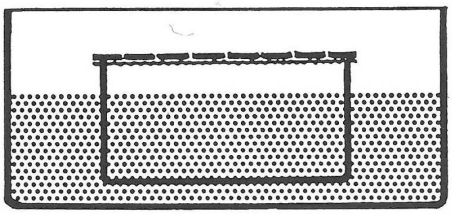


Abb. 26| „Fall 2: Desorption (Wasserabgabe / Trocknung). Beide Schalen mit getrocknetem Silikagel gefüllt. Klimabedingung 20 °C bei 4 %RF." [Schaible, 1990a, Seite 237]
Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237

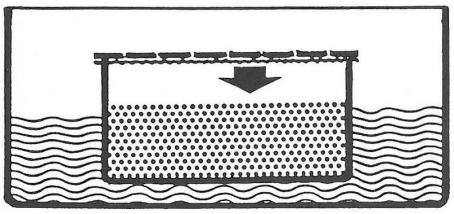


Abb. 27| „Fall 3: Permeation (Diffussion). Kleine Schale mit getrocknetem Silikagel, große Schale mit gesättigter Salzlösung gefüllt. Klimabedingung 20 °C bei Konzentrationsgefälle 4 % zu 96 %RF (Partialdruckgefälle 2152,8 Pa)." [Schaible, 1990a, Seite 237]
Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237

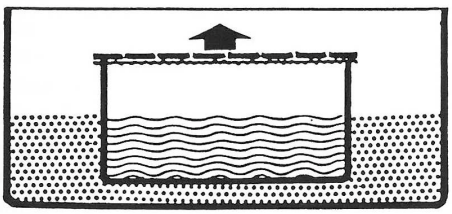


Abb. 28| „Fall 4: Permeation (Diffussion). Kleine Schale mit gesättigter Salzlösung, große Schale mit getrocknetem Silikagel gefüllt. Klimabedingung 20 °C bei Konzentrationsgefälle 96 % zu 4 %RF (Partialdruckgefälle 2152,8 Pa)." [Schaible, 1990a, Seite 237]
Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237

242 Vergleiche: Eipper, 2010, Seite 122 ff.

243 Vergleiche: Schaible, 1990a, Seite 235

244 Schaible, 1990a, Seite 235

245 Vergleiche: Schaible, 1990a, Seite 235 ff.

246 Vergleiche: Schaible, 1990a, Seite 235

Schüsselbildung des Bildschichtengefüges erzeugen. Gleichzeitig bewies er über eine Bildgebung den Zusammenhang, dass sich bei einer Konditionierung der Probe im Zuge der Desorption das Bildschichtengefüge zu den Craquelé-Rändern hin aufwirft, wohingegen es sich bei Sorption wieder niederlegt.[247] Hier ist auf den 16-mm-Dokumentarfilm 'Vom Atem der Bilder' zu verweisen.[248] Die nebenstehend gezeigten Standbilder vermitteln hierzu lediglich einen Eindruck (►Abb. 29|). Ferner konnte er darlegen, dass unterschiedliche Spannungen des Bildträgers „ […] keinen Einfluss auf die Entstehung oder das Verschwinden [… des geschilderten Phänomens haben]."[249] Weiter fügt er a. a. O. an, dass die auftretenden Kräfte derart groß sein können, dass sich analog zur Schüsselbildung an der Bildträgerrückseite ein entsprechendes Negativ abzeichnen kann – ein Phänomen, welches oftmals bei historischen Gemälden zu beobachten ist.
SCHAIBLE leistet mit der vorgelegten Publikation aus phänomenologischer Sicht einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Schüsselbildung. Die Verbindung zum vorliegenden Forschungsprojekt ist vornehmlich thematischer Natur, da es ebenfalls um die Visualisierung von Oberflächenstrukturveränderungen bedingt durch Klimaschwankungen geht. Unter Einschränkungen bestehen Parallelen hinsichtlich der Methodik – so wurde als Verfahren die Streiflichtaufnahme gewählt, mit der sich besonders augenscheinlich Oberflächenstrukturen visualisieren lassen.

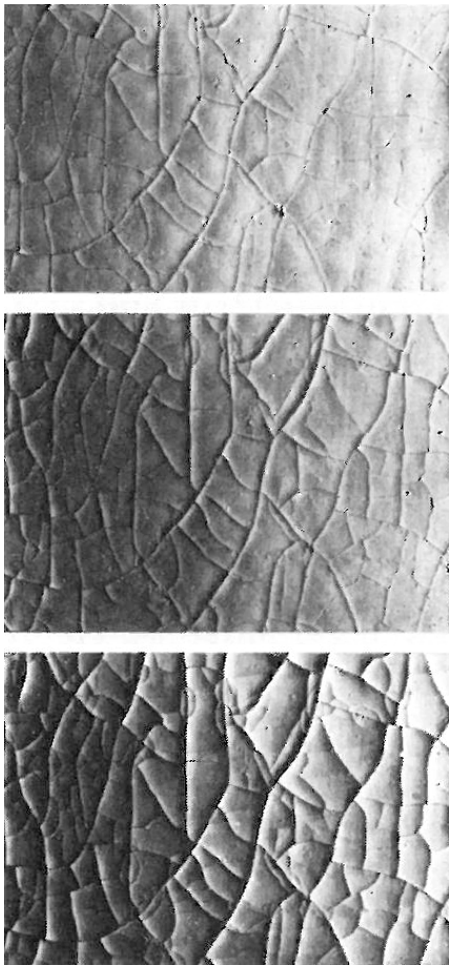


Abb. 29| Exemplarisch gewählte Standbilder aus dem Film 'Das Atmen der Bilder'. Durch der Beleuchtung von rechts wird die Bewegung der Bildschichten deutlich (plane Oberfläche oben, Schüsselbildung unten). Quelle: Schaible, 1990a, Seite 236

Die Arbeit von SCHAIBLE findet ihre Weiterführung in der Forschung von ZEHNDER (1997). In dieser wird der methodische Ansatz einer Bildgebung aufgegriffen, wobei der Untersuchungsgegenstand hier die Holztafel ist. Aufgrund klimatisch bedingter Schäden an einer romanisch bemalten Bilderdecke der St. Martin Kirche in Zillis untersuchte ZEHNDER die Abhängigkeit zwischen Raumklima und Schadensvorgängen.[250] Aufgrund konstruktiver und maltechnischer Merkmale lässt sich die kassettierte Raumausstattung dem Prinzip nach mit Holztafelgemälden vergleichen.
Im Vorfeld der Entwicklung eines Konservierungskonzeptes identifizierte der Autor am Original zunächst Schadensbilder wie: sich dachförmig ablösende Bildschichten, ein Abrollen derselben aufgrund unzureichender Festigungsmaßnahmen in der Vergangenheit sowie einen vereinzelten Pilzbefall.[251] Zur Entwicklung eines Verständnisses über die Schadensentstehung und -vorgänge sowie die forcierte Prävention, nahm der Autor anhand von Probekörpern eine systematische Untersuchung vor. Über eine Laborstudie erfolgte dabei die Wirklichkeitsnachbildung künstlicher Klimaschäden mit dem Ziel, davon qualitative und quantitative Erkenntnisse ableiten zu können. Die Konzeption der hierzu verwendeten Probekörper folgte dabei

247 Vergleiche: Schaible, 1990a, Seite 237

248 Vergleiche: Schaible, 1990a, Seite 236; Schaible, 1989

249 Schaible, 1990a, Seite 240

250 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 301

251 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 303 f.

dem maltechnischem Aufbau der originalen Vorlage. Dementsprechend wurden zu ihrer Herstellung ähnliche Materialien verwendet wie sie an den Holztafeln der Raumausstattung nachgewiesen werden konnten. ZEHNDER stellte mehrere Fichtenholztafeln mit einer unterbundenen Leimtränke aus Hasenleim und einer ebenfalls unterbundenen, sehr dünnen Grundierung aus Bologneser Kreide her. Als Malschicht verwendete er eine Eitempera. Die Probekörper wiesen aufgrund der starken Unterbindung bereits zu Beginn der Laborexperimente Vorschäden auf.[252] In den Laborversuchen erfolgte daraufhin die klimatische Belastung der Probekörper, wobei hierzu Silikagel, bzw. gesättigte Salzlösungen eingesetzt wurden (Feuchtekonditionierung: 0 %RH, 30,8 %RH, 54,4 %RH, 75,4 %RH, 90,1 %RH, 97,6 % RH und 100 %RH).[253] Die Auswertung der sichtbaren Ausmaße dieser Belastung erfolgte über Foto- und Videoaufnahmen, einer Messlupe sowie licht- und elektronenmikroskopisch. Die Bildträgerverformung (Querschnittsänderung) wurde hingegen durch Umfahren des Probekörpers mit einem Stift auf Papier dokumentiert. Darüber hinaus wurde die Sorptionsgeschwindigkeit und die Gewichtszunahme/-abnahme bei Be- und Entfeuchtung untersucht. Dabei folgt ZEHNDER methodisch der Vorgehensweise von MECKLENBURG, indem er die Bildschicht (Grundierung und Farbfassung) und den Bildträger hinsichtlich des hygroskopischen Verhaltens auch separat voneinander untersuchte. Jedoch nahm ZEHNDER eine Erweiterung vor, indem er in Ausweitung in weiteren Versuchen auch den kompletten Verbund des Schichtengefüges berücksichtigte.

Über die Modellbildung von MECKLENBURG hinaus, belegte ZEHNDER anhand von praktischen Versuchen, dass das Bildschichtengefüge viermal so wenig und ebenso viermal so langsam Wasser aufnimmt wie der Bildträger an sich.[254] Hieraus leitete der Autor folgerichtig Spannungen ab, die letztlich zu den dokumentierten Schäden führten. So konnten an den Probekörpern Längenänderungen und Wölbungen des Bildträgers nachgewiesen werden. Da die Malschicht vergleichsweise geringer auf die Klimaschwankungen reagierte, kam es in Folge von Spannungen zu einer sich oberflächlich abzeichnenden Rissbildung.[255] Nach Beobachtungen von ZEHNDER resultierte daraus die partielle Schichtentrennung des Bildschichtengefüges vom Träger, die Schüsselbildung und das dachförmige Aufstehen der Mal- und Grundierschicht. Letzteres kennzeichnete sich durch eine Richtungsbezogenheit analog zum Jahrringverlauf (►Abb. 30|). Weiter erstellte ZEHNDER ein Erklärungsmodell über die beobachteten Schäden und veranschaulichte diese anhand von Grafiken (►Abb. 31|). Trotz einer nicht näheren Ausführung beinhalten seine Forschungsergebnisse prägnante Hinweise über zulässige Klimaschwankungen, Spannweiten und vertretbarer Extremwerte – konkret ausgehend von

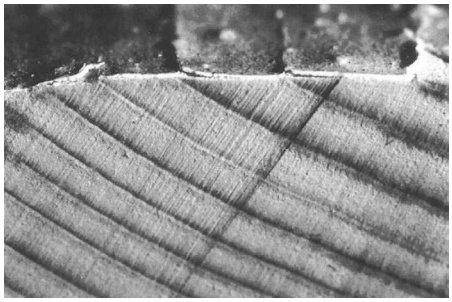


Abb. 30| Beleg des Zusammenhangs der Holzanatomie und des dachförmig aufstehenden Bildschichtengefüges. Offenkundig ist die Haftung im Bereich des Spätholzes (dunkle Streifen) reduziert. Zudem verlaufen die Risse im Bildschichtengefüge parallel zu den Jahresringen.
Quelle: Zehnder, 1997, Seite 310

252 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 309

253 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 305

254 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 307

255 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 308 ff.

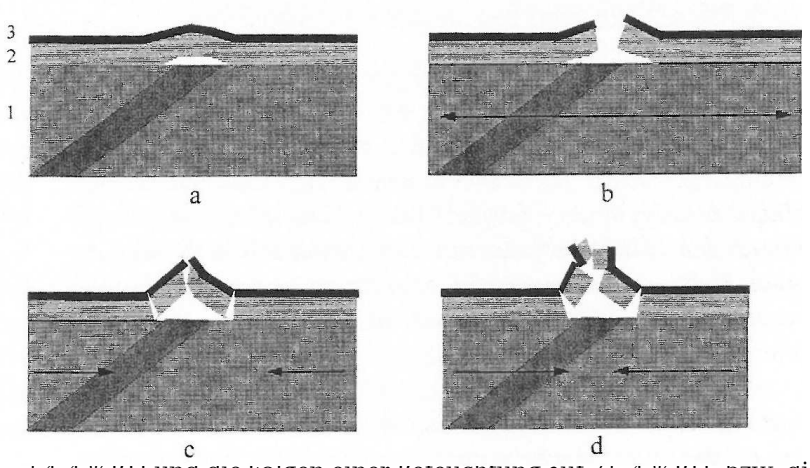


Abb. 31| „Dachförmig aufstehende Malschicht (schematisch), 1 Holz, 2 Malschicht, 3 Fixierschicht.
a) Auf einer Zone mit reduzierter Haftung löst sich die Malschicht von der Unterlage (hier Spätholz, dunkel markiert).
b) Beim Dehnen des Holzes bildet sich über der Schwächezone ein Riss in der Malschicht und dessen Ränder biegen sich nach oben.
c) und d) Beim Schwinden des Holzes werden die Malschichtränder gegeneinander geschoben und geknickt." [Zehnder, 1997, Seite 311].
Quelle: Zehnder, 1997, Seite 311

54,4 %RH und die Folgen einer Befeuchtung auf 75,4 %RH, bzw. die einer Trocknung auf 30,8 %RH. Die Diskrepanzen von 21,0 %RH bei Sorption, bzw. 23,6 %RH bei Desorption äußern sich bereits in signifikanten Oberflächenveränderungen. Dabei sind zeitliche Aspekte zu berücksichtigen. So gibt der Autor an, dass bei Schwankungen der relativen Feuchte um 20 %RH über einen längeren Zeitraum von vierzehn Tagen hinaus, die Dimensionsänderungen (Längenänderung Holzbildträger 0,7%) am gravierendsten ausfallen.[256] Bei quantitativ gleichbleibender Schwankung der relativen Feuchte, sind die Auswirkungen über einen Zeitraum von zwei Tagen hingegen geringer (Längenänderung Holzbildträger 0,3%). Am kleinsten fallen sie jedoch bei, nicht näher spezifizierten, Kurzzeitschwankungen aus (Längenänderung Holzbildträger 0,1%). Konstitutiv bewirkten die „Dehn-Schwind-Bewegungen des Holzes […] das Abreissen und Aufstossen der Malschicht an Stellen mit reduzierter Haftung (besonders auf Spätholz im Bereich liegender Jahrringe)."[257]

Wie bereits angemerkt sind die Forschungsergebnisse des Autors aus konservierungswissenschaftlicher Sicht und der oben aufgezeigten Kontroverse über Klimastandards grundsätzlich von großer Bedeutung. Sie gewähren bereits 1997 den Rückschluss, dass die Schwankung der relativen Feuchte um zwanzig Prozent, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, negative Folgen für die Beschaffenheit vorgeschädigter Holztafelprobekörper hat. Trotz der überzeugenden Ergebnisse, die erstmals eine Bildgebung zur Entstehung des Schadens 'Dachförmig aufstehende Malschicht' beinhalten, bestehen auch Einschränkungen. Vorrangig ist hierbei die Genauigkeit der Messmethodik zu bemängeln, die mit 0,1 mm angegeben wird.[258] Sie ist nicht berührungslos und nur eingeschränkt bildgebend, wobei der Autor seine Ergebnisse in Auszügen fotografisch dokumentierte. Die Ergebnisse von ZEHNDER belegen die Eignung von Probekörpern als Untersuchungsgegenstand zur Nachweisführung einer Schadenentstehung. Darüber hinaus hat sich ihre Konditionierung im Labor über gesättigte Salzlösungen, bzw. Silikagel in verschiedenen Feuchtestufen bewährt. So bekräftigen die positiven Ergebnisse von

256 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 314

257 Zehnder, 1997, Seite 314

258 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 305

ZEHNDER die gewählte Versuchsstrategie und -durchführung im experimentellen Teil der eigenen Arbeit.

7.5 Bildgebung über strukturelle Veränderungen an Gemälden durch Transport – ein erstes Transportschadensmonitoring

Das 'VASARI-Projekt' brachte ab dem Beginn der 90er Jahre erstmals einen systematischen Ansatz für ein Monitoring zum Nachweis transportbedingter Veränderungen an Gemälden hervor.[259] Das Projekt erfuhr seine Motivation aus bestehenden Unsicherheiten bei der Beurteilung zur Ausleih- und Transportfähigkeit von Gemälden.[260] Die beteiligten Forscher um BURMESTER und SAUNDERS entwickelten ein digitales und bildgebendes Monitoringverfahren, um mögliche Veränderungen zu objektivieren.[261] Ziel war die Loslösung der subjektiven Beurteilung von Veränderungen aus dem Erinnerungsvermögen heraus. Dabei widmeten sich die Forscher dem Nachweis von Veränderungen an der Gemäldeoberfläche.

Die Verfahrenserprobung erfolgte im Rahmen des Leihverkehrs. Hierfür wurden die Gemälde sachgemäß verpackt und via Lastwagen und Flugzeug transportiert. Um den Vor- und den Nachzustand automatisiert zu vergleichen, nutzten sie hierzu erstmals die digitale Bildverarbeitung.[262] Dabei standen weniger die evidenten Veränderungen im Fokus, als vielmehr die weniger augenscheinlichen – damit sind jene Veränderungsmerkmale gemeint, die sich quantitativ unterhalb von 0,1 mm befinden.[263] Vorrangiges Ziel war der Nachweis von Craquelé-Veränderungen, da hierüber die Möglichkeiten und Grenzen der Methodik erkundet werden konnten.[264] Ebenso sollte für die Bewertung der Transportfolgen der Nachweis von Veränderungsmerkmalen nicht anhand stichprobenartiger Ausschnitte sondern unter Berücksichtigung der kompletten Malschichtoberfläche erfolgen.

Für die apparative Nachweisführung wurde eine komplexe digitale Aufnahmetechnik entwickelt. Als zentrale Einrichtung diente eine Digitalkamera mit einer Auflösung von 20 Pixel je Millimeter, bei einer Messfeldgröße von 10 x 13 cm (entspricht 26.000 Bildpunkten, bei einer daraus resultierenden Dateigröße von 7 MB).[265] Aufgrund des damaligen technischen Entwicklungsstandes und der gewünschten,

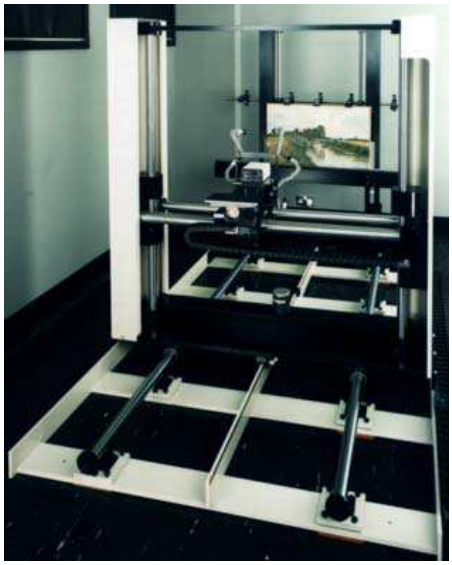


Abb. 32| Eine frühe Version des 'VASARI-Scanner' in 'The National Gallery London'. Quelle: Ohne Verf. (University of Southampton), 2015

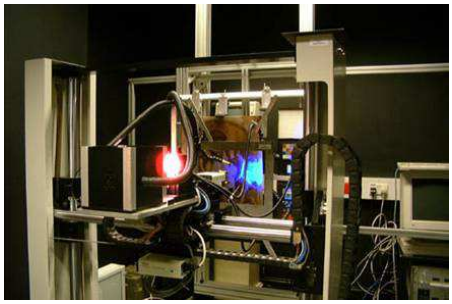


Abb. 33| Frontalsicht des 'VASARI-Scanner' in 'The National Gallery London'. Quelle: Ohne Verf. (University of Southampton), 2015

259 Hierbei handelt es sich um ein mehrjähriges, von der Europäischen Union gefördertes Gemeinschaftsprojekt (‚VASARI', bzw. ‚ESPRIT II', No. 2649) der ‚Bayerischen Staatsgemäldesammlungen' (‚Doerner Institut') und ‚The National Gallery London', sowie beteiligten Universitäten und Partnern aus der Industrie. Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 401; Burmester & Müller, 1992, Seite 336

260 Vergleiche: Burmester & Wei, 1994, Seite 114; Burmester u. a., 1993, Seite 401. Dabei beziehen sich die beteiligten Forscher ausdrücklich auf die Forschung um MECKLENBURG. Vergleiche: Burmester & Müller, 1992, Seite 335

261 Vergleiche: Saunders & Cupitt, 1993, Seite 72 ff.; Burmester & Müller, 1992, Seite 335

262 Vergleiche: Burmester & Müller, 1992, Seite 339

263 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 401; Burmester & Müller, 1992, Seite 335

264 Vergleiche: Burmester & Müller, 1992, Seite 336 f.

265 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 402; Burmester & Müller, 1992, Seite 336 f.

hohen Ortsauflösung, bei gleichzeitiger Digitalisierung der gesamten Malschichtoberfläche, wurde die Aufnahmeeinheit auf einem, entlang von drei Achsen verschiebbaren Schlittensystem montiert.[266] Über einen mäandernden Verfahrweg der Kamera konnte so das komplette Gemälde über mehrere Einzelaufnahmen digitalisiert werden. Diese Einzelaufnahmen wurden später durch eine Bildverarbeitung zu einer Gesamtaufnahme zusammengefügt. Die Digitalisierung erfolgte in Grauwerten (256 Graustufen, 8 Bit). Aufgrund der konstruktiven Merkmale des Schlittensystems konnten mit dem 'VASARI-Scanner' Objekte bis zu einer Formatgröße von 150 x 150 cm digitalisiert werden (►Abbildung Abb. 32|-Abb. 34|).[267]

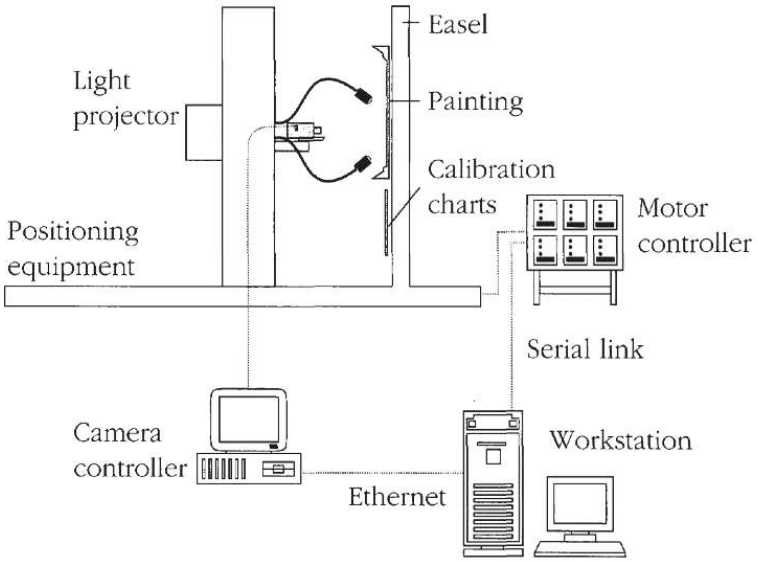


Abb. 34| Grafik zum schematischen Aufbau des 'VASARI-Scanner'.
Quelle: Saunders & Cupitt, 1993, Seite 73

Anhand mehrerer publizierten Fallstudien konnten die Forscher die generelle Praktikabilität des Verfahrens unter Beweis stellen.[268] So war es möglich transportbedingte Objektveränderungen an einem E. L. Kirchner ('Kartenspielender Knabe' (69,3 x 62,3 cm) (►Abb. 35|)), solche an einem A. Sisley ('La Route de Hampton Court' (38,8 x 55,4 cm)) und anderen prominenten Gemälden nachzuweisen.[269] Über digitale Bildverarbeitungsalgorithmen gelang die Lokalisierung und der Nachweis von veränderten Rissen, von aufstehenden Malschichtschollen und anderen Deformationen sowie Staubablagerungen.[270] Zur Beweisführung der Verfahrensvorteile und hohen Ortsauflösung führten die Autoren beim Gemälde von E. L. Kirchner als ein Ergebnis die Ablagerung eines Haares mit der Länge von drei Millimetern an. Über eine automatische Protokollausgabe und die farbige Hervorhebung der veränderten Partien bewies sich das entwi-

266 Vergleiche: Saunders & Cupitt, 1993, Seite 72 f.

267 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 405

268 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 404. Zudem findet sich eine Übersicht zu den untersuchten Gemälden bei BURMESTER und WEI. Vergleiche: Burmester & Wei, 1994, Seite 121

269 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 402

270 Vergleiche: Burmester & Wei, 1994, Seite 121; Burmester u. a., 1993, Seite 402; Burmester & Müller, 1992, Seite 339 und 341

ckelte Scan-System als Instrument zur Beurteilung transportbedingter Veränderungen. Bei der weiteren Praxiserprobung konnten darüber hinaus Veränderungen detektiert werden, die nicht zwangsläufig ausschließlich einem Transport zugeordnet werden konnten, sondern auch sogar solche, die sich aus dem sachgerechten Objekthandling im Museum ergaben. Damit sind die Folgen der Arbeitsschritte: Wandmontage, Fotografieren, Ein- und Ausrahmen, aber auch das Ein- und Auspacken gemeint.[271]



Abb. 35| Veränderungsprotokoll an dem Gemälde von E. L. Kirchner. Die Unterschiede zwischen der Vorzustands- und der Nachzustandsaufnahme sind als kleine rechteckige Markierungen dargestellt.
Quelle: Burmester u. a., 1993, Seite 402

Die mit dem 'VASARI-Scanner' detektierten Abweichungen korrespondierten jedoch nicht immer mit den tatsächlichen Veränderungen am Objekt.[272] So ergaben Unschärfen, die aus einer veränderten räumlichen Position zwischen der Vorher- und der Nachher-Aufnahme resultierten, den Hinweis auf Veränderungen, obgleich diese real nicht vorlagen.[273] Nach Angaben der Forscher konnten die Objekte lediglich mit einer reproduzierbaren Genauigkeit von einem Millimeter auf der Staffelei platziert werden.[274] Dieses stellt einen eklatanten Verfahrensmangel dar. Zudem bestand der Nachteil, dass es sich bei dem geschilderten Verfahren um ein rein zweidimensionales Analyse- und Nachweisinstrument handelt.[275] Veränderungen, die sich entlang der Kameraachse vollzogen, wie bspw. das erwähnte Aufstehen von Malschichtschollen, konnte nur indirekt über eine Kontraständerung des Schattenwurfs bestimmt werden. Verglichen mit dem Anspruch der vorliegenden Arbeit an die Nachweisführung geringster Veränderungsmerkmale, sind die Ergebnisse, die mit dem vorgestellten Verfahren erzielt werden konnten, aus heutiger Sicht nicht ausreichend. Ungeachtet dessen entsprachen die Leistungsmerkmale der Kamera dem damaligen technischen Stand. Weiterhin ist auf Probleme zu verweisen, die sich aus den Leistungsgrenzen der Computertechnik ergaben.[276] Anzuführen ist die Rechnerkapazität, die Verarbeitung großer Daten sowie die Aufnahmezeit selbst. Da diese aufgrund der Vielzahl von Einzelaufnahmen bis zu zwei Stunden in Anspruch nehmen konnten, ergaben sich nach Autorenaussagen durch die zwischenzeitigen Klimaschwankungen Einschränkungen in Bezug auf den Zustandsvergleich.[277] Auch sich verändernde Lichtverhältnisse und anspruchsvolle Oberflächenbeschaffenheit, wie glänzende Bereiche oder umfangreiche Farbkontraste, brachten Herausforderungen mit sich.
Die Forscher befassten sich erstmals mit einem Transportschadensmonitoring und entwickelten einen vielversprechenden technischen Lösungsansatz. So gelang ihnen mit Hilfe des 'VASARI-Scanners' der prinzipielle Nachweis von Veränderungen an Gemälden während

271 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 401

272 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 404

273 Vergleiche: Burmester & Müller, 1992, Seite 341

274 Vergleiche: Burmester & Müller, 1992, Seite 336 und 342

275 Vergleiche: Burmester & Wei, 1994, Seite 119

276 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 402

277 Vergleiche: Burmester & Wei, 1994, Seite 116

ihres Handlings. Hier besteht in Bezug auf den Forschungsstand die größte Übereinstimmung mit dem vorliegenden Forschungsansatz. Unterschiedliche Ansprüche an die Fragestellung ergeben sich jedoch insbesondere hinsichtlich der dreidimensionalen Nachweisführung sowie des Auflösungsvermögens.
Das Forschungsprojekt erfuhr sowohl in der allgemeineren Fachpresse[278] als auch in der Tagespresse[279] große Resonanz. Gerade deshalb stellt sich die Frage, warum es weder Hinweise auf eine Etablierung des Verfahrens noch auf eine Fortführung der Forschung gibt.
Aus dem Sinnzusammenhang der hiesigen Schrift ist weiterhin bedeutsam, dass die Forscher bereits damals das Problem bei der Abgrenzung der Befunde erkannten. Gemeint ist damit die Diskriminierung von Veränderungsprozessen wie Alterung und Schaden. Die Attestierung derselben erfolgte nach rein subjektiven Kriterien, wobei eine weitere Auseinandersetzung mit diesem Problem ausblieb.[280]
Der Terminus Transportschaden wurde nach Angaben der Forscher aus rein populistischen Gründen gewählt.[281]

7.6 Streifenprojektion zum Monitoring struktureller Veränderungen

Hinsichtlich der Verformungsmessung von Holztafelgemälden ist die Forschung von GUIDI u. a. aus dem Jahr 2004 zu nennen. Ausgangspunkt der Studie war zunächst die Überprüfung der Verfahrenseignung zur Digitalisierung einer großformatigen Holztafel.[282] Hierzu wurde erstmals die Streifenprojektion eingesetzt. Neben einer grundsätzlichen Bildgebung sollte zugleich die Verformung quantitativ bestimmt werden mit dem Ziel, die Möglichkeit einer Planierung zu beurteilen, Restaurierungsmaßnahme zu evaluiert,[283] sowie möglich Belastungen durch Klimaschwankungen und Erschütterungen während eines Transportes nachzuweisen.[284] Untersuchungsgegenstand war 'Die Anbetung der Könige' von Leonardo da Vinci.[285] In Ergänzung zu anderen zweidimensionalen, bildgebenden Verfahren digitalisierten die Autoren durch eine hochauflösenden 3D-Streifenprojektionssccanners das großformatige Holztafelgemälde (ca. 240 x 240 cm) (►Abb. 36|). Der verwendete Scanner wies hierbei eine laterale Auflösung von 0,27 mm und eine axiale Auflösung von 0,38 mm auf.[286] Aufgrund der beschränkten Größe des Messvolumens von



Abb. 36| Digitalisierung eines großformatigen Gemäldes von Leonardo da Vinci durch ein Streifenprojektion.
Quelle: Guidi u. a., 2004, Seite 5

278 Vergleiche: Mazzoni, 1994, Seite 114 f.

279 Vergleiche: Hermida, 2002

280 So BURMESTER u. a.: „If differences between the two images are found, they are noted as either a beginning of a change of the painting´s surface texture, or as a damage". Burmester u. a., 1993, Seite 401

281 Vergleiche: Burmester u. a., 1993, Seite 405

282 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 9

283 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 1 f.

284 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 1 und 9

285 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 1ff.

286 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 3 f.. Spezifische Angaben zu dem verwendeten Gerät gehen aus der Publikation nicht hervor. Lediglich die Herstellerfirma wird mit

160 x 205 mm wurden zur Objektdigitalisierung insgesamt 39 Einzelaufnahmen erstellt. Dazu mäanderte der Sensor via manueller Positionierung in dreiundzwanzig Reihen und siebzehn, bzw. achtzehn Spalten über das Gemälde. Zum späteren 'Matching' der Einzelaufnahmen wurde eine Überlappung von ca. dreißig Prozent angestrebt. Vereinzelte Areale, die auf strukturelle Schäden rückschließen ließen, wurden darüber hinaus mit einer noch höheren Auflösung von bis zu 0,09 mm digitalisiert. Die Datenauswertung erfolgte in der Software 'PolyWorks'.[287] Für die Bewertung der Verformung berechneten die Forscher eine gemittelte Ausgleichsebene, zur der die Punktewolke über eine Falschfarbendarstellung quantitativ in Beziehung gesetzt wurde.
Als Ergebnis konnten sie hier eine Verformung oberhalb der Ausgleichsebene (zur Gemäldevorderseite gewandt) mit + 15 mm angeben und eine unterhalb der Ausgleichsebene (der Gemälderückseite zugewandt) mit -18 mm.[288] So analysierten sie in Bezug auf die virtuelle Idealebene die Spannweite einer Deformation von 33 mm (►Abb. 37|).
Auch wenn die Forscher nach eigenen Angaben in ihrem Projekt erstmals die komplette dreidimensionale, optische Digitalisierung eines Gemäldes durchführten, konnten sie das eingangs formulierte Ziel eines Monitoring nicht erreichen.[289] So gehen aus der Publikation weder Ergebnis hervor, die Rückschlüsse über den Erfolg einer Planierung zulassen – noch solche zu einem Transportschadensmonitoring.[290] Damit ist auch eine Dokumentation des Verhaltens der Holztafel bei Klimaschwankungen mit eingeschlossen. Grundsätzlich stießen die Autoren auf umfangreiche Probleme bei der Datenverarbeitung. Maßgeblich erschwerte die Dateigröße die Erstellung eines 3D-Modells und dessen Weiterverarbeitung.[291] Hier wurden die Leistungsgrenzen des verwendeten Computers erreicht.[292]
Gleichwohl konnten die Autoren die Verfahrenseignung zur dreidimensionalen Digitalisierung von Gemälden unter Beweis stellen.

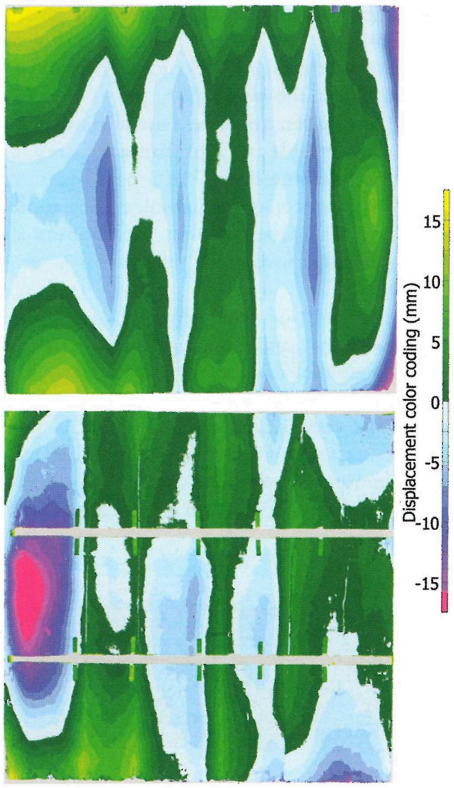


Abb. 37| Falschfarbendarstellung zur Visualisierung der Verformung (in Z-Richtung) im Verhältnis zu einer Best-Fit-Ebene (X/Y) (oben Vorderseite, unten Rückseite).
Quelle: Guidi u. a., 2004, Seite 7

Im Zusammenhang der Verformungsmessung von Holztafeln findet sich ein weiteres aktuelles Beispiel aus dem Jahr 2010 bei einem Forschungs- und Restaurierungsprojekt am Stadtmuseum Münster.[293]
Hier wurde an vierzehn Holztafeln des spätmittelalterlichen

'OPTONET SRL' Brescia, Italien angegeben. [Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 3]. Die Unternehmenswebseite des Herstellers: Ohne Verf. (OPTONET SRL), 2015

287 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 4. Die Unternehmenswebseite des Herstellers: Ohne Verf. (Innovmetric: PolyWorks), 2015

288 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 6

289 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 2

290 In Bezug auf die Evaluierung von Rückformungen wird auf die unpublizierte Arbeit von FISCHER verwiesen. In gemeinsamer Arbeit konnte an einem Tafelfresko über den Vergleich zweier virtueller Modelle, jeweils den Vor- und den Nachzustand repräsentierend, der Erfolg restauratorischer Maßnahmen überprüft und bestätigt werden. Vergleiche: Fischer, 2013, Seite 112 ff.

291 Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 4

292 Die Forscher verwendeten ein damals aktuelles Modell mit 2 Pentium III Prozessoren á 1 GHz und einem Arbeitsspeicher von 2 GB. Vergleiche: Guidi u. a., 2004, Seite 5

293 Vergleiche: Heilig, 2010, Seite 20

Malers Jan Baegert Untersuchungen vorgenommen. Durch die Verformungsmessungen sollte zum einen geklärt werden, wie ausgeprägt die Krümmung ist. Zum anderen sollten die Daten für ein Monitoring der Objektveränderungen in definierten Zeitabständen verwendet werden.[294] Die Digitalisierung wurde mit einem 'COMET-System' der Firma 'Steinbichler Optotechnik GmbH' durchgeführt.[295] Zu dem Forschungs- und Restaurierungsprojekt gehen, über das publizierte Vorhaben hinaus, in relevanten Fachzeitschriften keine Ergebnisse hervor. So existieren keine Angaben über eine vergleichende Digitalisierungen zu einem späteren Zeitpunkt. Somit sind auch keine Rückschlüsse zu Objektveränderungen möglich. Dennoch wird das Projekt im Kontext dieser Arbeit erwähnt, da erstmals (wie vorliegend) ein Streifenprojektionsscanner der Firma ‚Steinbichler' an Gemälden eingesetzt wurde.

In eigenen Vorarbeiten aus dem Jahr 2010 wurde der Untersuchung von Transportschäden mit einem Streifenprojektionsscanner nachgegangen. Untersuchungsgegenstand waren dabei gefassten Skulpturen sowie Holzprobekörper. Der Forschungsschwerpunkt lag hierbei in einer bildgebenden, dreidimensionalen Nachweisführung weniger offensichtlicher Veränderungen, wie sie durch Klimaschwankungen verursacht werden. Als Untersuchungsverfahren wurde ein Streifenprojektionsscanner der Firma 'Steinbichler' verwendet. Der Scanner 'COMET VarioZoom CV 250/400' hatte eine herstellerseitig angegebene Messfeldgröße von 390 x 295 mm bei einer Messgenauigkeit von 0,244 mm.[296] Im Rahmen von Laborversuchen erfolgte die Simulation von Klimaschwankungen wie sie während eines Transportes auftreten. Die Untersuchungsobjekte wurden hierzu in einer Klimakammer wechselnden Konstantklimata ausgesetzt. Darüber hinaus wurde für eine Praxiserprobung auch Transporte in Realumgebung durchgeführt. Die Auswertung erfolgte nach optischen Kriterien durch den Vergleich virtueller 3D-Zustandsmodelle. Erkenntnisse über quantitative Aspekte konnten damals jedoch lediglich indirekt anhand der Bildgebung abgeleitet werden – weitere virtuelle Auswertungswerkzeuge (siehe unten) standen damals nicht zur Verfügung. In Laborversuchen gelang bereits damals der Nachweis über hygroskopische Dimensionsänderungen der Untersuchungsgegenstände, wie sie aus einer Schwankung der relativen Feuchte von >6 % resultierten (45 % - 51 %RH).[297] Gleichermaßen konnte bei einem vorgeschädigten Materialgefüge anhand virtueller Querschnitte die Bewegung gelockerter Fassungsbereiche in Abhängigkeit zur Klimaschwankung visualisiert werden (►Abb. 39|).[298] Somit waren Rückschlüsse auf klimatisch bedingte Spannungen im Gefüge

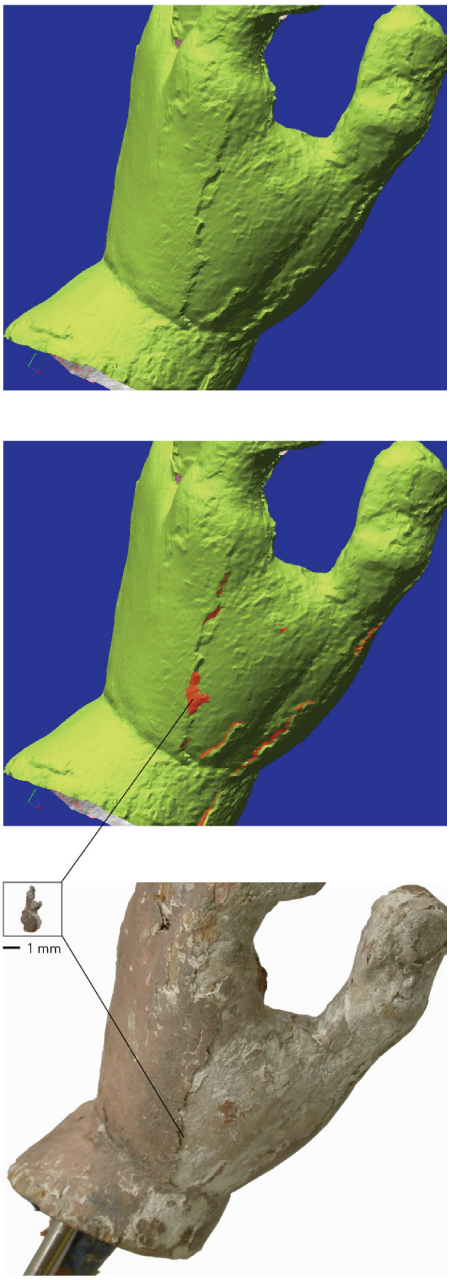


Abb. 38| Die oben gezeigten Abbildungen belegen den Verlust einer Fassungsscholle. Der rot markierte Bereich entspricht den Veränderungen.
Quelle: Hein & Krekel, 2010, Seite 142

294 Vergleiche: Heilig, 2010, Seite 21

295 Steinbichler OptotechnikGmbH (Unternehmenswebsite), 2012, Kontaktadresse des Unternehmens: Steinbichler Optotechnik GmbH, Georg-Wiesböck-Ring 12, D-83115 Neubeuern, Telefon: +49 (0) 80 35 / 87 04-0; Internetauftritt: http//www.steinbichler.de

296 Vergleiche: Hein, 2007, Seite 24

297 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 138

298 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 140

möglich. Im Übrigen gelang bei dem Transport einer barocken, gefassten Skulpturenhand der Nachweis über einen Transportschaden in Form eines Fassungsverlustes (ca. 1,5 x 3,5 mm Scholle) (▶Abb. 38|).[299] Da über beigefügte Datenlogger die Klimaschwankungen während des Transportes mit lediglich 3 %RH quantifiziert wurden, war der nachgewiesene Transportschaden mitunter den Vorschäden, aber auch der Einwirkung mechanischer Kräfte zuzuschreiben. Generell konnte blegt werden, dass es sich um ein geeignetes Verfahren zum Nachweis transportbedingter dreidimensionaler Veränderungen handelt.[300]

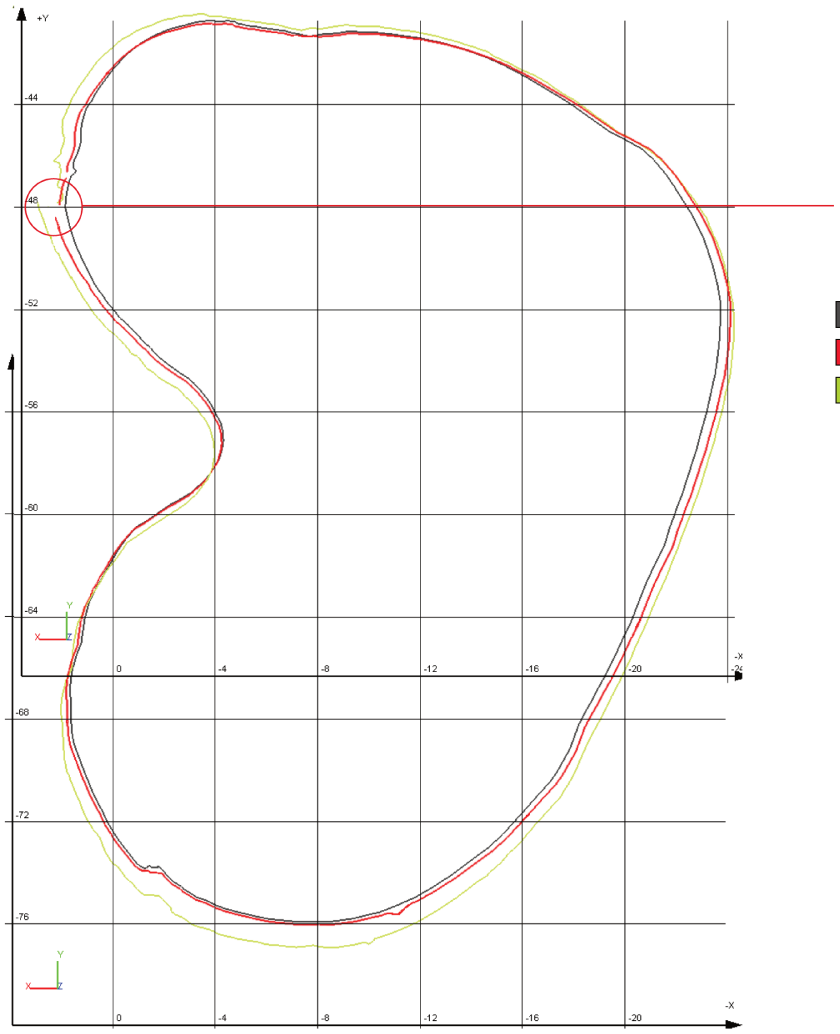


Abb. 39| Schnittlinie durch das Skulpturenfragment mit kenntlicher Bewegung eines offensichtlich gelockerten Fassungsbereich in Abhängigkeit zu Klimaschwankungen.
Quelle: Hein & Krekel, 2010, Seite 140

Verfahrenseinschränkungen ergaben sich beim Nachweis sehr feiner Strukturen, so bspw. Craquelés.[301] Ebenso bestanden Probleme bei der Referenzierung des Vorzustands- und Nachzustandsmodells. So

299 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 141

300 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 131 ff.. Am angegebenen Ort findet sich eine Übersicht zur generellen Verwendung der Streifenprojektion im Bereich der Kunsttechnologie. [Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 132] Ferner ist auf die der Publikation zugrundeliegenden Diplomarbeit verwiesen. In dieser wird der Stand der Forschung detaillierter skizziert. Gleichwohl finden sich auch dort keine Angaben über etwaige Publikation zur Verfahrensanwendung im Bezugrahmen des Transportschadensmonitoring, da es keine gibt. Vergleiche: Hein, 2007, Seite 16 ff.

301 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 143 f.

gelang der Vergleich nur über ein Referenzobjekt mit orthogonalen Flächen unter der Vorraussetzung, dass mögliche raumdimensionale Änderungen zwischen dem Referenzquader und dem Vor- bzw. dem Nachzustand kleiner waren als die zu untersuchenden Objektveränderungen. Ganz wesentlich ist jedoch die Problematik, dass Kunstwerke im Regelfall ein hygroskopisches Verhalten immanent ist und sich damit zwangsläufig das räumliche Verhältnis zwischen Referenzquarder und Untersuchungsgegenstand ändert – methodisch gesehen besteht hier ein eklatanter Mangel.
Die geleisteten Vorarbeiten haben für die vorliegende Arbeit maßgebliche Relevanz. Das Streifenprojektionsverfahren bewährte sich durch eine Nachweisführung von dreidimensionalen Veränderungen im Submilimeterbereich. Für ein Monitoring von Veränderungen an der Objektgruppe Gemälde skizzierte sich sein Einsatz als vielversprechend, wobei dieser bis dato ausblieb und zur vorliegenden Arbeit motiviert. Ebenso blieb die Frage offen, ob mittels eines Sensors mit höherer Auflösung auch feinste Strukturen, wie das forcierte Craquelé, detektiert werden können. Ebenso muss die praktische Verfahrenseignung im musealen Bereich noch unter Beweis gestellt werden – hier stellte die Ausrichtungsmöglichkeit von Vor- und Nachzustand für einen direkten Vergleich bisher eklatante Mängel dar. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems muss darüber hinaus erkundet werden, welche Schaden- und Veränderungsmerkmale von Gemälden überhaupt messtechnisch nachzuweisen sind. Damit sind sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen sowie deren Dokumentation gemeint.

8. Abgrenzungsprobleme bei Veränderungen: Alterung versus Schaden

Die vorliegende Arbeit widmet sich dem Nachweis von Schäden an Gemälden. Daraus resultiert die Frage nach dem Wesen eines Schadens. Wie eingangs erwähnt, wird schon in den 'Metamorphosen' postuliert, dass sich alles verändert. Die Aussage aus Ovids Epos findet ihre naturwissenschaftliche Entsprechung durch die Erkenntnisse aus der Thermodynamik. So ist die Bestrebung zum Ausgleich vorhandener Potenziale, das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes, auch einem Kunstwerk inhärent. Die Veränderung äußert sich konstitutiv in einer stets fortschreitenden Gestaltsabweichung.

Der Entstehungsprozess gegenständlicher Kunstwerke sieht vor, dass durch schöpferische Kraft aus Materialien ein Kunstwerk geformt wird. Der Zeitpunkt der Werkvollendung bedeutet aus philosophischer Sicht eine Zäsur, wobei dieses Moment durch den Künstler nach rein individuellen Kriterien bestimmt wird. Zu diesem Zeitpunkt wird das Werk als intakt und ideal definiert. Gleichzeitig impliziert die Ereigniskette auch den weiteren Wandel. Als These gilt, dass die Übergänge zwischen dem intakten Werk und dem Zerfall desselben fließend sind. Die Relation kann ganz allgemein mit dem Terminus Veränderung beschrieben werden.

Eine Veränderung umfasst, genau genommen, die neutrale Benennung einer Wandlung – einer Zustandsänderung. Letztere impliziert das Bestehen eines Vorher und eines 'Gewordenseins' – eines Nachher. Die Beurteilung dieser Veränderung ist per se Herausforderung und zugleich Kernaufgab von Restauratoren.

Eine Veränderung ist immer durch eine Ursache bedingt. Damit wird hier einer klassisch geprägten deterministischen Argumentationsweise gefolgt. Kants Kausalprinzip – „[z]u jedem Ereignis existiert in dessen Vorgeschichte ein Zustand, auf den das Ereignis unausweichlich regelhaft folgen muss[...]"[302] – besitzt immer noch seine Gültigkeit und muss zugleich um aktuelle Erkenntnisse aus der Chaosforschungerweitert werden.[303] Generell können die kausalen Zusammenhänge auf den Untersuchungsgegenstand 'Gemälde' adaptiert werden. In Bezug auf den Zustand ist auch bei dieser Objektgruppe, dem Grundsatz nach, einer Veränderung ein Ursachenkomplex immanent. SCHAIBLE äußert sich ausführlich über diesen kausalen Zusammenhang zwischen einer Ursache, die der Autor „[...] ganz allgemein als eine Energieeinwirkung auf das Materialgefüge eines Kunstwerkes versteh[t...,]"[304] und deren Auswirkung, welche sich in der Ereigniskette eines gealterten Objektes, einer Beschädigung, eines ruinösen Zustandes und letztlich im kompletten Zerfall, im Verlust desselben äußert.[305]

302 Nortmann, 2011, Seite 64 [mit Ergängzungen von N. H.].

303 Zugleich ist dieses um aktuellere Erkenntnisse aus der Quantenmechanik zu erweitern. Vergleiche: Nortmann, 2011, Seite 65; Spohn, 2011, Seite 153

304 Schaible, 1990b, Seite 118

305 Vergleiche: Schaible, 1990b, Seite 119 [Beschriftung der Grafik]. Der Autor verweist anhand der geschilderten Ereigniskette auf die Bedeutung der präventiven Konservierung gegenüber der Restaurierung. SCHAIBLE belegt anhand der Konservierungs- und Re-

Grundsätzlich besteht folgende Kausalkette:

Ursache → Veränderung → Alterung → Schaden

Diese Prozesskette ist nicht reversibel. In gewisser Weise kann daher der Zerfall als 'inneres Gesetz' betrachtet werden. Im genannten Kontext stellt sich die Frage zur möglichen souveränen Diskriminierung dieser Ereigniskette. Insbesondere geht es hierbei, um die Differenzierung von Alterserscheinung gegenüber Beschädigungen. Diese stellt bis dato ein ganz grundlegendes und dennoch bisher wenig beachtetes Problem dar. Neben der gegebenen Relevanz für den Restaurator und Konservierungswissenschaftler tangiert diese Fragestellung insbesondere Eigentümer und Versicherer von Kunstwerken.[306] Bemerkenswert ist, dass die Versicherungssummen ca. ein Drittel der Kosten einer Sonderausstellung ausmachen.[307] Und dennoch steht eine objektive Bewertungsgrundlage von Objektveränderungen bis dato aus. Ein Grund hierfür kann sein, dass in der Versicherungswirtschaft bei einem Kunsttransport als größte Risikofaktoren durch Diebstahl und Unfall verursachte Beschädigungen gelten. Hingegen fließen die unauffälligeren Schadensmerkmale durch Veränderungen in diese Bewertung nicht mit ein.[308] Weiter ist, über kulturphilosophische und soziologische Aspekte hinaus, die Bedeutung auch aus juristischer Sicht immens.

Die Grundlage dazu bildet die Abgrenzung der Begrifflichkeit Alterung versus Schaden. So definiert DUDEN eine Alterung als eine „[…] Veränderung des Gefüges, der Zusammensetzung oder der Eigenschaften durch natürliches oder künstliches Altern"[309] und einen Schaden als „[…] etwas, was die Gegebenheiten, die bestehende Situation in einer negativen, nicht wünschenswerten Weise verändert."[310] Als unterscheidendes Moment impliziert die letztgenannte Definition die stets subjektive Wertung und die Annahme, dass ein Nachteil vorliegt. Bereits hieran wird deutlich, dass eine Alterung nicht präzise und evident von einer Beschädigung abzugrenzen ist. Die Übergänge sind hier fließend.[311] Aus der konservierungswissenschaftlichen Literatur ergenem sich keine weiteren brauchbaren Hinweise. Lediglich im bereits erwähnten, von MECKLENBURG herausgegebenen Tagungsband

staurierungsgeschichte, dass historisch gesehen der Schwerpunkt im restauratorischen Handeln lag, wobei hierbei oftmals die Ursache der Schadensentstehung nicht beseitigt wurde und/oder Restaurierungsmaßnahmen zu weiteren Schäden geführt haben. Sein Appell gilt daher einer Bedeutungssteigerung der präventiven Konservierung. Vergleiche: Schaible, 1990b, Seite 118 ff.

306 Vergleiche: Hiscox, 1991, Seite 80

307 Vergleiche: Hiscox, 1991, Seite 79. Weiter findet sich bei HUGHES der Hinweis, dass die Frachtkosten bis zu sechzig Prozent des Ausstellungsetats betragen können. Vergleiche: Hughes, 1991, Seite 86. Obgleich die Quellen nicht aufeinander abgestimmt sind, vermitteln sie dennoch einen Eindruck über das Kostenvolumen von Versicherung und Transport im Verhältnis zum gesamten Ausstellungsetat.

308 Vergleiche: Hiscox, 1991, Seite 81 mit Ergänzung von N.H.

309 Duden (Wörterbuch: Alterung), 2013

310 Duden (Wörterbuch: Schaden), 2013; Dillon u. a., 2013 , Seite 47

311 Zu einem solchen Schluss kam bereits SCHAIBLE. Der Autor postuliert, dass „[die] Übergänge zwischen natürlicher Alterung und tatsächlichem Schaden […] fließend [sind]. Jede engere Definition wäre völlig subjektiv, zumal die natürliche Alterung durch günstige oder ungünstige Umweltbedingungen verlangsamt oder auch beschleunigt ablaufen kan." Schaible, 1990a, Seite 119

findet sich im Glossar eine Definition zur Alterung, wobei eine zur Begrifflichkeit Schaden ausbleibt.[312]

Bei einer konsekutiven Bestimmung der Begriffsmerkmale ergab sich ein wesentlicher Gesichtspunkt aus der Dimension der Merkmalsausprägung. So erleichtert das Maß der Offensichtlichkeit die Differenzierung eines Schadens von einer Alterung. In Anlehnung an die oben aufgeführte Lexikondefinition ist damit die Ausprägung der Gestaltsabweichung von der Idealform gemeint. Gleichzeitig kommt hier der Perspektive, sowie dem Abstand der Betrachtung und/oder dem Untersuchungsverfahren selbst, eine maßgebliche Rolle zu. Weiter konnten, wie oben belegt, sowohl SCHAIBLE als auch ZEHNDER in Laborexperimenten beweisen, dass die Offensichtlichkeit grundsätzlich von der Intensität der einwirkenden Kraft sowie deren Dauer bestimmt wird.[313] Es handelt sich demnach sowohl bei einer Alterung als auch einer Beschädigung um zeitkritische Erscheinungen.

Ein weiteres Merkmal zur Abgrenzung von Alterung und Schaden kann der Entstehungszeitpunkt des Kunstwerkes sein, bzw. die Bestimmung a posteriori. Bei einem historischen Gemälde werden Alterserscheinungen als Selbstverständlichkeit hingenommen. So gilt ein Craquelé gemeinhin als ein authentisches Merkmal.[314] Bisweilen kann mit einem solchen Authentizitätsmerkmal sogar eine Wertsteigerung verbunden sein. In diesem Kontext sei auf die in der Fachliteratur vorgenommene Diskussion zum Thema Patina verwiesen.[315] Antithetisch verhält es sich hingegen bei zeitgenössischen Werken.

312 „Aging. In the context of this publication usually refers to the chemical change occurring to materials over time: i.e. chemical alteration or degradation over periods of time." Mecklenburg, 1991, Seite 349

313 ZEHNDER unternimmt jedoch nicht den Versuche einer Abgrenzung eines Schadens gegenüber einer Alterserscheinung. Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 314

314 Vergleiche: Kühn, 2001Kühn, 2001, Seite 9; Brachert, 1995, Seite 53 und 55; Schaible, 1990a, Seite 119

315 Hier ist auf die Begriffsbildung und Definition von BRACHERT verwiesen, welcher die Patina grundsätzlich als Alterserscheinung klassifiziert und ausführt: „[...] über die Verfallssymptome einzelner Werkstoffe hinaus steht der Begriff Patina schließlich im weitesten Sinne selbst noch für das Altern komplexer Materialgebilde wie etwa von Gemälden [...]. Der Begriff Patina schließt dabei selbst noch die plastische Deformation der Oberfläche mit ein, jenes schüsselförmige Verziehen von Leinwandbildern und Holztafeln [...], und damit auch die altersbedingte Ausbildung plastischer Strukturen, die, ähnlich den Ausblühungen oder Substanzverlusten antiker Bronzen, wiederum erst das Unnachahmliche und Einmalige des Originals ausmachen. [...] Unter Patina werden somit alle Alterungsvorgänge von Werkstoffen verstanden." [Brachert, 1995, Seite 10] Der Autor weiter: „Hinzu kam der ohnehin schleichend fortschreitende Alterungsprozeß [sic]: die diskrete Verfremdung durch natürliche Alterung der Werkstoffe, durch klimatische Einwirkungen [...]. Krakelees [sic] traten hinzu, die sich überdies in vielen Fällen, wie beim Gemälde, schüsselförmig-plastisch hochmarkierten [...]." [Brachert, 1995, Seite 72] Ferner wertet der Autor ebenso strukturelle Veränderungen als Alterserscheinung: „Gemälde verändern sich nicht allein durch Dunkelung, Vergilbung oder Ausbleichen; der Alterungsvorgang erfaßt [sic] vielmehr auch die plastische Substanz des Farbmaterials, ja die des Bildträgers selbst, indem nun durch Schwund und Krakeleebildung [sic], Verwerfung, Abrieb und Runzeln Strukturveränderungen einhergehen, wodurch es schließlich zur Ausbildung plastischer Patinen kommt." [Brachert, 1995 Seite 53] Die von BRACHERT prononcierte Klassifikation der Patina als Merkmal der Alterung wird jedoch aufgeweicht, in dem er ausführt: „Stärker ausgebildete Sprungnetze stellen indessen bereits eine so schwere Beeinträchtigung des Bildes dar, daß [...] jedes akzeptable Ausmaß [sic] [... überstiegen ist]." [Brachert, 1995, Seite 53] Ob das Adjektiv 'akzeptabel' in diesem Fall darauf hindeutet, dass nach Autorenmeinung dann ein Schadenfall vorliegt bleibt der Mutmaßung vorbehalten. In jedem Fall wird auch hier indirekt auf eine diffuse Grenze hingewiesen. Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, dass der Autor neben den natürlichen Alterserscheinungen auch maltechnische Fehler als 'Patinierungsfaktoren' ansieht. Vergleiche: Brachert, 1995, Seite 38

Vorbehaltlich dass die Patina vom Künstler intendiert ist, haftet der zeitgenössischen Kunst das Attribut der materiellen Unversehrtheit an;[316] letztere ist diffus zu verstehen. Alterserscheinungen, wie sie normalerweise unter dem Begriff der Patina zu fassen sind, können hier bereits als starke Beeinträchtigung oder gar als Beschädigung empfunden werden. So wird der erste, kaum merkliche Riss im Firnis oder in der Malschicht unbestritten als Schaden gewertet. Auffallend findet analog zur Alterung des Kunstwerkes wenig später jedoch der Bedeutungstransfer statt. Das was zuvor als Schaden bewertet wurde, wird nun billigend, nach und nach, auch in weitaus umfassenderer Ausprägung als Alterserscheinung akzeptiert. Dieses gipfelt in der Wertschätzung eines Originalitäts- und Authentizitätsmerkmals, wie dieses oben dargelegt wurde.[317] Die Übergänge der Veränderungsmerkmale sind dabei fließend.

Beim Versuch der bisherigen Bedeutungsfestlegung einer Alterserscheinung gegenüber einem Schaden blieben die eigentlichen phänomenologischen Merkmalsausprägungen selbst unberücksichtigt. Generell sind die Veränderungsmerkmale sehr mannigfaltig. Sie können hier in Gänze unmöglich abgedeckt werden, verwiesen wird auf entsprechende Fachliteratur. Namentlich ist dieses im Fachbereich der Gemälderestaurierung die Standardliteratur von KÜHN, NICOLAUS und SANDNER.[318] Theoretisch ist es möglich, die Veränderungsmerkmale gemäß physikalischer, chemischer und biologischer Ursachen voneinander zu unterscheiden. In der Praxis liegt jedoch fast ausnahmslos immer eine Kombination vor – nicht zuletzt aufgrund der erörterten kausalen Abhängigkeit. Durch die Vermischung von Schadensmerkmalen ist eine zweckgerichtete Abgrenzung gemäß phänomenologischer Merkmale nicht möglich. Es existiert in der Konservierungswissenschaft keine Systematik, die die Gestalt, die sichtbare äußere Erscheinung eines Veränderungsmerkmals, einer Alterung oder einer Beschädigung zuordnet.[319] So sind „[d]ie Grenzen der Verwitterung […] oder äußere Einwirkungen allgemein [...] nicht scharf."[320] Zusätzlich kann anhand der erwähnten Fachliteratur belegt werden, dass hierfür oftmals auch eine sprachliche Heterogenität zur Beschreibung der Veränderungsmerkmale mitverantwortlich ist.[321]

316 Vergleiche: Schinzel, 2004, Seite 25

317 Veranschaulichen lässt sich dieses an einem hypothetisch gewähltem Gemälde von Piet Mondrian. Die monochromen und geometrisch angeordneten Farbflächen beinhaltete zum Entstehungszeitpunkt per se die Perfektion. Haarrisse beeinträchtigen eine solche Malerei vergleichsweise gravierend. Aus heutiger Sicht wird jedoch selbst die flächenhaften Ausprägung eines Craquelé, eines nunmehr neunzig Jahre alten Gemäldes, als authentisch bewertet. Hingegen wird wiederum an ein zeitgenössisches Werk, das stilistisch die Merkmale des Konstruktivismus aufweist, mit großer Sicherheit wiederum der Anspruch der Perfektion gestellt. Andernfalls kann sogar eine trügerische Absicht einer Fälschung unterstellt werden. Erst der Lauf der Zeit wird auch hier wiederum zu den Alterserscheinungen und seinen authentischen Merkmalen führen.

318 Vergleiche: Kühn, 2001; Nicolaus, 1998; Sandner, 1990

319 Abermals ist in diesem Kontext SCHAIBLE zu zitieren. „In diesem Zusammenhang drängt sich die Frage auf, ob auch wir jemals in der Lage sein werden, eine vollständige und wissenschaftlich befriedigende Beschreibung der komplexen Alterungsvorgänge an Kunstobjekten zu erzielen." Schaible, 1990b, Seite 129

320 Zehnder, 1997, Seite 312

321 Auch wenn der thematische Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bei strukturellen Veränderungen liegt, erfolgt der Beleg und die Apostrophierung auf die genannten

Ferner wird auch im allgemeinen Sprachgebrauch dem Terminus Alterserscheinung zur Unterstreichung des allmählichen, fast unbemerkt beginnenden Prozesses der Veränderung das Adjektiv 'natürlich' vorangestellt.[322] Damit wird betont, dass dem Altern feine graduelle Veränderungen inhärent sind, welche sich erst mit der Zeit zu einem Merkmal manifestieren. Zugleich wird eine gewisse Unaufhaltsamkeit herausgestellt. BACHMANN erörtert explizit den für die vorliegende Schrift bedeutsamen Zusammenhang zwischen dem Zustand des Kunstwerk und dem Museumsbetrieb. Im Materialgefüge des Kunstwerkes „[…] summiert sich […] [seiner Meinung nach] jede, auch noch so kleine äußere Einwirkung. Das führt schließlich über zunächst unmerkliche Stadien der Veränderung zu einem gewöhnlich überraschend auftretenden, größeren Schaden. Es ist der berüchtigte »Spätschaden«, ein häufiger Versicherungsfall. Die Tücke liegt in der Langsamkeit dieser Entwicklung. Ursache und sichtbare Wirkung liegen zu weit auseinander um noch als zusammenhängend erkannt zu werden."[323] Dieses lässt abermals den Schluss zu, dass sich Alterserscheinungen in fließenden Übergängen mit gegebener Zwangsläufigkeit letztlich zu dem aufsummieren, was dann als Schaden oder Zerfall bezeichnet wird. Dieser stetige Prozess latenter Veränderungen ist in der Konservierungswissenschaft allgemein bekannt.[324] In der Konsequenz entfaltet sich daraus die berufsspezifische, prognostische Arbeit mit der Bestrebung zur Prävention – zum 'Aufhaltenwollen'. Gleichwohl ist es utopisch davon auszugehen, dass eine Objektalterung und damit die Schadensenstehung verhindert werden kann – jedoch ist ein Hinauszögern möglich – das bietet Anlass zur Zuversicht.

Autoren anhand eines besonders aussagekräftigen Beispiels zu fotochemisch induzierten Veränderungen. Von den oben genannten Autoren ist NICOLAUS der einzige, dem in diesem Kontext in Ansätzen eine vergleichsweise systematische Unterscheidung von Schäden und Alterserscheinungen gelingt. So führt der Autor in seinem Standardwerk die Rubriken „Maltechnisch bedingte Alterserscheinungen" [Nicolaus, 1998 , Seite 157] und „Maltechnisch bedingte Veränderungen" [Nicolaus, 1998, Seite 158] auf. Fotochemisch bedingte Veränderungen ordnet er der letztgenannten Gruppe zu. Weiter führt er aus: „Zu diesen maltechnisch und/oder altersbedingten Veränderungen der Malschicht gehören Runzeln, primäres und sekundäres Gilben, Verlust der Deckkraft, Ausbleichen, Verbräunen, Rutschen, Laufen, Craquelé und Krepierung." [Nicolaus, 1998, Seite 158] Im Vergleich zu den anderen genannten Autoren sind seine Ausführungen hier vergleichsweise präzise. So schreibt KÜHN hingegen von „[…] fotochemischen Veränderungen […]" [Kühn, 2001, Seite 325] und setzt dieses mit dem Wort 'Lichtschaden' gleich. [Vergleiche Kühn, 2001, Seite 325] SANDNER ist von vornherein konsequenter und verwendet gänzlich den Terminus 'Schaden', unabhängig ob es sich um Alterserscheinungen oder Schadenmerkmale handelt. [Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 89] Neben der Fachliteratur ist darüber hinaus auch die übliche Ausdrucksweise vergleichsweise unpräzise. Gemeinhin wird von einem 'Lichtschaden' gesprochen, obwohl es sich um eine zeitkritische Veränderung handelt, die eine gewisse Dauer impliziert. So ist der Schädigungsfaktor durch die Energiemenge bestimmt, welche wiederum das Produkt aus der Beleuchtungsstärke und der Beleuchtungsdauer (Lux·Stunde) ist. In Bezug auf die beschriebene Erscheinung wäre der Terminus 'Lichtalterung' daher weitaus treffender. Im Normalfall ist eine solche Veränderung eher durch einen schleichenden Prozess charakterisiert, also eine Alterung, als von einem abrupten Schadensfall. Doch auch diese Feststellung ist einzelfallspezifisch und vergleichsweise vage.

322 Vergleiche: Ulmann, 2004, Seite 28

323 Bachmann, 1997, Seite 201; vergleiche: Schürer, 2004, Seite 92

324 Vergleiche: Krekel & Hein, 2014, Seite 127; Doerner Institut (Klima - Bizot-Gruppe), 2013, Seite 3ff.; Ohne Verf. (Bizot-Statement-Restauratoren), 2012; Kühn, 2001, Seite 9; Schaible, 1990a, Seite 243; Schaible, 1990b, Seite 119; Michalski, 1990b, Seite 241

9. Schadensmerkmale – eine Systematisierung transportbedingter Schadensklassen

Die konservatorische und restauratorische Arbeit setzt umfassende Kenntnisse der Schadensterminologie voraus. Denn erst wenn Schäden als solche erkannt werden, können Sinnzusammenhänge verstanden und kausale Aspekte ergründet werden – eine Grundvorraussetzung für die Prävention einerseits, aber auch die restauratorische Arbeit andererseits. Im Falle eines geplanten Kunsttransportes ermitteln Restauratoren den Erhaltungszustand, beurteilen die konstitutive Transportfähigkeit, benennen Risikofaktoren und leiten entsprechende Maßnahmen zur Prävention ein. Wie gezeigt, ist ihr Urteil dabei grundsätzlich in einem moralphilosophischen aber auch in einem wirtschaftlichen Kontext zu sehen. Hier kann bereits der Hinweis auf ein Gefährdungspotenzial eine Wertminderung bedeuten. Im Rahmen des Leihverkehrs ist es gängige Praxis, dass Restauratoren in einem Leihprotokoll vorausschauend auch jene Bildbereiche markieren, die dem Erfahrungswissen nach einer höheren Gefährdung unterliegen – bspw. im Fall einer aufstehenden Malschicht. Nach einem Transport wird das Objekt im Allgemeinen und die zuvor untersuchten Areale im Besonderen gründlich auf mögliche Schäden untersucht und mit dem dokumentierten Vorzustand verglichen. Auf die unmittelbaren Folgen für den Besitzer, den Kunsthandel, die Transport- und Versicherungswirtschaft ist dementsprechend hinzuweisen.[325,326]

Werden Restauratoren darüber hinaus beim Ankauf von Kunst zu Rate gezogen, so können neben kunstwissenschaftlichen und restauratorischen Argumenten auch materialkundliche Aspekte mit dazu beitragen, einen gemeinsamen, fachlichen und museumspolitisch sinnvollen Entschluss darüber zu fassen, ob oder zu welchem Preis ein Kunstwerk erworben wird.

Wenn die Aussagen der Restauratoren von so weitreichender Konsequenz sind, ist die Frage, wie deren Urteilsfindung erfolgt, bzw. was im konkreten Fall eines Schadens als Bemessungs- und/oder Bewertungsgrundlage dient. Durch den fließenden Übergang bei der Zustandsbeurteilung ist es naheliegend, dass sich ein Interpretationsspielraum eröffnet. Gleichsam wirft das die Frage nach einer nachvollziehbaren Begriffsbestimmung von Veränderungsmerkmalen auf. Diese entsprechende Terminologie muss auch gegenüber Dritten evident sein. Im Zusammenhang zur vorliegenden Arbeit stellt sich die Frage, ob es eine solche Schadensdefinition gibt.

Kunstwerke werden sowohl national als auch über die Landesgrenzen hinaus bewegt. Aufgrund der daraus entstehenden Verbindlichkeit zwischen Eigentümer und Leihgeber ist das Bestehen einer

325 Vergleiche: Dillon u. a., 2013, Seite 45 ff.

326 Die jeweilige Interessenlage ist hier ausschlaggebend – wobei diese durchaus pluralistisch und mitunter auch kontradiktorisch sein kann. So unterliegt ein Kunstwerk bei einem Transport grundsätzlich einem Risiko, welches sich mitunter in Objektveränderungen manifestiert die sich dann wiederum monetär negativ niederschlagen. Neben den Kosten, die mit einer Restaurierung verbunden sind, kann ebenso eine Wertminderung des Werkes verbunden sein. Zugleich kann das Werk durch seine Ausstellung und der damit verbundenen Aufmerksamkeit auch eine Wertschöpfung erfahren.

Fachsprache und eines allgemeingültigen Reglements erforderlich. Dieses muss auch im internationalen Leihverkehr seine Gültigkeit besitzen. Die Existenz einer einheitlichen und mehrsprachigen Terminologie wird als gegeben betrachtet. Der Thesenbeleg ergibt sich aus der praktischen Museumsarbeit und der Tatsache, dass auch im internationalen Leihverkehr eine adäquate Verbalisierung möglich ist. Im Alltag des Kunsbetriebes werden Leihanfragen und Protokolle bearbeitet, länderübergreifende Ausstellungen realisiert, sowie mit international agierenden Transportfirmen und der Versicherungswirtschaft zusammengearbeitet.

In der Tat offenbarte die Literaturrecherche ein konservierungswissenschaftliches Vokabular, dessen Grundbegriffe von BROZIO u. a., BESCH und aktuell von GUTZMER zusammengetragen und in das Englische übersetzt wurden.[327] Diese Zusammenstellung beschränkt sich jedoch auf eine multilinguale Auflistung der Lemmata – ein allgemeingültiges und appraisives Glossar wäre jedoch von weitaus größerer Bedeutung. Ein solches ist bisher, zumindest in der Gemälderestaurierung, inexistent. Bei der Beschreibung von Schäden ist insbesondere im Bereich der Maltechnik und Kunsttechnologie ein Defizit festzustellen. Dieses Problem wurde bereits 2001 erkannt. So wurde in der Konsequenz ein internationales Forschungsprojekt initiiert.[328] Dieses hatte sich der Erstellung eines multilingualen Glossars verschrieben. Der Schwerpunkt lag sowohl auf technischen und maltechnischen Aspekten von Gemälden als auch einer entsprechenden Schadensterminologie. Aus Gründen der Komplexität, die mit einer länderübergreifenden Zusammenarbeit verbunden ist, wurde das Projekt lediglich in Teilen beendet und nicht weiter gefördert. Ein abschließender Projektbericht, bzw. eine Publikation, liegt nicht vor. Lediglich eine entsprechende Projektwebsite verweist auf die vormalige Existenz.[329]

Auch bei der deutschsprachigen konservierungswissenschaftlichen Standardliteratur kann in Bezug auf die Terminologie eine mangelhafte Systematik, Unvollständigkeit und Widersprüchlichkeit festgestellt werden.[330] Anzuführen sind hier die Autoren STRAUB, EIBNER, KÜHN und SANDNER sowie NICOLAUS.[331] Die zitierten Autoren führen zahlreiche eigene Synonyme ein, woraus sich mitunter die Wirrnis der Fachsprache ergibt.[332] Auch werden die Veränderungsmerkmale nicht präzise beschrieben. Dies bezieht sich sowohl auf quantitative

327 Vergleiche: Gutzmer u. a., 2013; Brozio u. a., 2009, Seite 115 ff.; Besch, 1997, Seite 244 ff.

328 Vergleiche: Associazione Giovanni Secco Suardo (LMCR), 2013

329 Da der Autor persönlichen Kontakt zu einem beteiligten Koautor des Projektes hatte (Namentlich: Prof. Volker Schaible, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart), kann im Anhang exemplarisch auf ein Arbeitspapier verwiesen werden. Stellvertretend wird dort der Aufbau und die Struktur des forcierten Glossars anhand der Termini ‚Delle/Beule' vorgestellt (►Kapitel 29.2|). Weitergehende Informationen müssen aufgrund der nicht bestehenden Publikation an dieser Stelle ausbleiben.

330 Dieses ist, auch international, keine neue Erkenntnis. Vergleiche: Bucklow, 1997, Seite 129 und 139

331 Vergleiche: Kühn, 2001; Sandner, 1990; Nicolaus, 1998; Eibner, 1974; Straub, 1963

332 Im Anhang der vorliegenden Schrift wird diese Aussage anhand der Begriffsbildung zur Merkmalsausprägung Craquelé exemplarisch belegt (►Kapitel 29.3|).

Aspekte als auch auf die Beschreibung des visuellen Erscheinungsbildes. Schäden werden oftmals nicht erklärend beschrieben sondern finden ihre Definition über den Verweis zur entsprechenden Abbildung. Prinzipiell kann eine Abbildung gewiss ein wesentlicher Bestandteil einer Merkmalsdefinition sein, dennoch impliziert sie immer eine fallspezifische Konkretisierung. Sie ersetzt damit nicht zwangsläufig die Präzision und zugleich die Verallgemeinerung, die eine Beschreibung in Worten haben kann.[333] Die Autorenangaben widersprechen sich auch bei der Klassifizierung des Veränderungsmerkmals in Alterungserscheinung oder Schaden. Da die Übergänge hier fließend sind, ist jedoch eine individuelle Betrachtungsweise akzeptabel. Wie bereits oben angemerkt ist aber entscheidend, dass sich die Definitionen der verwendeten Termini inhaltlich widersprechen.[334] Zwangsläufig stellt sich daher die Frage, wie das mit der Anforderung zu vereinbaren ist, die sich aus der Notwendigkeit einer einheitlichen und verbindlichen Terminologie für Leihprotokolle und Zustandsberichte ergibt. Alle oben aufgeführten Autoren kombinieren ihre Definitionen mit Ausführungen über die Entstehung der Veränderungsmerkmale. Die Kausalkette ist daher immer zentraler Bestandteil ihrer Definition. Bei der Ursachenerläuterung wird zudem detailliert auf maltechnische Besonderheiten eingegangen. Aufgrund der bestehenden Abhängigkeit zum maltechnischen Fachwissen ist die Definition somit ausschließlich einem entsprechend geschulten Expertenkreis vorbehalten und verständlich. Die zuvor erhobene These zum Vorhandensein einer eindeutig definierten, allgemein verständlichen Begriffsbestimmung über die unterschiedlichen Schadensbilder von Gemälden muss daher als falsch betrachtet werden.[335] Da in der Praxis eine bis dato gültige Schadensbewertung praktiziert wird, muss die zur Urteilsfindung zugrundeliegende Kompetenz der Restauratoren über ein anderes Medium als die Fachliteratur erlangt werden. Hier ist auf die Wissensvermittlung im Rahmen der restauratorische Ausbildung hinzuweisen.[336] Ihr kommt eine besondere Rolle zu, da sie

333 Gleichwohl geben die gezeigten Abbildungen zur Begriffserörterung Craquelé, trotz ihrer Verallgemeinerung im betreffenden Werk, in der Gesamtheit der Fachliteratur betrachtet, einen Eindruck zur Vielfältigkeit der Merkmalsausprägung (►Abb. 245| - Abb. 248|).

334 So führt SANDNER exemplarisch bei der Beschreibung des Craquelé aus: „Die Ränder solcher Risse sind sehr scharf und stehen nach oben [...]." [Sandner, 1990, Seite 81] Dieses Attribut spricht jedoch vielmehr für einen Sachverhalt, welcher im Restaurierungsjargon als 'aufstehende Malschicht' bezeichnet wird. Weiter führt der Autor in diesem Zusammenhang an: „Die entstandenen Farbinseln wölben sich, und auf der Bildoberfläche kann man die Gewebestruktur ablesen." [Sandner, 1990, Seite 81] Letzteres spricht vielmehr für den Terminus 'Schüsselbildung' – so wie sie, oben dargelegt, SCHAIBLE beschrieben hat. Die übrigen Autoren definieren den beschriebenen Sachverhalt Craquelé anders. Die Übergänge zwischen Rissen, 'aufstehender Malschicht', sowie zum Merkmal 'Schüsselbildung' mögen fließend sein – doch legitimiert dieses eine diffuse Schadensterminologie?

335 Auch in den anderen Fachbereichen der Restaurierung wurde der Missstand einer unzureichenden Begriffsbestimmung erkannt. Hieraus entwickelte sich im Bereich der Papierrestaurierung ein Katalog der Schadensbilder welcher im Jahr 2012 von DOBRUSSKIN u. a. vorgelegt wurde. [Vergleiche: Dobrusskin u. a., 2012; und eine Rezension von Theobis, 2013, Seite 5] In diesem Zusammenhang ist auch auf ein laufendes EU-Projekt verwiesen, welchem sich einem Glossar für Fachbegriffe im Bereich der Konservierung und Restaurierung von Wandmalerei und Architekturoberflächen widmet. Vergleiche: Hornemann Institut (Glossar Wandmalerei), 2013

336 Hierüber gibt BUCZYNSKI einen aktuellen Überblick. Vergleiche: Buczynski u. a., 2012, Seite 89 ff.

einerseits die Begriffe determiniert und andererseits als Korrektiv die Bewertungskriterien zur Bemessung von Veränderungen maßgeblich prägt. Mit der Zeit entsteht so durch Theorie und Empirie ein präzises und umfangreiches Fachwissen über Objektveränderungen. Die Merkmalsdefinition ist damit jedoch individuell nuanciert.[337] Eine neutrale und eindeutige Beschreibung von Alters- und Schadensmerkmalen würde jedoch die Nachvollziehbarkeit ermöglichen und grundsätzlich eine größere Transparenz schaffen.[338]

9.1 Schadenskatalog

Aus den genannten Gründen wird ein Diskurs über die Begriffe Schäden, Veränderungen und Alterung von Gemälden vorgenommen – durchaus mit dem Anspruch über die Grenzen der Konservierungswissenschaft hinaus verständlich zu sein. In diesem Zusammenhang steht auch die Aufstellung einer Schadensterminologie mit einer objektiven Merkmalsbeschreibung. Hierbei wird einem bildwissenschaftlichen Ansatz gefolgt, wobei strukturelle Gegebenheiten, bzw. geometrische Oberflächentextur-Merkmale innerhalb der Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Auges behandelt werden. Lichtschäden bleiben unberücksichtigt, da sie mit der Streifenprojektion nicht nachgewiesen werden können.[339] Die Ergebnisse dieser Arbeit sind tabellarisch in einem Schadenskatalog zusammengestellt, welcher die Funktion eines Glossars erfüllt (►Tab. 15|).[340] Das optische Erscheinungsbild des Veränderungsmerkmals dient zur Systematisierung der Schadenklassen und führt zur Formierung der gängigen Terminologie. Dabei wird nicht differenziert, ob es sich um eine Alterserscheinung oder einen Schaden handelt. Eine dementsprechende Unterscheidung würde bereits maltechnische Vorkenntnisse erfordern und wäre daher für Fachfremde nicht nachvollziehbar.[341] Das Schadensbild fungiert als übergeordnetes und gliederndes Element in der gleichnamigen Rubrik. Die Sortierung erfolgt alphabetisch. Die aus der Fachliteratur verwendeten Synonyme werden der Bezeichnung des Veränderungsmerkmals hintenan gestellt.

Bei der Analyse der Schadensbilder konnten Merkmale identifiziert werden, die wiederum Gemeinsamkeiten aufwiesen. Diese ermöglichen eine übergeordnete Klassifikation gemäß der Merkmal Riss,

337 Dieses kann mit ein weiterer Grund dafür sein, dass eine Abgrenzung von Alters- und Schadensmerkmalen ausbliebt.

338 Als exemplarisch, skizzierende Lösungsvariante ist auf den nachvollziehbaren und vergleichsweise systematischen Ansatz von WAGNER zur Beschreibung von Glasschäden zu verweisen. Vergleiche: Wagner, 2008

339 An dieser Stelle wird auf die entsprechend Fachliteratur hingewiesen. Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 53ff., 178 und 324 ff.; Nicolaus, 1998, Seite 82 und 159 ff.; Sandner, 1990, Seite 89 ff.

340 Diese Arbeit erfolgte komplett in Zusammenarbeit mit Herrn Michael Morawitz vom Institut für technische Optik der Universität Stuttgart Vahingen.

341 Um aus restauratorischer Sicht einen möglichst umfassenden Informationsgehalt zu gewähren, werden Veränderungen, die als maltechnische Fehler gelten, in der Tabelle als solche kenntlich gemacht. Zugleich wird sich aus Gründen der Vereinfachung ausschließlich des Terminus Schaden bedient.

Hohlstelle und Topografieveränderung. Die systematisierte Aufgliederung erfolgt über eine Beschreibung in einer separaten Tabelle der Grundschadensarten (►Tab. 14|).[342]

Grundschadensart	Beschreibung
Riss	Gerichteter, partieller Haftungsverlust innerhalb einer Struktur, entlang einer Vorzugsrichtung
Bruch	Ähnlich dem Riss, jedoch ohne gemeinsame Haftungsbereiche – Separation. Bruchkanten verlaufen durch das gesamte Gefüge beziehungsweise die Schichten
Schichtentrennung / Delamination	Haftungsverlust entlang einer vorhandenen Grenzfläche
Hohlstelle	Grenzfläche in einer Struktur mit eingeschlossenem Volumen (Hohlraum, Tunnel). Einzige Schadenart, die sich nicht zwangsläufig in einer Veränderung der optischen Oberfläche äußert.
Topografieveränderung	Gestaltsabweichung von der Idealform der Oberfläche (mit Ausnahme Riss)
Fehlstelle	Lokal begrenzte Oberflächenveränderung die sich in einem Substanzverlust äußert
Verformung	Lokale/globale Oberflächenstrukturveränderung, ohne Bruchgrenze erreicht zu haben (geschlossene Oberfläche)
Verschmutzung	Ablagerung von Fremdsubstanz auf der Oberfläche

Tab. 14| Die in der Gemälderestaurierung gebräuchlichen Schadensbilder weisen übereinstimmende Merkmale auf. Diese lassen sich anhand von drei Grundschadensarten und deren Untergruppen beschreiben.
Quelle: Selbst

Im Schadenskatalog werden diese übergeordneten Merkmale unter der Rubrik 'Grundschadensart' geführt, die bei Merkmalsübereinstimmung mit dem Schadensbild durch ein 'X' gekennzeichnet sind. Als ein weiteres Ordnungskriterium wird die Bildträger-Gattungen bestimmt, die hierorts auf 'Gemälde auf textilem Träger' und 'Tafelgemälde' eingegrenzt wird. Da eine Abhängigkeit zu bestimmten Schadensbildern besteht, wird unter der Rubrik 'Bildträger' eine Zuweisung der Attribute 'starr' und/oder 'flexibel' vorgenommen.[343] Eine weitere Rubrik der Tabelle umfasst die Angabe, ob ein spezifisches Schadensbild hinsichtlich seiner räumlichen Ausprägung tendenziell 'lokal' begrenzt ist und/oder vergleichsweise 'global' in Erscheinung tritt. Entsprechende Angaben beziehen sich auf die malschichtseitige Oberfläche des Gemäldes im Ganzen.[344] Einschränkend muss angemerkt werden, dass aufgrund feiner gradueller Übergänge der Schadensbilder eine Merkmalsklassifikation unter dieser Rubrik immer auch mit einer subjektiven Wertung verbunden ist – ein Umstand der sich nicht ausräumen lässt. Kongruent verhält es sich mit Schadenphänomenen, die charakteristische Merkmale mehrerer Schadensbildern aufweisen. Da es sich in der Regel um komplexe und gealterte Materialgefüge handelt, ist eine eindeutige Abgrenzung oftmals nicht möglich.[345] Neben der aufgezeigten Systematisierung und Klassifikation ist ein zentraler Bestandteil des Kataloges die präzise

342 Beispielhaft ist auf die Schadensart ‚Bruch' zu verwiesen. Entsprechend der Bruchmechanik muss einem ‚Bruch' immer ein ‚Riss' voraus gegangen sein, sodass die vorgenommene Klassifikation stringent ist.

343 Exemplarisch ist das Schadensbild ‚Aufgegangene Brettfuge' eindeutig nur auf ein Holztafelgemälde einzugrenzen, es muss mindestens aus zwei miteinander verleimten Brettern bestehen.

344 Die Merkmalsklassifikation bei der Rubrik ‚Räumliche Ausprägung' unterliegt aufgrund gradueller Übergänge einer subjektiven Wertung.

345 Dieses trifft bspw. bei der Beschädigung durch Hitzeeinwirkung zu. Hier kann der Übergang von Runzel zur Brandblase kontinuierlich erfolgen, bzw. eine Merkmalskombination vorliegen.

Deskription der einzelnen Schadensmerkmale unter der Rubrik 'Beschreibung'. Die Merkmalsbeschreibungen sind dem Grundsatz nach von maltechnischen Vorkenntnissen losgelöst. Der Schwerpunkt liegt auf der geometrischen Beschreibung struktureller Merkmalsausprägungen. Dabei muss eingeräumt werden, dass diese nicht gänzlich von kausalen Aspekten gelöst werden kann. So ist zum Beispiel die Richtung aus der eine Kraft auf das Gefüge wirkt unter Umständen verständnisrelevant – was ihre Berücksichtigung in der Rubrik 'Ursache' bei der Beschreibung rechtfertigt.[346] Darüber hinaus beweist sich der Vektorraum als effektive Methode zur Beschreibung der geometrischen Sachverhalte.[347] Hierzu wird eine Modellbildung vorgenommen, in der das Gemälde zur Ebene simplifiziert wird, bzw. zu einem Verbund paralleler Ebenen, stellvertretend für den Schichtenverbund.[348] Laterale Merkmalsausprägungen in der Bildebene können auf diese Weise treffend beschrieben werden. Da es sich bei einem Gemälde um ein dreidimensionales Objekt handelt, weisen die Schadensbilder jedoch auch immer Merkmalsausprägungen quer zum Schichtenverbund auf. Dieser Sachverhalt wird näherungsweise mit Hilfe idealisierter Normalenvektoren beschrieben. Merkmale, die dem Betrachter entgegen gerichtet sind, lassen sich durch Vektoren in positive Normalenrichtung beschreiben, wohingegen entgegengesetzte Schadensmerkmale vice versa über Vektoren in negative Normalenrichtung ausgedrückt werden können. Da Schadensbilder auch in einem kausalen Zusammenhang stehen, können sich Folgeschäden anschließen. In einer von der Beschreibung separierten Rubrik

346 Verwiesen ist an dieser Stelle exemplarisch auf die sonst schwierige Unterscheidungsmöglichkeit zwischen den Schadensbildern ‚Beule' (Krafteinwirkung auf die Gemälderückseite) und ‚Delle' (Krafteinwirkung auf die Gemäldervorderseite).

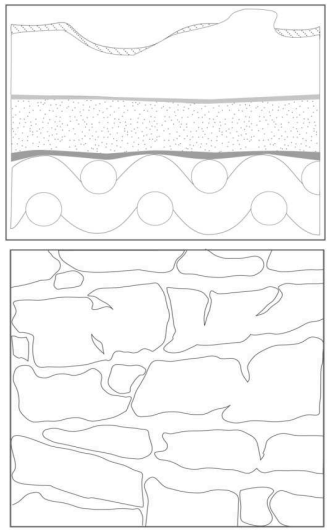
347 Davon abweichend wird für die vorliegende Arbeit grundlegend definiert, dass die Beschreibung eines Objektes im dreidimensionalen Raum in Anlehnung an die Grundlagen kartesischer Koordinatensysteme erfolgt, wobei die Achsenorientierung als mathematisch rechtshändig festgelegt wird. In Bezug auf die Abmessung wird bei einem Hochformat die längste Seite eines Objektes als Höhe definiert; die mathematische Beschreibung im Koordinatensystem wird durch Y-Werte ausgedrückt. Die Beschreibung der zweitlängsten Seite wird als Breite definiert, die mathematische Bestimmung erfolgt durch X-Werte; während die kürzeste Seite als Tiefe festgelegt und zugleich durch Z-Werte mathematisch beschrieben wird. Bei Gemälden im Querformat erfolgt die Angaben der Abmessungen analog zu der oben gemachten Abfolge von Höhe x Breite x Tiefe, wobei dieses dann nicht in Korrelation zur Kantenlänge stehen. Diese Festlegung ist der musealen Arbeitsweise geschuldet. Gewohnheitsgemäß werden dort die Abmessungen von Kunstwerken immer in der Reihenfolge: Höhe x Breite x Tiefe angegeben. Dieses findet sich in Leihprotokolle, bei Beschriftungstafeln, bei Katalogangaben, in Restaurierungsdokumentationen und in der Bemaßung von Verpackungen). Vergleiche: Ohne Verf. (Arbeitsgemeinschaft der Kunst und Museumsbibliotheken (Objektabmessungen)), 2012, und Ohne Verf. (AXA ART Versicherung AG), 2013
Es handelt sich bei der obigen Festlegung nicht um eine Normierung vielmehr um eine sinnvolle Vereinbarung. Generell ist die Reihenfolge der Angabe von Maßeinheiten nicht standardisiert. Bei der DIN-Norm für Papierformate wird bspw. zunächst die Breite und dann die Höhe angegeben. Vergleiche: Ohne Verf. (DIN 476), 2013

348 Der Begriff ‚Schichtengefüge' bezeichnet nach eigener Definition das Gesamtgefüge eines Gemäldes, also den kompletten Schichtenaufbau inklusive des Bildträgers. In Abgrenzung dazu bezeichnet der Begriff ‚Bildschichtengefüge' den Malschichtaufbau, also den kompletten Schichtenaufbau eines Gemäldes mit Ausnahme des Bildträgers. Im Rahmen des zugrundeliegenden Projektes erforderte die Zusammenarbeit mit beteiligten Physikern diese eindeutigen Definitionen. Gleichwohl sei angemerkt, dass es sich bei dem Schichtenaufbau abermals um eine modellhafte Vorstellung handelt. Auch wenn der Terminus ‚Farbschicht' eine flächenhafte, gleichmäßige Ausdehnung der Malfarbe suggeriert, trifft dieses aufgrund der Mischung verschiedener Farben, in teils konfuser Anordnung, und/oder einer Maltechnik ‚nass in nass', im Regelfall nicht zu. In diesem Kontext ist auf die Definition von NICOLAUS verwiesen. Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 384 ('Bildschicht') und 388 ('Malschicht')

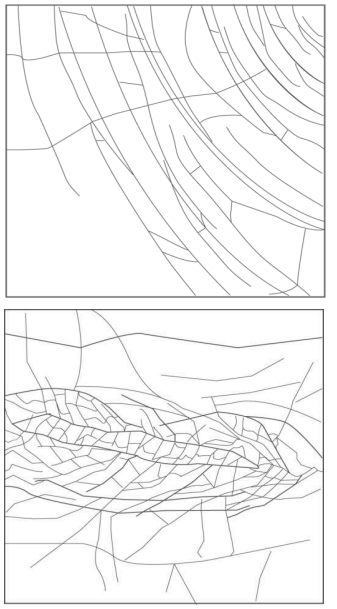
'Folgeschäden' wird auf eine mögliche, sich bedingende Ereigniskette Bezug genommen. Über die Rubrik 'Vergleiche/Referenzen' wird der Verweise auf die Fachliteratur erbracht.[349] Zu jedem Schadensbild ist aus Gründen der Veranschaulichung eine Grafik beigefügt.[350] Dabei wird aus didaktischen Gründen als Darstellungsform der Querschnitt durch das Schichtengefüge gewählt.

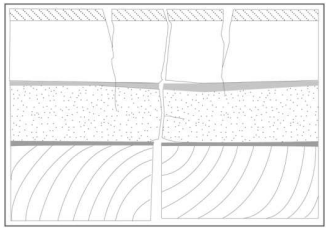
349 Bei den Literaturangaben wird sich hauptsächlich auf die bereits zitierten Handbücher und die Standardliteratur bezogen. Die aufgeführten Autoren sind über die Aktualität ihrer Publikationen gegliedert.

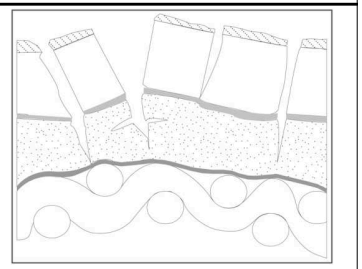
350 Die Grundlagenarbeit erfolgte in Zusammenarbeit mit Andrea Hedenström, und die hier gezeigte grafische Umsetzung wiederum in Zusammenarbeit mit Stella Overmann.

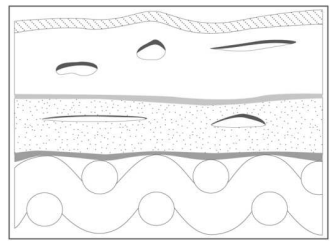
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
01	Abrutschen und Laufen von Ölfarben	×			Starr / Flexibel	Lokal	Schadensbild: Das Schadensbild begrenzt sich auf die Malschicht und ist nur bei der Ölmalerei festzustellen. Es handelt sich um eine Riss-/Bruchkombination, die sich auf die Malschicht begrenzt. In positiv Normalenrichtung liegt eine Bruchbildung vor, wohingegen die laterale Schadensausprägung sowohl von Brüchen als auch von Rissen gekennzeichnet sein kann. Das Schadensbild ähnelt dem von Frühschwundrissen. Jedoch stehen hierbei nicht die Farbinseln mit ihren runzeligen, nicht glatten Risskanten als wesentliches Merkmal im Fokus, sondern vielmehr ein global angelegtes Schadensbild in Form des Abrutschens ganzer Malschichtpartien. Hierbei besteht eine, durch die Gravitationskraft vorgegebene, laterale Vorzugsrichtung. Aus dieser resultiert gleichzeitig, dass die horizontal ausgerichteten Risse oftmals sehr viel breiter sind als die vertikalen. Im Rissbereich der Malschicht kann die Grundierung sichtbar sein, da die Malschicht für gewöhnlich auf ihr entlang gleitet. Weiter können sich beim Abrutschen von Malschichtpartien diese gestaucht übereinander schieben. Somit kann sich im unteren Bereich (bei senkrechter Betrachtung eines Gemäldes) des Schadensbildes eine runzelige Oberfläche bilden. Darüber hinaus weist das Schadensbild im Regelfall eine Abhängigkeit zur Farbigkeit auf: Besonders dunkle Farben sind hiervon betroffen (z.b. braunen Asphaltfarben des 19. Jh.). Ursache: Temporäre Trocknung bei Farben mit thermoplastischen Eigenschaften. Durch ihre Erwärmung, beispielsweise durch die Bestrahlung mit insbesondere infrarotem Licht (Sonne, Scheinwerfer bei Foto-/Filmaufnahmen), wird die Viskosität herabgesetzt, sodass die Malschicht aufgrund der Schwerkraft anfangen kann abzurutschen.	- Runzelbildung	- KÜHN 2001, S. 53 - EIBNER 1974, S. 40	

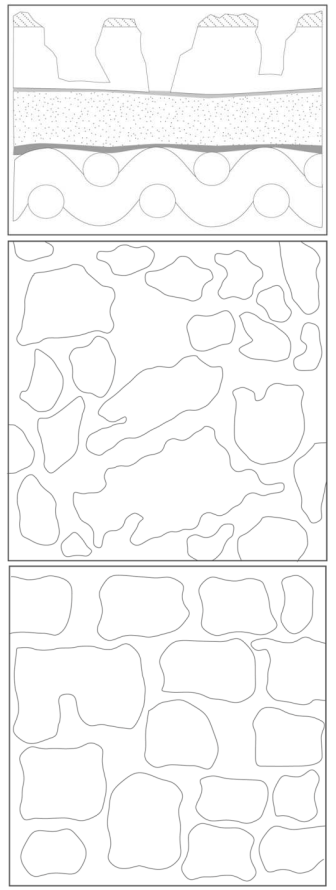
Tab. 15| [ebenso folgend] Systematisierung transportbedingter Schadensklassen.
Quelle: Michael Morawitz, selbst

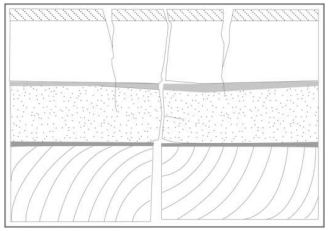
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
02	Ährensprung	×			Flexibel	Lokal	Schadensbild: Das Schadensbild charakterisiert sich anhand einer Riss-/Bruchkombination des Bildschichtengefüges. Das Merkmal beschränkt sich ausschließlich auf die Bildecken, wobei die Vorzugsrichtung durch einen eindeutigen, diagonalen Verlauf gekennzeichnet ist. In Kombination hierzu sind teilweise kleine querverlaufende Risse/Brüche festzustellen. Visuell entsteht somit auf der Malschichtseite ein ährenförmiges Sprungnetz. Ursache: Für dieses Schadensbild sind mechanische Kräfte ursächlich. Sie können durch das Auskeilen hervorgerufen worden sein.	- Schollenbildung - Fehlstelle		

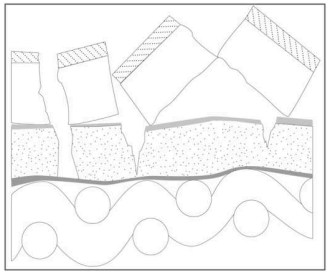
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
03	Aufgegangene Brettfuge	×			Starr (Holztafel, mehrere Bretter)	Global	Schadensbild: Riss/Bruch des Bildschichtengefüges in negative Normalenrichtung in Kombination mit einer lateralen Rissbildung. Dabei gibt es eine Vorzugsrichtung, welche durch die bestehenden Grenzflächen der Brettfuge bestimmt wird. Ursache: Verursacht durch einen Bindemittelabbau und/oder aufgrund der Einwirkung mechanischer Kräfte. Auch klimatische Faktoren können zu diesem Schadensbild führen.	- Rissbildung - plastische Verformung des Schichtenverbund - Schollenbildung - Fehlstelle	- KÜHN 2001, S. 24 - NICOLAUS 1998, S. 51	

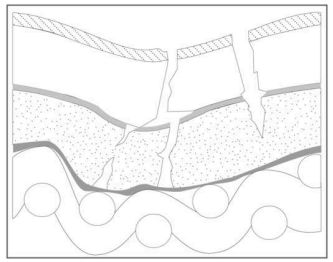
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
04	Beule			×	Flexibel	Lokal	Schadensbild: Das Schadensbild äußert sich in einer lokal begrenzten, konvexen Verwölbung eines ansonsten vergleichsweise planen Schichtenverbunds in positiv Normalenrichtung. Analog dazu gibt es auch auf der Rückseite die entsprechende Ausformung in positiv Normalenrichtung. Ursache: Verursacht durch eine Kraftkomponente in positive Normalenrichtung als Resultat einer Belastung des Gefüges zum Beispiel durch Druck auf die Rückseite. Als Sonderform siehe Schmutztasche.	- Rissbildung (Spinnennetz Rissbildung) - Schollenbildung - Fehlstelle	- KÜHN 2001, S. 35 f. - NICOLAUS 1998, S. 100 - REHBEIN u. a., 1987, S. 256 f.	

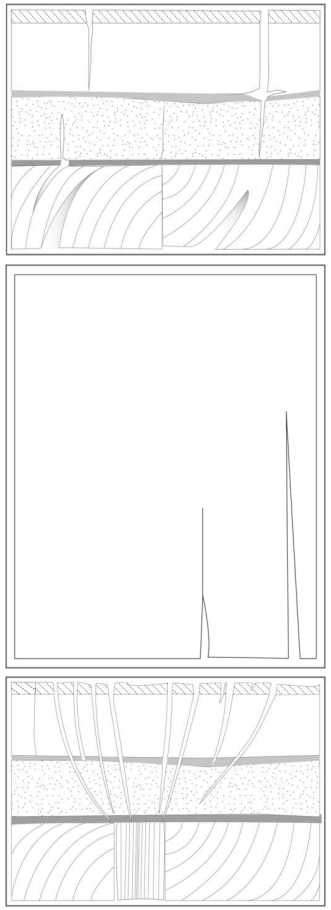
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
05	Blase	×	×	×	Starr / Flexibel	Lokal	Schadensbild: Lokal begrenzte, konvexe Vorwölbung eines ansonsten vergleichsweise planen Schichtenverbunds. Die Verformung äußert sich in positiv Normalenrichtung mit einer charakteristischen Hohlraumbildung. Die Merkmalsausprägung der Blasenart kann in Bezug zu ihrer räumlichen Ausrichtung und Form in Abhängigkeit zu strukturellen Besonderheiten des Bildträgers stehen (Holzanatomie/Webart). Ursache: Bedingt durch das unterschiedliche, hygroskopische Verhalten der verwendeten Werkstoffe und dem maltechnischen Aufbau können bei klimatischen Schwankungen oder einem Wasserschaden Spannungen im Schichtenverbund des Gemäldes entstehen. An Schwachpunkten, oftmals entlang vorhandener Grenzflächen, kann es dann zu einer Materialermüdung kommen, die sich in einer partiellen Verformung äußert. Darüber hinaus kann eine chemische Degradation einzelner Werkstoffe die Entstehung des Schadensbildes begünstigen. Einen Sonderfall stellen die durch große Hitzeeinwirkung verursachten Brandblasen dar. Sie treten oftmals in Formation, entsprechend der thermischen Einwirkung, auf.	- Rissbildung - plastische Verformung des Schichtenverbundes - Dachförmig aufstehende Malschicht - Schollenbildung - Fehlstelle Brandblase in Kombination: - Runzeln - Blasenbildung - Aufplatzen und Verkohlungen - Fehlstelle	- KÜHN 2001, S. 41 f. - NICOLAUS 1998, S. 189, (384) - SANDNER 1990, S. 66, 76, 92 f., 127, 228, 265, 277 - EIBNER 1974, S. 40 - STRAUB 1963, S. 116	

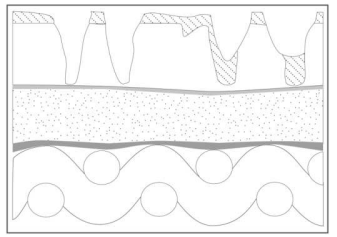
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
06	Borken- und Schorfbildung, (Krokodilshaut)	×		×	Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Das Schadensbild ist eine Kombination der Schadensbilder Frühschwundrisse und Runzel. Ähnlich dieser liegt eine meist netzartig ausgeprägte Riss-/Bruchbildung der Farbschichten in negativ Normalenrichtung mit einer Risskombination in lateraler Vorzugsrichtung vor. Letztere ist von runzeligen, welligen, nicht glatten Risskanten bestimmt. Ein weiteres, wesentliches Merkmal ist eine runzelige Oberfläche der Farbschicht. Diese äußert sich in feinen, faltigen, welligen Aufwerfungen der Farbschicht in positiv Normalenrichtung. Die schorfähnliche Faltung kann in Bezug auf den Falten- und Rissverlauf teilweise eine Vorzugsrichtung aufweisen, welche sich durch die Wirkung der Schwerkraft begründet. Eine Sonderform ist das Schadensbild der Krokodilshaut, bei dem die lateral ausgeprägten Risse tendenziell von einem geradlinigen Kantenverlauf bestimmt sind – ähnlich einer Krokodilhaut. Das Schadensbild kommt ausschließlich bei ölgebundenen Farbschichten vor. Es hat seinen Ursprung ausschließlich in der Bildentstehung und ist auf den künstlerischen Schaffensprozess zurückzuführen. In Abgrenzung zu einigen Autoren wird diese Merkmalsausprägung daher nicht als Schaden im eigentlichen Sinne verstanden, sondern als maltechnischer Fehler klassifiziert. Zur Vollständigkeit des Kataloges wird diese Merkmalsausprägung jedoch mit aufgeführt. Ursache: Ursächlich für dieses Schadensbild ist die Menge und die Qualität des Bindemittels. Auch vorhandene Sikkative können die Merkmalsausprägung maßgeblich mit beeinflussen. Im Zuge der Öltrocknung findet aufgrund der Sauerstoffaufnahme eine Volumensvergrößerung statt, welche so gravierend sein kann, dass sich die Malschicht in Falten legt.		- KÜHN 2001, S. 53 - BRACHERT 1995, S. 53 - SANDNER 1990, S. 79 f, 85 - EMONTS-HOLLEY & ALTHÖFER 1987, S. 263 - EIBNER 1974, S. 34 ff	

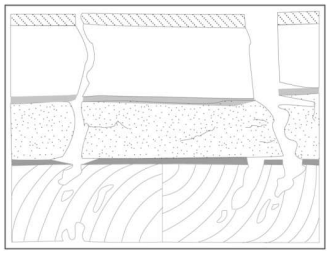
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
07	Bruch (Bildträger)	×			Starr	Global	Schadensbild: Separation des kompletten Schichtenverbunds durch Bruch in laterale und negative Normalenrichtung. Der Schichtenverbund liegt daraufhin in Teilen vor. Generell ist eine eindeutige Vorzugsrichtung festzustellen. Diese ist durch strukturelle Gegebenheiten des Bildträgers vorgegeben (Faserverlauf). Ursache: Einwirkung einer mechanischen Kraft.	- Rissbildung - plastische Verformung des Schichtenverbundes - Schollenbildung - Fehlstelle	- SANDNER 1990, S. 307 ff.	

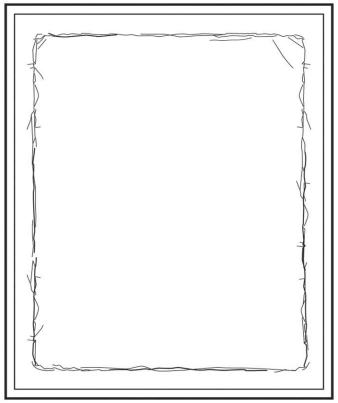
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
08	Dachförmig aufstehende Malschicht, Abblättern der Malschicht In der Fachliteratur wird für dieses Schadensbild das Synonym 'Dachförmig aufstehende Malschicht / abblätternde Malschicht' verwendet. Dieses ist insofern irreführend, da die Schichtentrennung oftmals zwischen Bildträger und Grundierung verortet ist. Daher ist anstelle der Malschicht der allgemeinere und hier verwendete Begriff des Bildschichtengefüges bzw. des Malschichtaufbaus treffender.	×		×	Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: (Der Tendenz nach eher bei Gemälden auf hölzernen Bildträgern zu finden. Im Gegensatz zu Gemälden auf Textil ist auf das Schadensbild Schüsselbildung zu verweisen.) Bruch des Bildschichtengefüges in negativ Normalenrichtung in Kombination mit einer lateralen, teilweise netzartigen Riss-/Bruchbildung. Gleichzeitig liegt eine partielle Schichtentrennung vor, welche für gewöhnlich zwischen Bildträger und Grundierung verortet ist. Ein weiteres Merkmal besteht darin, dass sich das Bildschichtengefüge geschlossen und phalanx-ähnlich als kleine Schollen zu Giebeln in positiv Normalenrichtung gegeneinander aufgeworfen hat. Tendenziell weist der dachförmig aufstehende Malschichtaufbau eine laterale Vorzugsrichtung auf. Diese steht im Zusammenhang mit der strukturellen Beschaffenheit des Bildträgers (Holzanatomie/Webart). Im Bruchbereich können sich zudem Teile des Malschichtaufbaus in positiv Normalenrichtung überlappend übereinander geschoben haben. Letzteres spricht dann tendenziell eher für das Schadensbild mit dem Synonym 'abblätternde Malschicht', wobei hier die Übergänge vollkommen fließend Ursache: Ursächlich sind klimatische Einflussfaktoren die zu einer Dimensionsänderung der im Gemälde verwendeten Werkstoffe führen. Aus den unterschiedlichen hygroskopischen Eigenschaften und einer möglichen Kombination mit anisotropem Verhalten kann es zu Spannungen im Schichtenverbund kommen. Zur Merkmalsausprägung des Schadens muss einerseits eine Schrumpfung des Bildträgers vorliegen und andererseits die Vorraussetzung erfüllt sein, dass der Malschichtaufbau dieser Schrumpfung nicht folgt. Aus den sich ergebenden Spannungen resultiert zunächst die Riss-/Bruchbildung, die Delamination im Schichtengefüge und dann ein sich gegeneinander Aufwerfen des Malschichtaufbau. Ein möglicher Bindemittelabbau kann die Schadensentstehung zusätzlich begünstigen.	- Rissbildung - Schüsselbildung - Schollenbildung - Fehlstellen	- KÜHN 2001, S. 42, 54 - NICOLAUS 1998, S. 189, 192, 194 f. - SANDNER 1990, S. 93, 108, 228, 278 ff. - BOISSONNAS & ALTHÖFER 1987, S. 268 ff. - STRAUB 1963, S. 116 f.	

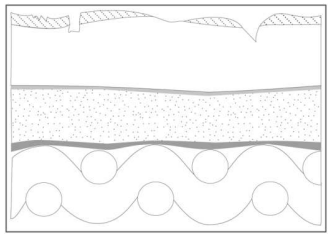
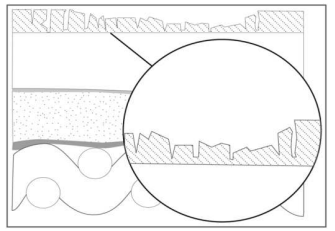
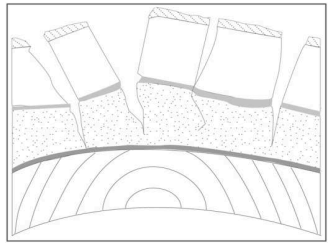
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
09	Delle			×	Flexibel / (Starr)	Lokal	Schadensbild: Das Schadensbild äußert sich in einer lokalen, konkaven Oberflächenverformung (Verwölbung) eines ansonsten vergleichsweise planen Schichtenverbundes in negativ Normalenrichtung. Analog dazu gibt es auf der Rückseite die entsprechende negative Ausformung. Auch bei Holzbildträgern kann dieses Schadensbild vorliegen, gleichwohl ist dann die Beschädigung vergleichsweise gravierend, da dann auch eine partielle Stauchung in negativ Normalenrichtung des Bildträgers vorliegt. Ursache: Resultat einer mechanischen Belastung des Gefüges in negativ Normalenrichtung. (Stoß von der Vorderseite).	- Rissbildung (Spinnennetz Rissbildung) - Schollenbildung - Fehlstelle	- NICOLAUS 1998, S. 100, 179 - SANDNER 1990, S. 103	

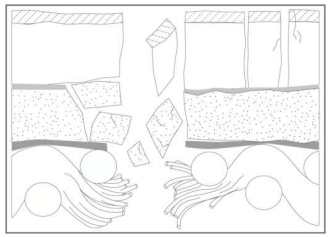
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
10	Einläufer	×			Starr	Global	Schadensbild: Die hauptsächliche Merkmalsausprägung ist gekennzeichnet durch eine lateral verlaufende Riss-/Bruchkombination durch den gesamten Schichtenverbund mit einer eindeutigen Vorzugsrichtung. Zudem besteht eine anteilige Rissausbreitung in negativ Normalenrichtung. Die Vorzugsrichtung des Risses wird durch strukturelle Besonderheiten des Bildträgers bestimmt. Der Ausgangspunkt dieses Schadensbildes ist immer an der Stirnseite des Bildträgers verortet. In Abgrenzung zum Bruch des Bildträgers liegt er jedoch nicht geteilt vor. Einen Sonderfall stellt ein vom Grenzflächenbereich eines Astloches ausgehender Riss dar. Hier ist der Ausgangspunkt nicht zwangsläufig auf die Stirnseiten beschränkt. Ursache: Ursache für dieses Schadensbild sind Klimaschwankungen, die zu Quell- und Schwundbewegungen des Bildträgers führen. Wird der Bildträger während der Klimaschwankung an seiner Bestrebung zur Bewegung gehindert (z.B. unsachgemäße Montierung im Zierrahmen, rückseitige Parkettierung o. Ä.), so können die daraus resultierenden Spannungen im Gefüge zu den beschriebenen Schäden führen.	- Rissbildung - Schollenbildung - Fehlstelle	- KÜHN 2001, S. 24 ff - NICOLAUS 1998, S. 46 - SANDNER 1990, S. 197, 219 f. - STRAUB 1963, S. 140, 157	

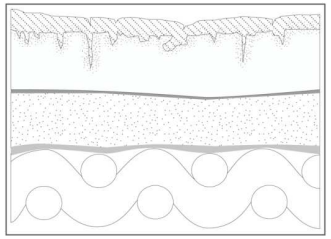
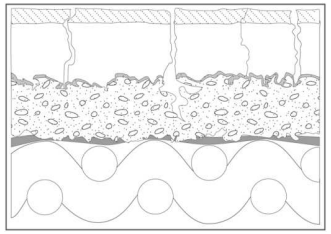
	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
11	Frühschwundrisse	×			Starr / Flexibel	Global	Schadensbild: Riss-/Bruchbildung der Farbschichten in negativ Normalenrichtung bei gleichzeitiger, netzartig ausgeprägter Rissbildung in lateraler Richtung. Die lateralen, runzeligen, welligen, nicht glatten Risskanten entsprechen der Vorzugsrichtung und charakterisieren gleichzeitig die optische Merkmalsausprägung. Dabei müssen nicht zwangsläufig Knotenpunkte der Risse vorliegen. Lediglich ihre periodisch erscheinende Anordnung ist Voraussetzung. Bei besonders charakteristischen Frühschwundrissen kann bei der Betrachtung aus Normalenrichtung im Bruchbereich der Malschicht die Grundierung sichtbar werden. Genau genommen liegt hier dann eine Bruchbildung vor. Das Schadensbild tritt vorzugsweise bei Ölfarbschichten auf, kann jedoch in Sonderfällen auch bei dicken Schichten mit anderen Bindemittelsystemen vorkommen. Das Schadensbild hat seinen Ursprung ausschließlich in der Bildentstehung und ist auf den künstlerischen Schaffensprozess zurückzuführen. In Abgrenzung zu einigen Autoren wird diese Merkmalsausprägung daher nicht als Schaden im eigentlichen Sinne verstanden, sondern als maltechnischer Fehler klassifiziert. Zur Vollständigkeit des Kataloges wird diese Merkmalsausprägung jedoch mit aufgeführt. Ursache: Die Ursache für dieses Schadensbild ist vergleichsweise komplex. Zur Erklärung werden in der Fachliteratur verschiedene Modelle dargelegt. Der maltechnische Fehler steht in Abhängigkeit zur geometrischen Lage einzelner Bildschichten im Verhältnis zum Bildschichtengefüge und den daraus resultierenden, unterschiedlichen Trocknungsbedingungen. Während der Bildentstehung kann es vorkommen, dass verschiedene Malschichten übereinander gelegt werden, ohne dass die zuunterst liegenden Partien bereits getrocknet sind. Die zuoberst liegende Schicht trocknet, erhärtet und behindert währenddessen die darunter liegenden Schichten. Trocknen diese hingegen später, so kann die mit der Trocknung verbundene Volumensveränderung zum Reißen der bereits zum Film ausgebildeten oberen Schicht führen. Grundsätzlich kann dieser maltechnische Fehler auch bei sehr dick aufgetragenen homogenen Schichten vorkommen. Ein Sonderfall sind Frühschwundrisse in Grundierungen. In einer dicken Kreidegrundschicht kann es zu einer oberflächlichen Trocknung und Filmbildung kommen, wohingegen das darunter liegende Gefüge noch nicht getrocknet ist. Trocknet letzteres, so entstehen aufgrund der Schwundspannungen oberflächliche Spannungsrisse.	- Krokodilshaut, Borken- und Schorfbildung - Runzeln	- KÜHN 2001, S. 53 - NICOLAUS 1998, S. 167 ff. - SANDNER 1990, S. 84 f - FOISSNER & ALTHÖFER 1987, S. 272 ff. - EIBNER 1974, S. 15 ff	

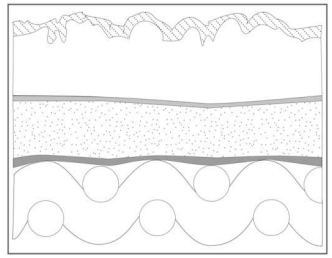
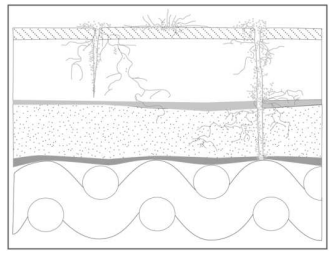
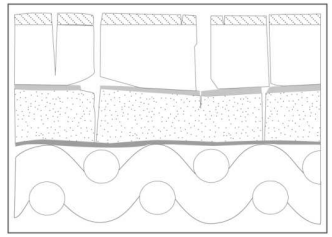
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
12	Insektenbefall (Holzwurmfraß)		×		Starr	Lokal / Global	Schadensbild: Die Merkmalsausprägung charakterisiert sich durch einen Substanzverlust im Gefüge des Bildträgers. Der durch den Insektenbefall verursachte Fraßgang weißt die Form eines Tunnels auf. Vorzugsweise sind diese lateral orientiert. Vereinzelt sind oberflächlich Ausfluglöcher festzustellen. Ihr Durchmesser hängt von der Schädlingsart ab. Ursache: Insektenbefall	- Fraßgänge nahe der Oberfläche: Gefahr des Einbrechens der Bildschichten - Rissbildung - Schollenbildung - Fehlstellen - gesteigerte Bruchgefahr	- KÜHN 2001, S. 20, 245 - SANDNER 1990, S. 228, 235 ff., 284 f. - NICOLAUS 1998, S. 28 , 70, 219 - STRAUB 1963, S. 125	

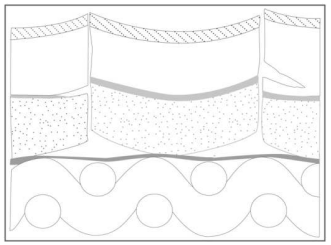
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
13	Keilrahmensprung	×			Flexibel	Lokal	Schadensbild: Rissbildung im Bildschichtengefüge, parallel verlaufend zu den Innenkanten der Keilrahmenschenkel. Die Rissbildung verläuft lateral, bei gleichzeitiger Riss-/Bruchkombination des Bildschichtengefüges in negativ Normalenrichtung. Bei vorhandenem Mittelkreuz/Querleiste kann sich auch dieses entsprechend vorderseitig abzeichnen. Ursache: Der Keilrahmensprung kann als eine Unterkategorie von Alterssprüngen betrachtet werden. Ursächlich ist oftmals eine mechanische Bewegung des Bildträgers. Bei Schwingungen desselben kann der von den Rahmenschenkeln hinterfütterte Teilbereich nicht schwingen, wohingegen der unverdeckte Bereich frei schwingt. Im Grenzbereich kann es dann aufgrund der mechanischen Belastung, insbesondere bei sprödem Gefüge, zu einer Riss-/Bruchkombination des Bildschichtengefüges kommen. Eine weitere Ursache können klimatische Faktoren sein. Durch den vom Rahmenschenkel verdeckten Bereich des Schichtengefüges kommt es global gesehen zu einer unterschiedlichen Reaktion des Schichtenverbundes auf Klimaschwankungen. In Bezug auf Konvektionsströmungen geht vom Rahmenschenkel eine puffernde Wirkung aus. Im Grenzbereich kann es daher zu Spannungen mit folgender Riss-/Bruchbildung kommen. Daraus begründet sich zugleich die Notwendigkeit eines Rückseitenschutzes.	- Rissbildung - Schollenbildung - Fehlstellen	- NICOLAUS 1998, S. 72, 75, 88, 178, 180 f. - BRACHERT 1995, S. 52 - SANDNER 1990, S. 77, 86, 91	

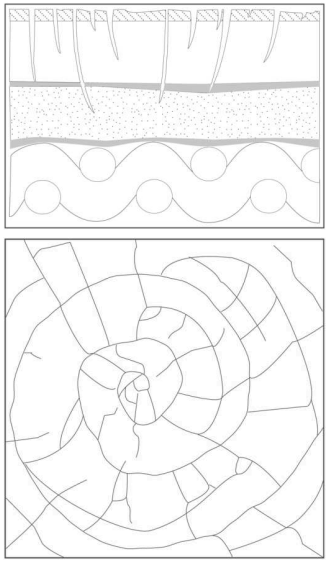
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
14	Kratzer			×	Starr / Flexibel	Lokal	Schadensbild: Beschädigung der Malschichtoberfläche in negativ Normalenrichtung in Kombination eines eindeutig lateralen, linear gerichteten Materialabriebs (Fehlstelle und/oder Rissbildung), beziehungsweise eine Verdichtung als Vertiefung (Verformung). Auch ein Auftrag von Fremdsubstanz in positiv Normalenrichtung ist möglich. Liegt dieses Schadensbild tendenziell flächenhaft vor, so kann der Terminologie nach auch von einer Scheuerstelle/Bereibung gesprochen werden. Ursache: Einwirkung mechanischer Kräfte durch einen Fremdkörper mit eindeutig lateralem Richtungsbezug.	- Rissbildung - Schollenbildung - Fehlstelle		
15	Krepieren	×	×		Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Trübung, Milchigwerden beziehungsweise Undurchsichtigkeit eines Firnisses und/oder der Farbschichten durch Mikrorisse mit vorzugsweise lateraler Richtungsausprägung. Letztere sind kleiner als die Auflösungsgrenze des Auges. Zudem kann auch eine fein ausgeprägte Delamination im Schichtengefüge vorliegen, welche eine Streuung des Lichtes zur Folge hat. Ursache: Die Ursachen für dieses Schadensbild können vielfältig sein. Eine davon ist die Einwirkung mechanischer Kräfte auf versprödete Malschichten/Firnisse. Des Weiteren entsteht auch durch die Einwirkung von Lösungsmitteln eine Krepierung.		- KÜHN 2001, S. 59 - NICOLAUS 1998, S. 184, 332, (388) - STRAUB 1963, S. 116	
16	Krümmen, Verwerfen, Verziehen, Verwinden, Verwölben			×	Starr / (Flexibel)	Global	Schadensbild: Bei diesem Schadensbild liegt eine Deformation des Gesamtgefüges durch Gestaltsabweichung in Form einer globalen, oftmals windschiefen Verzerrung des gesamten Bildträgers vor. Das Schadensbild tritt vorzugsweise bei Gemälden auf Holztafeln auf, kann aber auch bei Malerei auf textilem Bildträger vorliegen, wobei dann ein in sich verzogener Keilrahmen für die Gestaltsabweichung verantwortlich ist. Ursache: Ursächlich sind Klimaschwankungen. Aufgrund der unterschiedlichen Hygroskopizität des Schichtenverbundes sowie der Anisotropie des Bildträgers kann es zu Spannungen und einer elastischen, plastischen Verformung des Gefüges kommen. Diese Kräfte verursachen wiederum die globale Gestaltsabweichung. Wirken auf den Bildträger mechanische Kräfte, beispielsweise aufgrund seiner ungünstigen Befestigung im Zierrahmen, mögliche Querleisten oder eine Parkettierung, so kann dies eine weiterer Faktor für die Schadensentstehung sein.	- Rissbildung - Schüsselbildung - Dachförmig aufstehende Malschicht - Abblättern der Malschicht - Schollenbildung - Fehlstellen	- KÜHN 2001, S. 17, 24, 283, 402 - SANDNER 1990, S. 193 f. - STRAUB 1963, S. 115, 148 f.	

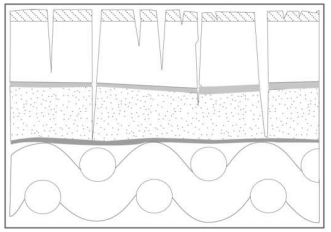
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
17	Loch, Schnitt/Riss (Textil)	×			Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Riss-/Bruchkombination des Schichtenverbundes. Das Gesamtgefüge ist lokal begrenzt voneinander getrennt. In negativ Normalenrichtung liegen partiell keine gemeinsamen Haftungspunkte mehr vor (Bruchbildung). Hingegen kennzeichnet sich der Schaden in lateraler Richtung durch einen vorhandenen Riss im Schichtenverbund. Wenn es sich um einen Schnitt oder einen Riss handelt, ist die laterale Merkmalsausprägung eindeutig linear geprägt. Ein Riss unterscheidet sich von einem Schnitt dadurch, dass bei letzterem die Risskanten verhältnismäßig geradlinig verlaufen. Ein Loch wird per Definition davon so abgegrenzt, dass eine laterale Vorzugsrichtung nicht eindeutig bestimmt werden kann. Ursache: Die Ursache für die Lochentstehung entspricht der Modellvorstellung zum Schadensbild des Bruchs des Schichtenverbundes: Die Einwirkung einer mechanischen Kraft in negativ Normalenrichtung. Liegt dazu zusätzlich eine laterale Kraftkomponente vor, so resultiert hieraus die Entstehung eines Risses oder eines Schnittes.	- Rissbildung - Schollenbildung - Fehlstelle	- KÜHN 2001, S. 245 - NICOLAUS 1998, S. 105 - SANDNER 1990, S. 112	

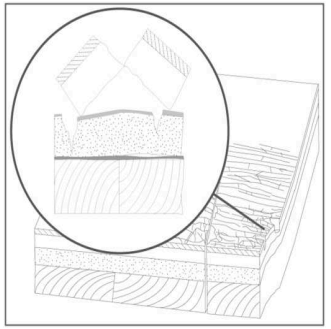
	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
18	Pudernde Malschicht / mürbe Grundierung			×	Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Farbspezifische, poröse Oberfläche einzelner Bildpartien, welche sich durch ein tendenziell mattes Erscheinungsbild auszeichnen. Die Malschicht kann in Schuppen, Konglomeraten oder in pudriger Form vorliegen, beziehungsweise sich feinteilig aus ihrem Verbund heraus gelöst haben. Im Malschichtaufbau liegt genau genommen die Vielzahl einer flächenhaften Schichtentrennung vor. Mikroskopisch betrachtet bezieht sich dieses auf die Pigment-/Bindemittelgrenzfläche. Die Fehlstellen einzelner Pigmentkörner können unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegen, wobei wiederum bei ihrer flächenhaften Summierung eine raue, matte Oberfläche als Gesamteindruck augenscheinlich wird. Ebenso verhält es sich beim Schadensbild der mürben Grundierung, wobei sich die Verortung auf die Grundierung bezieht. Das Schadensbild wird jedoch erst dann offensichtlich, wenn sich daraus Fehlstellen in der darüberliegenden Malschicht ergeben. Ursache: Ursächlich für den flächenhaften Kohäsionsverlust innerhalb der Farbschichten kann ein Bindemittelabbau durch biologischen Befall sein. Auch ein maltechnischer Fehler ist möglich. In diesem Zusammenhang ist auf das Pigment-/Bindemittelverhältnis hingewiesen – das Pigment liegt unterbunden vor. Durch mechanische Belastung können sich einzelne Pigmentkörner aus ihrem Verbund lösen.	- Fehlstellen (flächenhaft)	- KÜHN 2001, S. 43 - NICOLAUS 1998, S. 204	 

	Schadensbild	Grundschadensart: Riss	Grundschadensart: Hohlstelle	Grundschadensart: Änderung Topografie	Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
19	Runzeln			×	Starr / Flexibel	Lokal	Schadensbild: Lokal begrenzte Oberflächenverformung durch Faltenbildung in positiv Normalenrichtung entlang einer lateralen Vorzugsrichtung. Die Welligkeit, beziehungsweise fließende Verformung der Gemäldeoberfläche ist vorrangig bei ölgebundenen Farbschichten festzustellen, wobei oftmals ein Bezug zur Farbigkeit besteht. Ursache: Die Schadensursache kann aus einem maltechnischen Fehler resultieren. Ein vorhandener Bindemittelüberschuss kann bei der Öltrocknung (Sauerstoffaufnahme) zu einer Volumensvergrößerung und damit zur Faltenbildung der Malschicht führen. Auch die Einwirkung von Hitze, wie sie beispielsweise durch einen Brand entsteht, kann ursächlich sein.		- KÜHN 2001, S. 53 - NICOLAUS 1998, S. 158 - SANDNER 1990, S. 92, 127 - EIBNER 1974, S. 43	
20	Schimmel, Pilzbefall			×	Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Veränderung der Objekttopografie entlang der Normalen- als auch der lateralen Richtung. Das optische Erscheinungsbild des Mycelwachstums kann entsprechend des Pilzbefalls vielseitig sein. Bestandteil dieses Schadensbildes ist oftmals eine Veränderung der Farbigkeit und der Festigkeit des Bildschichtengefüges. Einhergehend mit dem Mycelwachstum können strukturelle Schäden im Schichtenverbund zu Folgeschäden führen. Ursache: Pilzbefall, oftmals in Kombination mit einem vorangegangenen Feuchteschaden.	- Rissbildung - Bindemittelabbau → Pudernde Malschicht - Haftungsverlust - Schollenbildung - Fehlstellen	- KÜHN 2001, S. 21, 43, 79, 179, 284 - NICOLAUS 1998, S. 26 ff. 82, 104 - SANDNER 1990, S. 93 f, 235, 242 ff., 271 - STRAUB 1963, S. 135 ff.	
21	Schollen	×			Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Dieses Schadensbild kennzeichnet sich durch einen abgegrenzten Bereich des Bildschichtengefüges bei lateral ausgeprägte Rissformation (Sprungnetz). In Kombination mit den Rissen besteht gleichzeitig ein Bruch in negativ Normalenrichtung und eine Schichtentrennung. An welcher Grenzfläche diese vorliegt ist von der Schadensursache abhängig. Ein wesentliches Merkmal von Schollen ist, dass sie keine gemeinsamen Haftungspunkte zum übrigen Schichtenverbund mehr aufweisen. Sie können sich daher auch übereinander schieben und lose auf anderen Malschichtpartien aufliegen. Ursache: Die Schadensursachen können vielfältig sein sowie in Kombinationen auftreten. Neben einem vorliegenden Sprungnetz kann beispielsweise ein Bindemittelabbau zur Delamination beitragen. Auch klimatisch bedingte Spannungen im Gefüge können sich in gravierenden Fällen in einer Schollenbildung äußern. Weiter kann die Einwirkung mechanischer Kräfte auf ein sprödes Bildschichtengefüge zu diesem Schadensbild führen.	- Fehlstellen	- SANDNER 1990, S. 265	

	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
22	Schüsselbildung	x		x	Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: (Der Tendenz nach eher bei Gemälden auf textilem Bildträger zu finden. Im Gegensatz zu Gemälden auf Holztafeln ist das Schadensbild dachförmig aufstehender Malschicht anzuführen.) Durch tangential ausgeprägte Rissformation (Sprungnetz) abgegrenzte Bereiche des Bildschichtengefüges. In Kombination mit den Rissen besteht gleichzeitig ein Bruch in negativ Normalenrichtung und eine in Teilbereichen vorhandene Delamination. In Abgrenzung zum Schadensbild 'Scholle' gibt es jedoch noch einen gemeinsamen Haftungspunkt zum Untergrund. Zudem besteht das wesentliche Merkmal, dass eine konkave Verformung vorliegt und die Schollenränder in positiv Normalenrichtung leicht aufstehen. Darüber hinaus ist eine so beschriebene Schüssel nicht weiter gebrochen, sondern vielmehr ausschließlich gebogen, womit wiederum eine Abgrenzung zum Schadensbild 'Dachförmig aufstehender Malschicht' gegeben ist. Dieses Schadensbild besitzt starke Verwandtschaft zum Schadensbild 'dachförmig aufstehende Malschicht', wobei letzteres tendenziell eher bei Holztafelgemälden festzustellen ist, während ersteres eher auf Malerei auf textilem Bildträger zutrifft. Diese Aussage ist jedoch rein prognostisch. Ursache: Ursächlich sind klimatische Einflussfaktoren, die zu einer Dimensionsänderung der im Gemälde verwendeten Werkstoffe führen. In gravierenden Fällen ist ein Wasserschaden ursächlich. Aus den unterschiedlichen hygroskopischen Eigenschaften des Schichtenverbundes resultieren elastisch-plastische Verformungen. Des Weiteren muss einerseits immer eine Schrumpfung des Bildträgers vorliegen und andererseits die Vorraussetzung erfüllt sein, dass der Malschichtaufbau dieser Schrumpfung nicht folgt. Aus den sich ergebenden Spannung resultiert die Rissbildung, die partielle Delamination an der schwächsten Grenzfläche und ein Sich-gegeneinander-Aufwerfen des Malschichtaufbaus.	- Fehlstellen	- KÜHN 2001, S. 42 - NICOLAUS 1998, S. 88, 196 f. (390) - BRACHERT 1995, S. 52 - SCHAIBLE 1990b S. 235 - SANDNER 1990, S. 78, 230 f., 265 - REHBEIN u. a., 1987, S. 256 f. - EMONTS-HOLLEY & ALTHÖFER 1987, S. 263	

	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
23	Spinnennetz-Rissbildung, Spiralriss	×			Flexibel / (Starr)	Lokal / (Global)	Schadensbild: Die Spinnennetz-Rissbildung ist eine Sonderform des Schadensbilds Alterssprünge. Zum einen liegt eine Riss-/Bruchkombination durch das Bildschichtengefüge vor, zum andere weisen die lateral ausgeprägten Risse jedoch radial auf einen gemeinsamen Bezugspunkt hin. Quer zu diesen verlaufen weitere Risse in konzentrischer Anordnung. Letzteres ist das Alleinstellungsmerkmal. Auf der Malschichtseite entsteht somit ein spinnennetzähnliches Sprungnetz. Ursache: Als Ursache gilt hier vorrangig die Einwirkung einer lokalen Kraftkomponente in negativ Normalenrichtung. Neben mechanischen Kräften könne hierbei aber auch lokal begrenzte feuchtephysikalische Bedingungen zu diesem Schadensbild führen. In diesem Zusammenhang ist bei textilen Bildträgern auf rückseitig angebrachte Flicken, Etiketten oder Diebstahlsicherungen verwiesen. Bei einem Holzbildträger besteht der Sonderfall, dass sich unter der Grundierung verborgene Astlöcher malschichtseitig über eine Spinnennetz-Rissbildung markieren können.	- Schollenbildung - Fehlstellen	- NICOLAUS 1998, S. 97, 172 - SANDNER 1990, S. 79 f, 92,103	

	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
24	Sprungnetz, Craquelé, Altersprünge	×			Starr / Flexibel	Lokal / Global	Schadensbild: Dieses Schadensbild erstreckt sich in der Regel über die gesamte Gemäldeoberfläche. Besonders auffällig sind hierbei die globalen, vergleichsweise regelmäßig ausgeprägten, netzartigen Risse in lateraler Richtung. Der Kantenverlauf ist hierbei glatt. Gleichzeitig liegt eine Riss-/Bruchkombination in negativ Normalenrichtung vor. Das Schadensbild kann sehr vielfältig sein. Weiter kann zwischen einem Sprungnetz im Firnis und einem im übrigen Bildschichtengefüge differenziert werden. Erstgenanntes wird hiermit als Craquelé definiert, letzteres als Altersprünge. Die untergliederten Schadensbilder unterscheiden sich bei der Riss-/Bruchkombination und ihrer Ausprägung in negativ Normalenrichtung. Die deutlich tangentiale Ausrichtung des Sprungnetzes ist beiden Schadensbildern gemein. Bei einem Craquelé verläuft die Riss-/Bruchkombination in negativ Normalenrichtung ausschließlich durch den Firnis. Bei zutreffender Definition von Altersprüngen muss die Riss-/Bruchbildung jedoch auch durch die Malschichten und die Grundierung verlaufen. Oftmals liegt bei Gemälden sowohl ein Craquelé, als auch ein Netz von Altersprüngen vor. Ihr Verlauf muss dabei nicht zwangsläufig deckungsgleich sein. Bei auszumachender Vorzugsrichtung korreliert selbige mit strukturellen Gegebenheiten der Bildträgerstruktur (z. B. Holzfaserverlauf, Webart). Weiter können gewisse Zusammenhänge zum maltechnischen Aufbau und der verwendeten Materialität aufgezeigt werden. Ursache: Ursächlich ist das altersbedingte Verspröden des Bildschichtengefüges. Zusätzlich können auf das Bildschichtengefüge wirkende Kräfte die Merkmalsentstehung begünstigen. Dem Modell nach wird der Verlauf des Sprungnetz durch strukturelle Schwachstellen des Materialgefüges definiert.	- Schüsselbildung - Dachförmig aufstehende-/ ablätternde Malschicht - Schollenbildung - Fehlstellen	- KÜHN 2001, S. 31, 39-42, 59 - NICOLAUS 1998, S. 88, 165 ff., 299 f., 322 - BRACHERT 1995, S. 52 - EIBNER 1974, S. 19 ff. 44 - SANDNER 1990, S. 78, 79-84, 227	

	Schadensbild	Grundschadensart			Bildträger	Räumliche Ausprägung	Beschreibung	Folgeschäden	Vergleiche / Referenzen	Grafik
		Riss	Hohlstelle	Änderung Topografie						
25	Stauchung			×	Starr / (Flexibel)	Lokal	Schadensbild: (Der Tendenz nach eher bei Gemälden auf hölzernen Bildträgern zu finden. Im Gegensatz ist bei Gemälden auf Textil auf das Schadensbild Schüsselbildung zu verweisen.) Bruch des Bildschichtengefüges in negativ Normalenrichtung in Kombination mit einer lateralen, teilweise netzartigen Riss-/Bruchbildung. Gleichzeitig liegt eine partielle Schichtentrennung vor, welche für gewöhnlich zwischen Bildträger und Grundierung verortet ist. Ein weiteres Merkmal besteht darin, dass sich das Bildschichtengefüge geschlossen und phalanx-ähnlich als kleine Schollen zu Giebeln in positiv Normalenrichtung gegeneinander aufgeworfen hat. Tendenziell weist der dachförmig aufstehende Malschichtaufbau eine laterale Vorzugsrichtung auf. Diese steht im Zusammenhang mit der strukturellen Beschaffenheit des Bildträgers (Holzanatomie/Webart). Im Bruchbereich können sich zudem Teile des Malschichtaufbau in positiv Normalenrichtung überlappend übereinander geschoben haben. Letzteres spricht dann tendenziell eher für das Schadensbild mit dem Synonym 'Abblätternde Malschicht', wobei hier die Übergänge vollkommen fließend sind. Ursache: Der Grund für dieses Schadensbild ist die Einwirkung einer mechanischen Kraft im Kantenbereich, so wie sie beispielsweise von einem Stoß oder Schlag herrühren kann.	- Rissbildung - Einläufer - Delaminationen - Schüsselbildung - Dachförmig aufstehende-/ ablätternde Malschicht - Schollenbildung - Fehlstellen		

10. Zwischenfazit Teil 1

Im ersten Teil der vorliegenden Schrift wurde der Frage nachgegangen, ob dem Grundsatz nach aus einem Kunsttransport eine gesteigerte Abnutzung von Gemälden resultiert. Hierfür wurde ein kritische Betrachtung des Themas Kunsttransport unter einem moralphilosophischen Blickwinkel vorgenommen. In einer Näherung konnte hierzu die Diskrepanzen zwischen dem Bewahrungsauftrag einerseits und dem Vermittlungsauftrag andererseits aufgezeigt werden. Ein entsprechender Diskurs erhält seine Relevanz durch das 'erheblich vergrößerte Transportaufkommen' wie dieses oft proklamiert wird. Daraus resultiert wiederum in einer Annahme von Transportbelastungen der Rückschluss gesteigerter Abnutzungserscheinungen an Gemälden. Zur Objektivierung der Diskussion wurde daher der Versuch einer Bewertung des tatsächlichen Transportaufkommens unternommen. Die einzigen hierfür zur Verfügung stehenden Zahlen ergaben sich aus den Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung'. Diese enthielten jedoch nicht alle für die Erörterung notwendigen Parameter. So ist abschließend festzustellen, dass für eine direkte Bewertung des Leihverkehrs Erhebungen zu den Leihnahmen und -gaben, sprich zu den tatsächlichen Transportvorgängen, notwendig gewesen wären. Allerdings ergaben sich zwei Kernaussagen, die als Indizien für eine Zunahme des Leihverkehrs sprechen. So sind zum einen die maßgeblich einflussnehmenden Institutionsneugründungen zu nennen (besonderes Augenmerk liegt hierbei auf den Ausstellungshäusern) und zum anderen die daraus mitunter resultierenden, deutlichen Zuwächse hinsichtlich der gezeigten 'Kunst-Sonderausstellungen'.

Tatsächlich können die Bedenken der Restauratoren über ein erhöhtes Transportaufkommen und damit eine angenommene gesteigerte Belastung für Kulturgüter nachvollzogen werden. Im Kontext der moralphilosophischen Haltung zum Antagonismus von Bewahrung und Vermittlung, konnte herausgestellt werden, dass der Bestandserhaltung Vorrang einzuräumen ist. Diese Position wird durch die geltenden Richtlinien musealer Dachorganisationen rechtfertigt. Mit dem Verweis auf die zitierten Quellen konnten evidente Argumente gesammelt werden, um die Position der Restauratoren zu stärken. Zugleich wurde gezeigt, dass diese Position in einem Gesamtkontext zu sehen ist, der sich durch den geschilderten Bildungsauftrag von Museen konturiert. Eine grundsätzliche, ablehnende Haltung einem Transport gegenüber würde die objektbezogene Vermittlung und Forschung in Frage stellen, womit das Modell Kunstausstellung obsolet wird.

Eine Irreführung durch lange Warteschlange, wie THAMER sie propagiert, konnte zumindest statistisch nicht belegt werden, da die Konzentration von Besuchen auf bestimmte Sonderausstellungen nicht aufzulösen war. Aufgrund der defizitären Datenlage sind nur hypothetische Rückschlüsse möglich. Absolut gesehen ist jedoch eine Zunahme der Besuchzahlen zu verzeichnen. So zeigte sich bei einer kalkulatorischen Betrachtung, dass sich diese äquivalent zur

Institutionsneugründung verhält. So haben diese mutmaßlich zu einem gesteigerten Interesse an Kunst geführt, was sogleich die Effizienz des Kulturapparates indirekt belegt. Im Zusammenhang des Bewahrungsauftrags ist das Modell 'Kunst-Ausstellung' nicht in Frage zu stellen – das didaktisch unterrichtende Moment ist gesellschaftlich und bildungspolitisch ebenso bedeutungsschwer. Auch wenn der Autor der vorliegenden Schrift klar eine restauratorische Position vertritt, teilt er im skizzierten Dissens zwischen Bewahrung und Vermittlung die Meinung von SCHÜRER, wonach zur Transportfähigkeit der Gemälde ein ergebnisoffener Diskurs notwendig ist. „Der Standpunkt, einfach nichts auszuleihen, um nichts zu riskieren, ist hier nicht vertretbar."[351] Gleichsam ist zu konstatieren, dass keine weiter gehenden Verallgemeinerungen zulässig sind. Sämtliche Entscheidungen über die Transport- und Ausstellungsfähigkeit von Gemälden müssen immer objektspezifischen Kriterien unterstehen – sie sind daher immer einzelfallspezifisch. Gleichwohl muss hierorts die restauratorische Entscheidungsbefugnis in den Vordergrund gestellt werden, bzw. das Gewicht ihres fachlichen Urteils. Restauratoren sind aufgrund ihres Fachwissens am kompetentesten, um entsprechend begründete Entschlüsse zu fassen.

Weiterhin konnten in dem aufgezeigten Interessenkonflikt Bestrebungen zu einem nachhaltigen Objektschutz aufgezeigt werden, womit dem Bewahrungsauftrag nachgekommen wird. So ist allen voran prinzipiell eine gesteigerte Sensibilität auszumachen – nicht zuletzt durch die Etablierung der präventiven Konservierung als wissenschaftliche Disziplin findet diese ihren Ausdruck. Anzuführen sind auch verbesserte Transportbedingung, welche lediglich als ein kleiner Teil komplexer Schutzmaßnahmen zu verstehen sind. Wie aufgezeigt sind außerdem Anstrengungen enge klimatische Richtwerte einzuhalten zu apostrophieren.

Entgegen aller Bemühungen sind jedoch auch Gegenbestrebungen zu belegen – erstaunlicherweise werden diese teilweise aus der Konservierungswissenschaft selbst genährt. Sie formulieren sich in einer Akzeptanz größerer Spannweiten zulässiger Klimaschwankungen. Jüngst initiiert durch einen Vorstoß aus der 'Bizot-Gruppe', entfachte sich erneut eine Klimadiskussion. In diesem Zusammenhang ergab die Darlegung der unterschiedlichen Positionen, dass es keine einheitlichen und zudem verbindlichen Klimastandards zum Schutz der Objekte gibt. Der üblicherweise angegebene Bereich zum optimalen Klima für Gemälde zwischen 55 und 60 %RH und einer Temperatur um 17 °C, bei möglichst geringfügigen Schwankungen, ergibt sich historisch bedingt.

Anhand der Literaturrecherche konnte als Ursache für die Unverbindlichkeit klimatischer Richtwerte eine mangelhafte Datenlage bestimmt werden. So können keine Publikationen vorgewiesen werden, die den Zusammenhang von Klimaschwankung und Objektschädigung schlüssig darlegen und zudem, allgemein gültig, eine Ableitung jenes Bereiches ermöglichen in dem Gemälde stabil sind.

351 Schürer, 2004, Seite 96

Argumentativ wird hier der Position von HERDIN sowie EIBL und BURMESTER gefolgt, welche auf eine mangelhafte Grundlagenforschung und die Notwendigkeit unzweifelhafter naturwissenschaftlicher Belege verweisen. Darüber hinaus offenbart die Forschungslage im Kern, dass sich in Abhängigkeit zur umgebenden relativen Feuchte am Künstlermaterial Dimensionsänderungen ergeben. In ihrer Folgewirkung münden diese wiederum in einer elastischen und/oder plastischen Verformung. Den Forschungsansätzen ist gemein, dass sie keine explizite Benennung jener Grenzwerte der relativen Feuchte vornehmen, die hinsichtlich der Objektstruktur entweder zu einer ersten nachweisbaren Veränderung führen oder sich in einem Schaden äußern. Eine Ausnahme bildet die Forschungsarbeit von ZEHNDER. Ausgehend von 54,4 %RH eruierte der Forscher als unteren Wert >30,8 %RH und als oberen Wert <75,4 %RH beim Untersuchungsgegenstand Holztafelprobekörper. Bei den genannten Grenzwerten sind Schäden nachweislich – ein Sicherheitsbereich ist zusätzlich aus Präventionsgründen einzukalkulieren. Jedoch ist fraglich inwiefern das Forschungsergebnis von allgemeiner Gültigkeit ist, da es sich auf den Untersuchungsgegenstand Holztafelprobekörper beschränkt. Ein weiterer anschaulicher Aspekt ergibt sich, wenn in die Betrachtung die Arbeit von PRAST mit einbezogen wird. Durch seine Forschung am Original grenzt er die Spannweite zulässiger Klimaschwankungen weiter ein, da er, vom gleichen Ausgangswert wie ZEHNDER, bereits bei 65 %RH signifikante Verformung an einer spätmittelalterlichen Holztafel nachweisen kann. Wiederum ist bei diesem Ergebnis auf Einschränkungen hinzuweisen die sich aus der objektbezogenen Konkretisierung – einem einzigartigen, objektspezifischen Verhalten ergibt. Zweifelsohne wird sich ein weiteres Objekt mit einem anderen Materialgefüge und einer variierenden Historie hiervon abweichend verhalten. In der Konsequenz ist eine Ableitung zulässiger Klimaschwankungen, ausgehend vom Probekörper aber auch vom Original, immer einzelfallspezifisch. Überdies ergeben sich bei der Interpretation von Veränderungsmerkmalen weitere Einschränkungen aufgrund subjektiver Kriterien. Im eben geschilderten Fall kann nicht bewertet werden ob die nachgewiesene Bildträgerverformung, im Wissen um Spannungen die möglicherweise in einem Schaden münden könnten, eine Ableitung klimatischer Grenzwerte legitimiert, oder ob hierfür erst ein eindeutiger Schadensfall vorliegen muss. Dieser Gesichtspunkt verweist letztlich auf die Schlüsselproblematik: die Abgrenzung von Alters- und Schadensmerkmalen. Die Herleitung offenbarte dem Grundsatz nach fließende Übergänge der verschiedenen Zustände. Allgemein lässt sich hierbei die Ereigniskette: unbeschädigter Zustand, Alterung, Schaden und Zerfall unter dem Begriff der Veränderung fassen; obgleich erneut herauszustellen ist, dass eine entsprechende Wertung subjektiv erfolgt. In der Konservierungswissenschaft als philosophisch/ethisch übergeordnete Instanz ermöglicht jedoch die material-fokussierte Analyse der Veränderungsprozesse und die gleichzeitige phänomenologische Betrachtung eine geistige Durchdringung dieser komplexen Sachverhalte.

Die am angegebenen Ort vorgebrachten Gesichtspunkte über die Erkenntnisse zu den Veränderungsprozessen werden zusammenfassend jedoch als rein approximativ bewertet. Über eine Annäherung konnte jedoch herausgestellt werden, dass eine Alterung als eine subtile, eher langsam von statten gehende Erscheinung anzusehen ist, wohingegen eine Beschädigung vergleichsweise kurzfristig erfolgt und oftmals mit einem Ereignis ex abrupto verbunden ist. Insofern ist die Schadensentstehung durch ein Ereignis gesondert zu betrachten – insbesondere wenn als Folge einer Handlung oder einer unterlassenen Handlung eine unfreiwillige Einbuße des Werkes festzuhalten ist. Aus Autorensicht zählen hierzu auch jene Ereignisse, die die natürliche Objektalterung beschleunigen und damit zu einer vorzeitigen Schadensbildung führen – mithin auch ein Kunsttransport. Denn: sieht man die natürliche Alterung eines Kunstwerkes als einen kontinuierlichen Verlust an kultureller Information (I) an,[352] so kann jede Art von Beschleunigung dieser Alterung, sei es durch mechanische Beschädigung während des Verpackens oder durch Mikrovibrationen während des Transportes, durch Klimaschwankungen etc. als einen prinzipiell vermeidbaren Schaden ansehen. Daher kann aufgrund der kumulativen Schadenwirkung, in Abkehr von der natürlichen Alterung (gepunktete Linie) ein beschleunigter Zerfall durch den Transport prognostiziert werden. Eine Veränderung der Substanz und damit kultureller Information in der Größe von ΔI ist die Folge.[353] In der nebenstehenden Grafik wird dieses illustriert (►Abb. 40|).

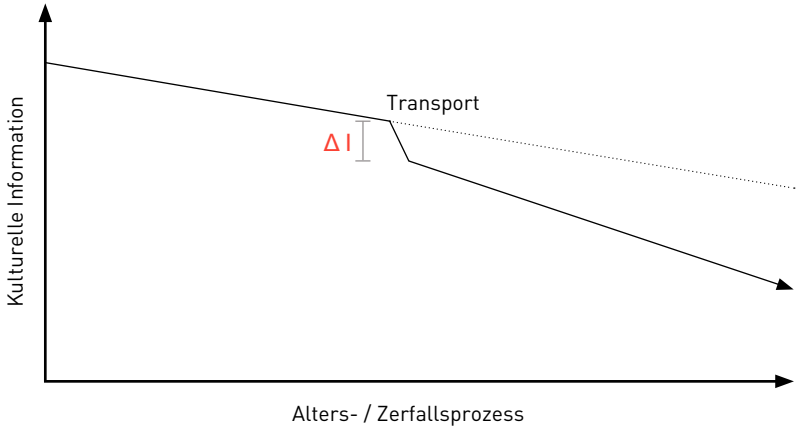


Abb. 40| Grafik zur Veranschaulichung der beschleunigten Alterung von Kunst durch Transport. Eingezeichnet ist die Zerfallskurve, sowie ein Schaden, der ein Verlust an kultureller Information in Größe von Δ I nach sich zieht, sodass in Abkehr zur natürlichen Alterung (gepunktete Linie) ein beschleunigter Zerfall prognostiziert wird.
Quelle: Prof. Dr. Christoph Krekel und selbst

Weiter konnte bei der Abgrenzung und Definition der Veränderungsmerkmale und damit der konkreten Bewertung möglicher Transportfolgen, eine inhomogene Fachsprache aufgezeigt werden. Aus der bestehenden Notwendigkeit eines Glossars wurde daher eine Systematisierung transportbedingter Schadensklassen vorgenommen. Unter Einschränkung auf die Zusammenstellung struktureller Veränderungsmerkmale gelang ihre Determination, die Beschreibung der Merkmalsausprägung und zugleich die Emanzipation von

352 Vergleiche hierzu auch die oben angefügten Überlegungen von BACHMANN und SCHÜRER. Vergleiche: Bachmann, 1997, Seite 201;Schürer, 2004, Seite 92

353 Die Grundgedanken zur folgenden pragmatischen Zusammenfassung, sowie deren grafische Illustration erfolgte in Zusammenarbeit mit dem betreuenden Professor der hiesigen Dissertationsschrift Herrn Prof. Dr. Christoph Krekel.

maltechnischen Vorkenntnissen. Ein Diskurs in der Fachöffentlichkeit steht allerdings bisweilen aus. Dieser ist ausdrücklich gewünscht, da nur ein umfassender Konsens die Pluralität der Terminologie beheben kann.

Überdies konnte herausgestellt werden, dass auch ein methodisches Defizit besteht, wenn es um die Nachweisführung von strukturellen Veränderungen an Gemälden geht. Als Vorarbeit wird im Zusammenhang der Bildgebung die Arbeit von SCHAIBLE bewertet. Mit dieser gelang erstmals bei Leinwandgemälden die Visualisierung von Strukturänderungen in Abhängigkeit zur wechselnden Umgebungsfeuchte. In der Weiterführung ist die Arbeit von ZEHNDER anzuführen der die Adaption auf den Untersuchungsgegenstand Holztafelgemälde vornahm. Beide Arbeiten erfüllen jedoch nicht den Monitoringanspruch, sondern haben lediglich einen dokumentarischen Charakter und visualisieren die Veränderungsprozesse. Mit konkretem Bezug auf ein Transportschadensmonitoring können im Wesentlichen nur drei Arbeiten angefügt werden: das 'VASARI-', das 'KTI-Projekt' und die eigene Vorarbeit. Die angewandten Untersuchungs- und Nachweisverfahren wurden zusammengefasst, sowie die Stärken und Schwächen herausgestellt. Beim 'VASARI-Projekt' muss als prinzipielle Einschränkung der nicht mehr aktuelle technische Stand und der rein zweidimensionale Informationsgehalt der Ergebnisse bemängelt werden. Zweifelsohne besticht jedoch der Lösungsansatz einer stringenten Bildgebung und der erstmals konsequente Ansatz eines zweidimensionalen Transportschadensmonitoring – das Projekt wird als intellektueller Wegbereiter zur eigenen Forschungsleistung gewertet. Durch das 'KTI-Projekt' kann ein aktueller Forschungsstand im Bereich mechanischer Schock- und Vibrationsimmissionen vorgewiesen werden. Ein Schwerpunkt ist neben dem grundsätzlichen Monitoring mechanischer Transportbelastungen, hierbei die Forschung im Bereich der Untersuchung und Optimierung von Verpackungsmaterialien und Transportabläufen. Die bisherigen Publikationen lassen jedoch konkrete Hinweise über den Zusammenhang zwischen mechanischen Einflüssen und einer Strukturveränderung des Untersuchungsgegenstandes unter phänotypischen Gesichtspunkten vermissen. Hinsichtlich der Einflussgröße klimatischer Belastung wird auf die eigenen Vorarbeiten verwiesen. Erstmals gelang hier bei einem Kunsttransport ein objektives Monitoring über strukturelle Objektveränderungen. Dabei konnten die fünf entscheidenden Aspekte: bildgebender Nachweis, hochauflösender Nachweis, dreidimensionaler Nachweis, qualitativer- und quantitativer Nachweis dem Prinzip nach herausgearbeitet und am Kunstwerk erbracht werden. Die Ergebnisse werden nach wie vor positiv bewertet – sie motivierten zur vorliegenden Forschungsarbeit. Da der Fokus damals auf der Untersuchung gefasster Skulpturen und Holzprobekörper lag wird mit der aktuellen Arbeit eine Adaption des Verfahrens sowie eine Ausweitung der Fragestellung auf Gemälde vorgenommen (►Kapitel 1|). Obgleich sich nach Autorenmeinung kein anderes Verfahren besser eignet, konnten bei dem vormals verwendeten Streifenprojektionsverfahren Einschränkungen ausgemacht werden. Diese werden im

folgenden zweiten Teil (►Kapitel 15|) aufgegriffen und ausführlich erörtert. Durch die technische Verbesserung der aktuellen Gerätegeneration kann jedoch bereits hierorts für den Ergebnisteil eine neue Dimension der Nachweisführung und die prinzipielle Verfahrenseignung und -verbesserung der Streifenprojektion in Aussicht gestellt werden.

Als Resümee des hier vorliegenden grundlegenden Teils muss die eingangs gestellte Frage, *ob dem Grundsatz nach aus einem Kunsttransport eine gesteigerte Abnutzung von Gemälden resultiert*, prinzipiell affirmiert werden. Die erörterten Gesichtspunkte über die Veränderungsprozesse, genauer die Unterscheidung von Alterung und Schaden offenbaren eine weiterführende und bis dato ungeklärte, einander bedingende Problematik: Die Attestierung von Alterung und Schaden ist immer subjektiv, weil keine evidente, qualitative, quantitative und zeitkritische Merkmalsbestimmung vorliegt. Außerdem ist diese von der Effizienz der methodischen Nachweisführung abhängig. Daher soll in den folgenden Teilen untersucht werden *inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren im genannten Kontext zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet*.

Teil 02

Technische Grundlagen des Streifenprojektionsverfahrens
– eine Erprobung des ‚COMET-Systems‘

11. Anforderungen an ein System zum Monitoring transportbedingter Objektveränderungen

Wie bereits ausgeführt ist bei der Untersuchung von Veränderungsprozessen an Gemälden im Kontext des Kunsttransportes die Objektivität der Nachweisführung von entscheidender Bedeutung. Erst durch ein entsprechend geeignetes Untersuchungsverfahren kann die Loslösung von rein subjektiven Gesichtspunkten gelingen. Wiederum wird eine solche Nachweisführung von der Methodik und der verfahrensspezifischen Leistungsfähigkeit bestimmt – im Wesentlichen determiniert durch die zwei Aspekte: örtlicher- und zeitliche Auflösung.
Da es sich bei Gemälden um unwiederbringliche Originale handelt, besteht an das Untersuchungsverfahren die Grundanforderung einer zerstörungsfreien Inspektionstechnik. Gleichermaßen impliziert diese eine berührungslose Arbeitsweise. Am dargelegten Forschungsstand konnte abgeleitet werden, dass die Notwendigkeit einer dreidimensionalen und hochauflösenden Bildgebung besteht. In quantitativer und qualitativer Hinsicht lassen sich dann mikrotopografische, sowie allgemein strukturelle Veränderungen nachweisen, aus- und bewerten. Des Weiteren muss das Untersuchungsverfahren auch methodisch für ein Monitoring geeignet sein – also einen präzisen Soll-Ist-Vergleich ermöglichen. Ebenso ist ein hohes Maß an Flexibilität erforderlich. Gemeint ist damit eine breite Einsatzmöglichkeit unter Berücksichtigung vielfältiger Fragestellungen und damit einhergehend die Adaption der Leistungsparameter an die individuelle Beschaffenheit von Gemälden. So ist im aufgeführten Kontext die wechselseitige Abhängigkeit objektimmanenter Charakteristika, der Größe einer Bildgebung und ihrer Detailgenauigkeit zu berücksichtigen. Als grundsätzliches Bewertungskriterium wird die Güte der Messdaten einerseits, aber auch die Vollständigkeit der Bildgebung andererseits festgelegt. Ebenso sollte das Verfahren eine effiziente Arbeitsweise ermöglichen. Damit sind zeitliche Aspekte, aber auch pragmatische Gesichtspunkte wie eine leichte Bedienbarkeit gemeint.
In eigenen Vorarbeiten konnte die Verfahrenseignung der Streifenprojektion bereits für den Untersuchungsgegenstand Skulptur nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind derart überzeugend, dass die Verfahrensanwendung bei Gemälden als sehr vielversprechend eingeschätzt wird (►Kapitel 7.6|). Darüber hinaus war die technische Entwicklung des Scanners bereits zum Abschluss der geleisteten Vorarbeiten so aussichtsreich, dass durch die gesteigerte Auflösung ein weiterer Schritt in den mikroskopischen Bereich angenommen und mit weitaus detaillierteren Messergebnissen gerechnet werden konnte. An die Vorarbeiten anknüpfend, soll überprüft werden, inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren [… bei Gemälden] zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet. Wenngleich die positiven Ergebnisse der eigenen Vorarbeiten überzeugen, können aus ihnen im Wesentlichen vier zentrale Verfahrenslimitierungen abgeleitet

werden, die zugleich Ausgangspunkt der hiesigen Systemerprobung sind:[354]

- Einschränkungen bei der Ausrichtung/Referenzierung der Datensätze für einen Soll-Ist-Vergleich
- Einschränkungen bei der Detektion von Craquelé-Strukturen
- Einschränkungen bei der Detektion glänzender Oberflächen[355]
- Einschränkungen aufgrund langer Belichtungszeiten

Darüber hinaus soll ganz grundsätzlich eine bis dato ausstehende Auswertungsstrategie für einen Vergleich von Vor- und Nachzustand entwickelt werden. Wiederum hiervon ausgehend ist das Ziel, eine sinnvolle und visuell-verständliche Aufbereitung der Ergebnisse vorzunehmen, um den Anforderungen der Zielgruppe zu entsprechen. Beabsichtigt ist damit die geeignete Darstellung und Präsentation gemäß eines bildwissenschaftlichen Ansatzes, der der Arbeitsweise von Kunsthistorikern und Restauratoren entspricht. Letzteres wird als zentrale Vorraussetzung für eine mögliche Akzeptanz des Systems im musealen Bereich angesehen.
Zunächst wird das Funktionsprinzip der Streifenprojektion vorgestellt. Die technischen Grundlagen werden zur Beurteilung der verfahrensspezifischen Vor- und Nachteile als verständnisrelevant eingeschätzt und entsprechend erläutert. Darauf folgend wird explizit auf das hier verwendete Messsystem eingegangen. Im Detail werden dabei die Sensoreinstellungen und Messparameter erörtert, um darzulegen, welchen Einfluss diese bei der Digitalisierung von Gemäldestrukturen haben. So sind bspw. die Parameter der Datenverarbeitung von entscheidender Bedeutung. Durch sie wird die Qualität der Digitalisate maßgeblich beeinflusst. In den eigenen Vorarbeiten bestand die wesentliche Einschränkung, dass feine Objektstrukturen, wie etwa Schadensmerkmale, nicht detektiert werden konnten. Wie oben erwähnt sind hier jene Rissstrukturen anzuführen, wie sie beispielhaft für das Craquelé sind. Theoretisch fielen diese Strukturen damals schon in den Auflösungsbereich des verwendeten Gerätes. Daher wurde angenommen, dass hierfür unter anderem Mängel bei der Datenverarbeitung ursächlich waren.[356] Aus gegebenem Anlass sind diese Ausführungen entsprechend umfangreich.[357] Ebenso sind Untersuchungen zum Auflösungsvermögen anberaumt. Hierbei handelt es sich um einen maßgeblichen, die Leistungsfähigkeit des Scanners definierenden Faktor. Darüber hinaus sollen

354 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 140

355 Auch im Bereich der industriellen Anwendung bestehen vergleichbare Verfahrenseinschränkungen. In solchen Fällen ist die Applikation eines Pulvers durch gleichmäßiges Aufsprühen üblich. Auf diese Weise werden optisch heterogene Objekte, bspw. matte in Druckguss hergestellte und in Teilbereichen hochglänzend-polierte Metallteile für optische Messungen präpariert. Diese Strategie ist bei Kunstwerken natürlich nicht anwendbar. Die berührungslos arbeitende, optische Messtechnik der Streifenprojektion würde in diesem Zusammenhang sinnlos sein und das Attribut ‚berührungslos' wäre ungültig.

356 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 143 f.

357 Informationen, die nicht aus dem Bedienerhandbuch hervorgehen, wurden direkt mit Mitarbeitern des Herstellers erörtert. Da es sich hierbei ausnahmslos um ‚Graue Literatur' handelt, bzw. persönliche Mitteilungen, erfolgt der Quellennachweis über die im Anhang abgedruckte Korrespondenz (►Kapitel 29.16 und 29.17).

verfahrenstechnische Gesichtspunkte untersucht werden. Im Gesamten zielt der folgende zweite Teil auf eine technische Systemerkundung ab, an deren Ende eine Einschätzung zur Praktikabilität und Leistungsfähigkeit des verwendeten Streifenprojektionsverfahrens steht.

12. Streifenprojektionsverfahren

Ganz allgemein definiert handelt es sich beim Streifenprojektionsverfahren um optoelektronische Messsysteme zur Gestalterfassung von Objekten. Messergebnis ist ein Digitalisat, ein virtuelles 3D-Modell der Oberfläche des Untersuchungsgegenstandes in Form einer Punktewolke. Die Detektion geometrischer Merkmale erfolgt hierbei berührungslos und flächenhaft. Es zählt zu der Gruppe der aktiven Triangulationsverfahren. Im Gegensatz zu den passiven, wie bspw. die Fotogrammetrie, ist eine eigene Lichtquelle Bestandteil des Messsystems.[358]

12.1 Systemkomponenten

Dem Grundsatz nach besteht das Streifenprojektionsverfahren aus drei Komponenten (►Abb. 46|). Zum ersten aus einer Projektoreinheit – einen das Lichtmuster emittierenden Projektor. Bei der zweiten Komponente handelt es sich um eine das Messbild detektierende Kameraeinheit. Die dritte Komponente umfasst ein Auswertungs- und Steuersystem. Es handelt sich hierbei um einen Computer über den die Projektor- und die Kameraeinheit zu einem 3D-Sensor verknüpft sind. Hier werden die Systemkomponenten über eine Software sequenziell aufeinander abgestimmt, sowie die Kamerabilder ausgewertet und mathematisch zu einem 3D-Modell verarbeitet.[359]

Projektor

Früher erfolgte die Lichtmodulation über ein in den Strahlengang geschobenes und bewegtes analoges Gitterelement.[360] Ein Scanner dieses Funktionsprinzips wurde in den eigenen Vorarbeiten verwendet.[361] In Abkehr zu dieser vergleichsweise langsamen Technik arbeiten aktuelle Geräte mit einem sehr präzisen digitalen Musterspender. Eine Variante, und die hier verwendete, ist die Lichtmodulation über eine Matrix aus Flüssigkeitskristallen (LCoS – Liquid Crystal on Silicon). Weiter gibt es Scanner, die auf dem Prinzip einer Dioden-Matrix beruhen (OLED – Organic Light Emitting Diods) und solche auf Basis einer Matrix aus Mikrospiegeln (DLP – Digital Light Processing).[362]
An die Projektionstechnik besteht die Anforderung einer schnellen und reproduzierbaren Modulation des Streifenmusters.[363] Zudem ist eine große Schärfentiefe erforderlich, was durch hochwertige Objektive mit fester Brennweite gewährleistet wird (►Kapitel 13.1.1|). Darüber hinaus ist eine extrem hohe Lichtleistung vorteilhaft um auch

358 Vergleiche: Schmelzpfenning, 2011, Seite 13

359 Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 7 und Bauer, 2007, Seite 220

360 Vergleiche: Schmelzpfenning, 2011, Seite 22

361 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 146 ff.

362 Die Funktionsweisen, sowie die Vor- und Nachteile werden von WEICKMANN und auch BAUER beschrieben. Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 3 f. und Bauer, 2007, Seite 222

363 Vergleiche: Bauer, 2003, Seite 8

bei anspruchsvollen Oberflächen eindeutige Streifenkontraste generieren zu können.

Kamera

Streifenprojektionsscanner weisen mindestens eine oder mehrere Kameras auf. Der verwendete Scanner kennzeichnet sich durch eine Kameraeinheit. Hierüber erfolgt die Formerfassung des vom Untersuchungsgegenstand reflektierten Streifenmusters. Genutzt wird hierfür eine flächiger, lichtempfindlicher Bildsensor (CCD – Charge Coupled Device).[364]

12.2 Messprinzip

Das Streifenprojektionsverfahren basiert auf dem Grundprinzip der Triangulation. Die Projektor- und die Kameraeinheit sind in einer festgelegten Distanz und bekanntem Winkel so auf das Messobjekt gerichtet dass ihre geometrische Anordnung einem Dreieck entspricht. Die Formerfassung erfolgt anhand der Lageverschiebung, bzw. Verzerrung eines projizierten, äquidistanten, rechteckigen Streifenmusters.[365] Die Verzerrung ist repräsentativ für die Distanz (Δz) von der Oberfläche des Messobjektes (M) zu Kamera (K) hin.[366] Dabei ist der Triangulationswinkel (γ) und die Entfernung zwischen Projektor (P) und Kamera (K), also ihre Basis (b) bekannt, sowie ihre zugehörigen Winkel (α und β) (►Abb. 41|).[367]

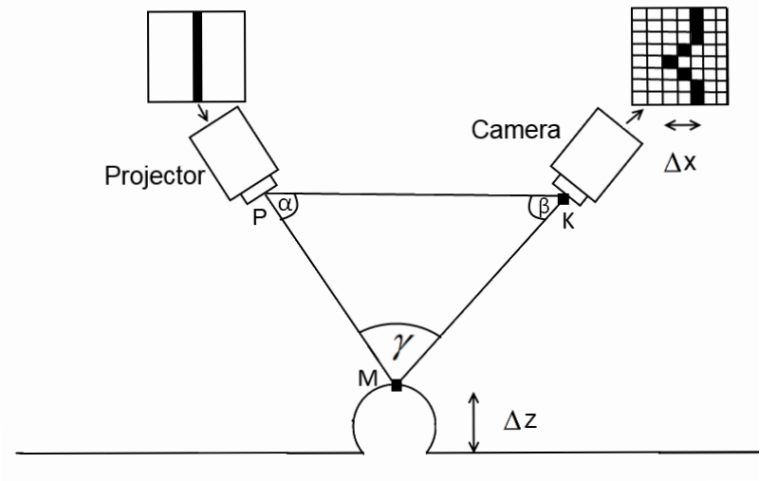


Abb. 41| Prinzipskizze des Streifenprojektionsverfahrens. Aus Gründen der Vereinfachung ist stellvertretend nur ein Streifen skizziert.
Quelle: Buchta u. a., 2015b, Seite 2

Projektionsverfahren

Grundsätzlich lassen sich drei Arten von Triangulationsverfahren voneinander unterscheiden – den Ausschlag gibt hierbei die Projektionseinheit. Bei dem ersten Verfahren handelt es sich um eine eindimensionale Abstandsmessung mit einem Laserpunkt. Dieser wird unter einem Triangulationswinkel auf die Oberfläche des Messobjektes

364 Technische Aspekte, sowie einschränkende Faktoren erörtert WEICKMANN. Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 5 ff.

365 Vergleiche: Frankowski, 1999, Seite 1

366 Vergleiche: Lehle, Seite 77 f.

367 Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 8

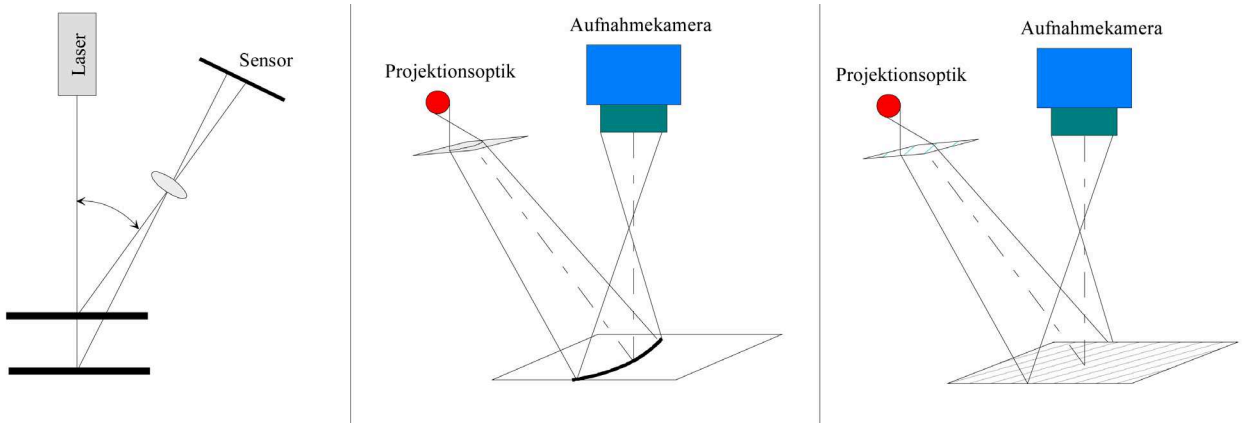


Abb. 42| Prinzipskizze zur Punkttriangulation (links), Linientriangulation (Mitte) und Flächentriangualtion (rechts).
Quelle: Frankowski, 1999, Seite 2

projiziert. Dessen Reflexion wird im Folgenden von einem zeilenförmigen CCD-Chip detektiert.[368,369] Bei der zweiten Variante handelt es sich um eine zweidimensionale Messung zur Formerfassung (Lichtschnittverfahren). Hier erfolgt die Projektion einer Laserlinie, deren Verzerrung analog der Oberflächentopografie durch einen flächigen CCD-Chip detektiert wird. Zur Formerfassung muss derweil die Laserlinie über das Objekt bewegt werden.[370] Die dritte und die hier beim Streifenprojektionsverfahren angewandte Variante ist die dreidimensionale Flächenmessung mit strukturiertem Licht (►Abb. 42|).

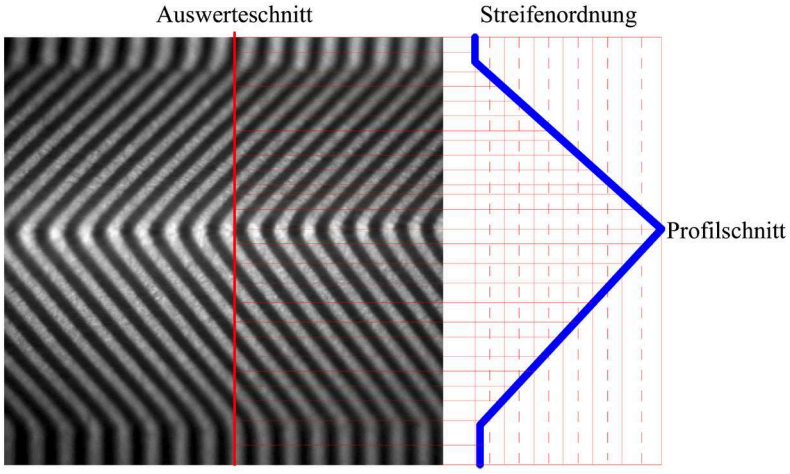


Abb. 43| Qualitative Verzerrung eines Streifenmusters und Rückschlussbildung auf das Höhenprofil des Messobjektes anhand eines Auswerteschnittes.
Quelle:Frankowski, 1999, Seite 3

Codierung

Die Codierung der Oberflächentopografie des Untersuchungsgegenstandes erfolgt nach dem sogenannten Gray-Code-Verfahren.[371] Das vom Projektor ausgesandte Streifenmuster wird auf der Oberfläche objektspezifisch verzerrt und reflektiert (►Abb. 43|). Die Form der Streifenverzerrung wird währenddessen von der Kamera erfasst und durch ihren Analog-Digital-Wandler in binär zu verarbeitende Daten

368 Vergleiche: Schmelzpfenning, 2011, Seite 16 f.

369 Im Bereich der Konservierungswissenschaft ist in diesem Zusammenhang exemplarisch die Verfahrensanwendung durch BRATASZ und KOZLOWSKI anzuführen. Vergleiche: Bratasz & Kozlowski, 2005, Seite 307 ff.

370 Im Bereich der Konservierungswissenschaft ist in diesem Zusammenhang exemplarisch die Verfahrensanwendung durch GUIDI u. a. anzuführen. Vergleiche: Guidi u. a., 2009, Seite 3 ff.

371 Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 12 f.

übersetzt. „Aus der Folge von hellen (Wert 1) und dunklen (Wert 0) Streifen wird für jeden Bildpunkt ein binäres Codewort generiert […].“[372] Aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der Objektoberfläche und Variation bei der Umgebungshelligkeit muss zur eindeutigen Decodierung des Gray-Codes (Wert 0 oder Wert 1) wiederum ein Schwellwert für die registrierte Lichtintensität festgelegt werden. Dieser ergibt sich pro Pixel aus dem Mittelwert des maximalen und minimalen Grauwertes.[373] Durch den internen Abgleich der a priori bekannten projizierten geraden Streifen mit den detektierten verzerrten Streifen sind Rückschlüsse auf die Form des Messobjektes möglich (►Abb. 43|). Die Software des Sensors kann somit ein entsprechendes Höhenprofil berechnen. Für die Erstellung einer 3D-Aufnahme ist eine Reihe unterschiedlicher Streifensequenzen notwendig, da letztlich nur die Kantenübergänge der Streifen von hell nach dunkel ausgewertet werden. Die Frequenz des Musters wird daher von einer zur nächsten Projektion verdoppelt, sodass die gesamte Oberfläche aufgelöst werden kann (►Abb. 44|).[374] Die Sensor-Software koordiniert hierbei die projizierte Streifensequenz und ihre zwischenzeitige Detektion durch die Kamera. Je nach Sensoreinstellungen dauert die Digitalisierung einige Sekunden, was ebenso für die Verarbeitung der Daten zu einer 3D-Aufnahme gilt. Bei optimalen Messbedingungen entsteht am Ende einer Aufnahmesequenz eine Punktewolke mit mehreren Millionen Messpunkten.

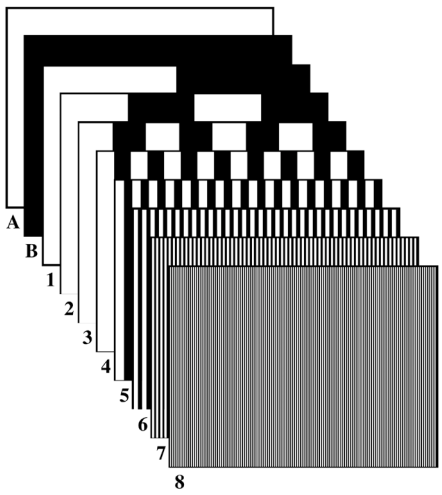


Abb. 44| Code-Sequenz mit den sich periodisch verdoppelnden, äquidistanten hell-dunkel Streifenmuster.
Quelle: Maas, 1997, Seite 73

372 Weickmann, 2011, Seite12

373 Vergleiche: Wiora, 2001, Seite 2 ff. Aus den genannten Gründen wird daher im Zuge einer 3D-Aufnahme bei der projizierten Streifensequenz als erstes eine Aufnahme mit reinem Weißlicht (Aufnahme A) und einer zweite Aufnahme im komplett unbeleuchteten Zustand (Aufnahme B) erstellt. Vergleiche: Bauer, 2003, Seite 10 und Maas, 1997, Seite 73

374 Vergleiche: Weickmann, 2011, Seite 12; Frankowski, 1999 Seite 3 f. und Maas, 1997. Seite 73 f.

13. Streifenprojektionsscanner 'COMET 5 11M'

Für die vorliegende Arbeit wird ein Streifenprojektionssystem der Firma 'Steinbichler' verwendet – das Modell 'COMET 5 11M' (►Abb. 45|). Dieser Scanner besteht aus einer Projektor- und einer Kameraeinheit, beide Komponenten sind in einem fest definierten Abstand zueinander auf einem Aluminiumträger fixiert. Letzterer ist mittig in einem manuell zu arretierenden, drehbaren Gelenk fixiert. Dieses ist horizontal über eine Querstrebe an einem Säulenstativ befestigt. Bei dem Säulenstativ handelt es sich um eine stabile Ausführung auf einem rollbaren Dreibein.[375] Der Sensor ist auf diesem Stativ in alle Richtungen neig-, schwenk-, drehbar und in seiner Höhe zu verstellen. Die mechanischen Komponenten des Stativs sind kugelgelagert, sodass sich der Sensor präzise justieren und an das Objekt-, sowie die Messanforderungen anpassen lässt.

Die Signalübertragung zwischen Kamera und Projektor erfolgt über ein Gigabit-Ethernet-Kabel sowie ein CAN-Kabel (►Abb. 46| und Abb. 47|).[376] Weiter ist der Projektor mit einem sogenannten Controller verbunden.[377] Auch hier wird die Signalübertragung über ein Gigabit-Ethernet-Kabel und ein CAN-Kabel vorgenommen.[378] Zusätzlich verbindet ein Flüssigkeitslichtleiter den Sensor mit dem Controller. Letztgenannter beherbergt einen Shutter, das Leuchtmittel und eine Steuerungselektronik. Durch diese wird das Licht und der Strom zum Projektor, bzw. das Kamerasignal gesteuert. Als Leuchtmittel dient eine Quecksilber-Hochdruck-Entladungslampe.[379] Der Sensor wird vom Benutzer über ein Notebook bedient.[380] Dieses ist mit der Sensorsoftware 'COMETplus' und der Auswertungssoftware 'INSPECTplus' ausgestattet.[381] Die Gerätesoftware ist durch ein USB-Dongle gesichert. Die Verbindung zwischen Computer und Controller erfolgt abermals über ein CAN- Kabel sowie ein Gigabit-Ethernet-Kabel.[382]



Abb. 45| Gesamtansicht des auf dem Säulenstativ montierten 'COMET 5' Sensors. Links die Kamera- und rechts die Projektoreinheit. Quelle: Selbst

375 Vergleiche: Foba AG (Stativspezifikation), 2012, Stativ der Firma 'FOBA', Modell: 'AROBE (DSS-ALPHA)'

376 Das Gigabit-Ethernet-Kabel hat schwarz gekennzeichnete Steckverbindungen. Das CAN-Kabel hat sowohl kamera- als auch projektorseitig grün gekennzeichnete Steckverbindungen.

377 ‚Steinbichler' bietet den Controller in zwei Varianten an. Das hier verwendete System ist mit einem sog. ‚VIP Controller' ausgestattet. Mit diesem Gerät wird eine sehr hohe Lichtleistung erreicht. Vergleiche hierzu: Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)), 2011, Seite 9 f.

378 Das Gigabit Ethernet-Kabel hat sowohl auf Projektor- als auch auf der Controllerseite einen schwarzen Stecker. Die Steckverbindungen des CAN-Kabels sind projektor- und controllerseitig blau gekennzeichnet.

379 Detaillierte Angaben zum Leuchtmittel finden sich im Anhang (►Kapitel 29.5|).

380 Vergleiche: Dell GmbH (Notebookspezifikation), 2012, Notebook Spezifikation: Dell, Precision M6600, Intel(R) Core(TM) i7-2820QM CPU @ 2.30 GHz, 16 GB (RAM), Festplatten: 238 GB und 226 GB, Grafikkarte NVIDIA Quadro 300M, 64 Bit-Betriebssystemarchitektur, Betriebssystem: Windows 7 Ultimate.

381 ‚COMETplus' Version 9.52 (x64). ‚INSPECTplus' Version 5.21 (x64)

382 Die Verbindung des CAN-Kabels erfolgt über einen USB-to-CAN-Adapter – rechnerseitig über eine USB-Verbindung, controllerseitig über ein VGA-Anschluss. Die Steckverbindung des Gigabit Ethernet-Kabels ist am Controller blau markiert. Der Anschluss am PC erfolgt über eine Standard-Netzwerkverbindung.

Übersicht der Komponenten des 'COMET-System'

- 'COMET-Sensor' (Projektor- und Kameraeinheit)
- Controller
- Flüssigkeitslichtleiter
- Kabelsatz
- Dreibein Säulenstativ
- Notebook
- Objektive
- Kalibrierplatten, Kalibrierschablonen und Kalibrierdateien
- Werkzeug zur Wartung und zur Messfeldkonfiguration
- 'COMETplus' / 'INSPECTplust' Software inklusive Dongle und Lizenzdatei



Abb. 46| Schaubild zur Verbindung der Sensorkomponenten (schematische Darstellung). Quelle: Selbst

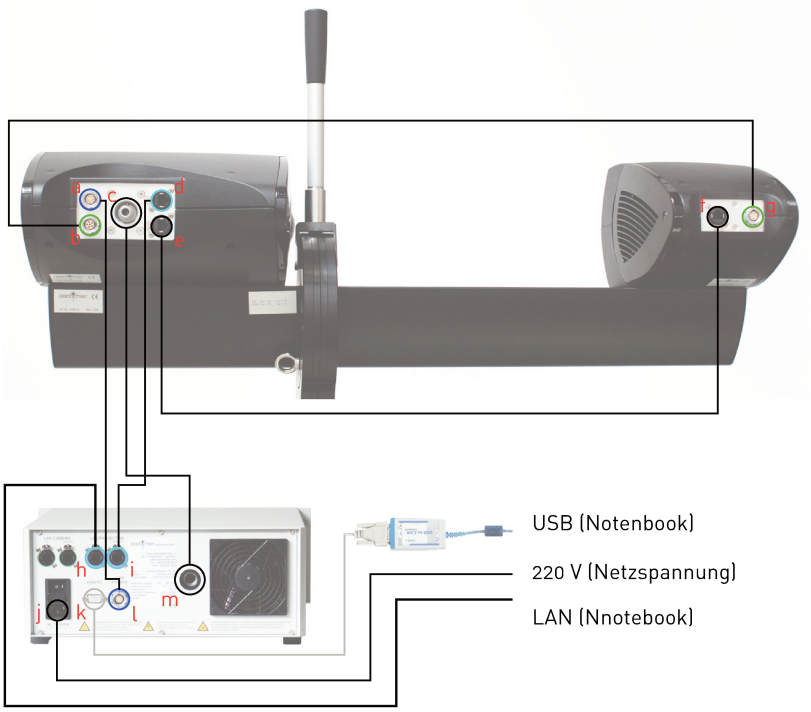


Abb. 47| Schematische Darstellung der Verkabelung der Sensorkomponenten.

a) CAN Power (CAN-Kabel - Projektor)
b) CAN Sensor (CAN-Kabel - Projektor)
c) Lichtleiter (Projektor)
d) LAN Sensor (Gigabit-Ethernet - Projektor)
e) LAN (Gigabit-Ethernet - Projektor)
f) LAN (Gigabit-Ethernet - Kamera)
g) CAN (CAN-Kabel - Kamera)
h) LAN PC (Gigabit-Ethernet - Controller)
i) LAN Sensor (Gigabit-Ethernet - Controller
j) Netzspannung (Controller)
k) CAN (CAN-Kabel -PC)
l) CAN Power (CAN-Kabel - Controller)
m) Lichtleiter (Controller)
Quelle: Selbst

13.1 Konfiguration des Streifenprojektionsscanners 'COMET 5 11M'

Das 'COMET-System' kennzeichnet sich in Bezug auf die Projektor- und Kameraeinheit durch eine modulare Bauweise. Dadurch kann, entsprechend der Messaufgabe und/oder Objektgröße, das System konfiguriert werden. Herstellerseitig stehen verschiedene

Sensorkonfiguration der 'COMET 5' 11M Serie

	Sensorbezeichnung	Kameraauflösung	Messvolumen	Punktabstand	Arbeitsabstand
►	COMET 5 11Ma 80	4016 x 2688 px	75 x 50 x 50 mm³	18 µm	450 mm
	COMET 5 11Ma 150	4016 x 2688 px	155 x 105 x 70 mm³	38 µm	450 mm
	COMET 5 11Ma 350	4016 x 2688 px	345 x 230 x 200 mm³	85 µm	850 mm
	COMET 5 11Ma 600	4016 x 2688 px	560 x 375 x 370 mm³	140 µm	850 mm
►	COMET 5 11Ma 1000	4016 x 2688 px	900 x 600 x 600 mm³	225 µm	1400 mm

Tab. 16| Sensorkonfiguration der 'COMET 5 11M-Serie'. Die Sensorkonfigurationen, welche hier verwendet werden, sind markiert. Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012, Seite 3 und Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 8f.

Sensorvarianten zur Verfügung (►Tab. 16|). Bei ihrer Wahl ist zwischen den kennzeichnenden Größen des Messvolumens und den Parametern zur Auflösung abzuwägen. Aufgrund differenter Messanforderungen wird der Scanner für die hiesige Arbeit in zwei Konfigurationen betrieben. Zum einen in der Sensorkonfiguration mit der Bezeichnung 'COMET 5 11M 80' (►Abb. 48|).[383] Zum anderen



Abb. 48| Sensor in der Konfiguration des 80er Messvolumens 'COMET 5 11M 80'. Quelle: Selbst

in der Sensorkonfiguration mit der Bezeichnung 'COMET 5 11M 1000' (►Abb. 49|). Mit diesen beiden Varianten wurde zu Beginn der Forschung – Januar 2012 – ein System gewählt, welches durch das 80er Messvolumen die größtmögliche Auflösung zur Strukturerkennung bot.[384] Die Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' inkludiert ein herstellerseitig angegebenes Messvolumen von 75 x 50 x 50 mm³ und einen Punktabstand von 18 µm.[385] Durch diese Wahl sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Systems, vor dem Hintergrund der oben genannten Fragestellungen, erkundet und definiert werden. Die Untersuchung kleinster Veränderungsmerkmale steht im Fokus. Gleichwohl lassen sich mit dem 80er Messvolumen jedoch nur Objekte mit geringer Größe durch eine Aufnahme erfassen. Objekte, die größer als das Messvolumen sind, müssen anhand mehrerer sich überlappenden Einzelaufnahmen digitalisiert und im Folgenden

383 Das im Sensornamen enthaltene Kürzel 11M weist daraufhin, dass grundsätzlich pro Aufnahme elf Millionen Pixel zur Verfügung stehen.

384 Mit dem Begriff ‚80er Messvolumen' wird sich eines marketingstrategischen Begriffs der Firma ‚Steinbichler' bedient. Der Gerätehersteller orientiert sich damit an der Diagonale des Messvolumens. In der Praxis zeigte sich, dass die Objekte um ca. zehn Prozent kleiner sein müssen, um vollständig erfasst zu werde (siehe unten). Die genauen Angaben der Messvolumina sind ►Tabelle 16 zu entnehmen. Analog hierzu ist der Begriff ‚1000er Messvolumen' zu verstehen.

385 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012, Seite 4 und Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012, Seite 8f.

zu einer Gesamtaufnahme zusammengesetzt werden. Dieser Arbeitsschritt wird als 'Matching' bezeichnet (►Kapitel 13.4.1|). Die Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 1000' bietet hingegen ein sehr viel größeres Messvolumen von 900 x 600 x 600 mm^3 und einen Punktabstand von 225 µm und ist daher bei der Erfassung ganzer Gemälde anwendbar.[386] Trotz einer vergleichsweise geringeren Auflösung (Faktor 12,5 bzw. 8,3%) wird sich vom 1000er Messvolumen ein hohes Maß an Praxistauglichkeit versprochen.[387]



Abb. 49| Sensor in der Konfiguration des 1000er Messvolumens 'COMET 5 11M 1000'. Quelle: Selbst

Ein Wechsel der Sensorkonfiguration zieht aufgrund eines veränderten Triangulationswinkels zwangsläufig immer auch eine Abstandsänderung zwischen Kamera und Projektor nach sich. Da es sich bei dem Streifenprojektionsscanner um ein hochsensibles, optisches Messsystem handelt, ist eine sehr exakte und reproduzierbare Positionierung von Kamera- und Projektoreinheit auf dem Aluminiumträger erforderlich.[388] Nach einer Umstellung muss das entsprechende Messvolumen in der Gerätesoftware benutzerseitig initialisiert und neu kalibriert werden (►Kapitel 13.1.2|). Gleichermaßen ergibt sich, gemäß des Triangulationsprinzips, aus einer Systemumstellung eine andere Gegenstands- und Brennweite. Demzufolge müssen sowohl bei der Kamera als auch bei dem Projektor messvolumenspezifische Objektive montiert werden.

13.1.1 Objektive

Für das 80er Messvolumen wird kameraseitig ein Objektiv 'Rodagon' der Marke 'Rodenstock' mit einer Brennweite von 105 mm und einer fest eingestellten Blende 32 verwendet (►Abb. 50|).[389] Als Projektor-

386 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012, Seite 3 und Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 8 f.

387 Der Erfahrung nach lassen sich mit diesem Sensor Gemälde bis zu einer Größe von ca. 850 x 1100 mm problemlos in nur zwei Aufnahmen digitalisieren.

388 Die korrekte Position wird über Flansche an der Unterseite des Kamera-/Projektorgehäuses erreicht. Diese rasten in kleine Vertiefungen auf dem Aluminiumträger ein. Über zwei Imbusschrauben werden die Einheiten fixiert. Der Anzug der Schrauben erfolgt mit einem vorgeschriebenem Drehmoment von 5 Nm.

389 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)), 2011, Seite 24. 'Steinbichler' bezeichnet dieses Objektiv: 105-C-11M-80S/N:655 Kamera. Das Datenblatt des Objektives befindet sich im Anhang (►Kapitel 29.6|).

objektiv dient ein 'Zeiss Planar 1,4/50 ZF' mit einer Brennweite von 50 mm und einer fest eingestellten Blende 16 (►Abb. 51|).[390] Bei dem 1000er Messvolumen wird als Kameraobjektiv 'Rogonar-S' der Marke 'Rodenstock' mit einer 50 mm Brennweite und einer fest eingestellten Blende 16 eingesetzt (►Abb. 52|).[391] Als Projektorobjektiv wird ein 'Zeiss Distagon 3,5/18 ZF' mit einer Brennweite von 18 mm und einer fest eingestellten Blende von 4,7 verwendet (►Abb. 53|).[392]

13.1.2 Kalibrierung und 'Verify-Test'

Nach einem Transport, im Anschluss an eine Messvolumenumstellung, sowie bei etwaigen Veränderungen an den Objektiven, muss das System zur Gewährleistung der Datengüte neu kalibriert werden. Auch Temperaturschwankungen können eine solche Maßnahme erfordern. Anhand eines sog. 'Verify-Test' lässt sich hierüber Gewissheit erlangen. Bei diesem Test wird eine dem System beiliegende, messfeldspezifische Kalibrierplatte optisch erfasst (►Abb. 54| und Abb. 56|).[393] Für diesen Arbeitsschritt sind zwei Plattenstandpunkte in einem vorgegeben räumlichen Verhältnis zum Scanner definiert. Die Ausrichtung der Kalibrierplatte erfolgt über eine der Platte beiliegenden Positionsschablone (►Abb. 55|), wobei über die Deckung von Lichtkreuz und Laser in der Mitte der Kalibrierplatte der Abstand definiert wird – beides wird vom Sensor projiziert, sobald der entsprechende Dialog in der Software selektiert ist (►Abb. 57| und Abb. 56|).[394]

Im Zuge der Sensorüberprüfung werden die erhaltenen Ist-Daten mit den im System hinterlegten Soll-Daten abgeglichen – die 3D-Koordinaten der Kalibrierkreise der jeweiligen Kalibrierplatte. Die Bewertung der Güte des 'Verify-Test' erfolgt über einen Toleranzwert. Wird dieser überschritten, muss das System neu kalibriert werden.

Die Durchführung der eigentlichen Kalibrierung verläuft analog zu den oben beschriebenen Arbeitsschritten. Entgegen des 'Verify-Test' wird die betreffende Kalibrierplatte jedoch aus fünf bzw. neun vorgegebenen Blickwinkeln digitalisiert.[395] Softwareseitig wird die Güte



Abb. 50| Kameraobjektiv für das 80er Messfeld 'Rodagon 105 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Selbst



Abb. 51| Projektorobjektiv für das 80er Messfeld 'Planar 1,4/50 ZF' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Selbst



Abb. 52| Kameraobjektiv für das 1000er Messfeld 'Rogonar-S 50 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Selbst



Abb. 53| Pojektorobjektiv für das 80er Messfeld 'Distagon 3,5/18 ZF' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Selbst

390 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)), 2011, Seite 39. 'Steinbichler' bezeichnet dieses Objektiv: 50-C-11M-80S/N:655 Projektor. Das Datenblatt des Objektives befindet sich im Anhang (►Kapitel 29.7|).

391 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)), 2011, Seite 25. 'Steinbichler' bezeichnet dieses Objektiv: 50-C-11M-1000S/N:655 Kamera. Das Datenblatt des Objektives befindet sich im Anhang (►Kapitel 29.6|).

392 Vergleiche: Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)), 2011, Seite 41. 'Steinbichler' bezeichnet dieses Objektiv: 18-C-11M-1000S/N:655 Projektor. Das Datenblatt des Objektives befindet sich im Anhang (►Kapitel 29.7|.

393 Für das 80er Messfeld kommt eine Kalibrierplatte CP_P_100_443, 200 x 200 mm zum Einsatz. Zur Kalibrierung der Kalibrierplatte wird ein photogrammetrisches 3D-Messsystem nach VDI/VDE 2634/1 verwendet. Als Bezugsnormal dienen wiederum vier invariante Maßstäbe. Vergleiche hierzu das Kalibrierprotokoll der Kalibrierplatte CP_P_100_443, 200 x 200 mm der Firma ‚Steinbichler'. Dieses liegt der Kalibrierplatte bei. Für die Kalibrierung des 1000er Messfeldes wird eine Kalibrierplatte CP_P_400_335, 730 x 730 mm verwendet.

394 Bei dem ‚Verify-Test' entsprechen die zwei vorgegebenen Plattenstandpunkte den Positionen ‚V1' und ‚V2' auf der Positionsschablone.

395 Erstgenanntes umfasst die Schnellkalibrierung. Verglichen mit der Standardkalibrierung wird durch die Schnellkalibrierung eine geringere Kalibriergüte erzielt.
Durchführung der Kalibrierung:

der abgeschlossenen Sensorkalibrierung dem Benutzer über einen Qualitätswert angezeigt ('Max. Allowed Percentage' (►Abb. 58|), gestrichelte Linie bei 100%).[396]

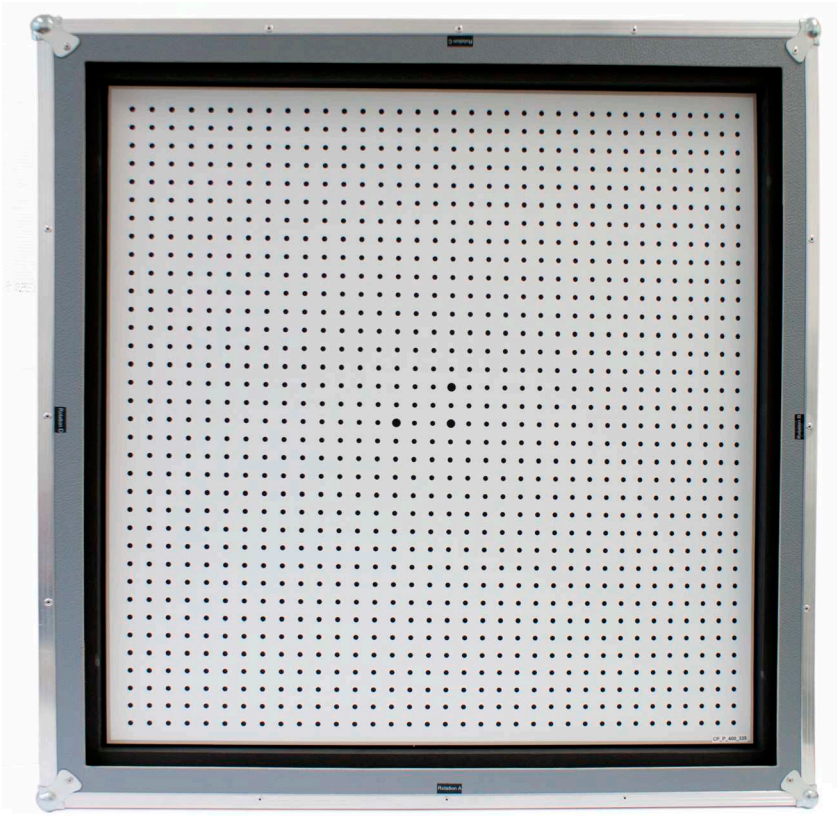


Abb. 54| Kalibrierplatte für das 1000er Messvolumen.
Quelle: Selbst

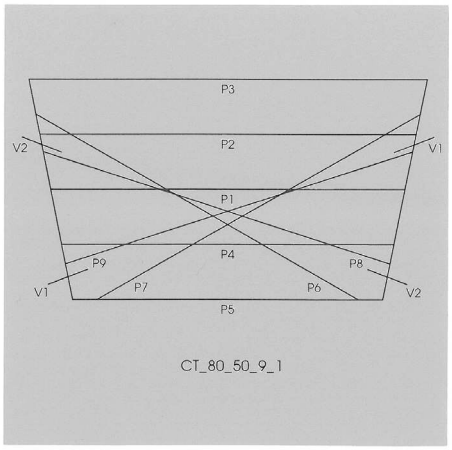


Abb. 55| Die Kalibrierschablone des 80er Messvolumens. Die Plattenposition P1 bis P9 werden für die Kalibrierung verwendet, wohingegen der 'Verify-Test' über die Plattenstandpunkte V1 und V2 erfolgt.
Quelle: Selbst



Abb. 56| Kalibrierplatte für das 80er Messvolumen.
Für den 'Verify-Test' und die Kalibrierung wird die Kalibrierplatte auf der beiliegenden Schablone positioniert und digitalisiert.
Quelle: Selbst

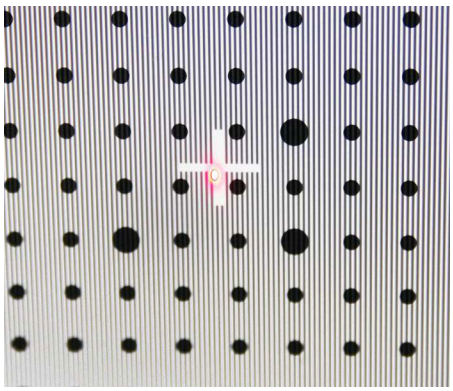


Abb. 57| Der richtige Abstand zwischen Sensor und Kalibrierplatte besteht dann, wenn entsprechend des vorgegebenen Triangulationswinkels das Lichtkreuz und der Laserpunkt deckungsgleich übereinander liegen. Hierzu ein Detailfoto.
Quelle: Selbst

Für die erste Position ‚P1, Rotation A' muss die Platte zunächst senkrecht zur Kamera ausgerichtet werden. Hierzu sollten die Kalibrierkreise in der Sensorsoftware möglichst verzerrungsfrei erscheinen, sichtbar über den ‚Live-Viewer' des Kamerabildes. Indes ist der richtige Abstand zwischen Kalibrierplatte und Sensor gegeben, wenn sich das Lichtkreuz und der Laserpunkt in der Mitte der Platte deckend überlagern. Ein softwareseitiger Kalibrierdialog führt den Benutzer durch die einzelnen Schritte der Kalibrierung und gibt Anweisungen zu den weiteren Kalibrierplattenpositionen. Zur Bestimmung der optischen Achse muss die Kalibrierplatte mehrfach um 90 ° gedreht werden. Die Digitalisierung aus unterschiedlichen Schrägsichten dient der Bestimmung der Objektivbrennweite. (Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung), 2009, Seite 12) Auch die Ausrichtung der Schrägsichten ist über die Kalibrierschablone spezifiziert. Im Anschluss an die fünf, bzw. neun Aufnahmen erfolgt wiederum der Verify-Test zur Überprüfung der Kalibrierung. Für eine erfolgreiche Gerätekalibrierung müssen ca. 40 – 45 Minuten Zeit eingeplant werden. Fünf bis zehn Minuten entfallen auf die Messvolumenumstellung des Sensors und Vorbereitungen der Kalibrierung. Dreißig Minuten sind für die Kalibrierung (neun Plattenpositionen) einzuplanen und weitere fünf Minuten entfallen auf den 'Verify-Test'.
Ergänzung:
Zur erfolgreichen Kalibrierung der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' ist die Platte für die Ausgangsposition der Kalibrierung – 'P 1, Rotation A' – so zu positionieren, dass Laserpunkt und Lichtkreuz nicht in der Mitte der drei großen Kalibrierkreise zur Deckung kommen, sondern sich in deren unterem Drittel treffen. Grund hierfür ist, dass in der Position 'P 4, Rotation D' die drei Kreise andernfalls nicht vollständig erfasst werden können, da einer der Kreise nur angeschnitten digitalisiert wird – das Messvolumen ist hierfür zu klein. Die optische Achse kann in diesem Fall von dem Gerät nicht erkannt werden, wodurch die Kalibrierung fehlschlägt. Da dieser Sonderfall in dem Handbuch zur Kalibrierung (Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung), 2009) nicht erwähnt wird, erfolgt an dieser Stelle der Hinweis.

396 Für weiterführende Information zur Sensorkalibrierung ist an dieser Stelle auf das Bedienermanual zur Kalibrierung von ‚Steinbichler' verwiesen. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung), 2009

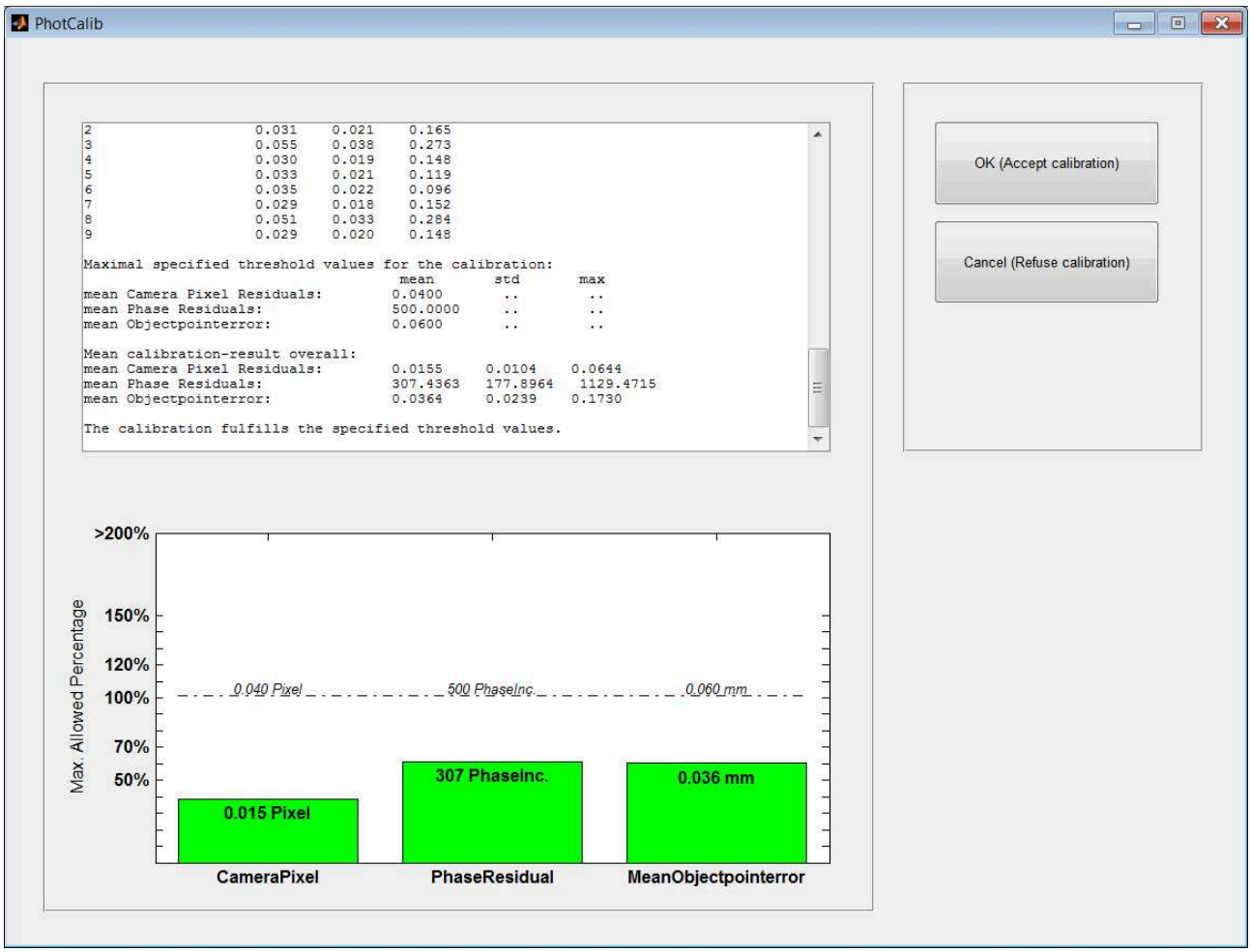


Abb. 58| Bildschirmfoto zur Kalibriergüte in der Software 'COMETplus'. Der Messdialog wird softwaretseitig als 'PhotCalib' bezeichnet. Der linke grüne Balken ermöglicht Rückschlüsse über mögliche kameraseitige Veränderungen, bspw. Objektivveränderungen. Der mittlere grüne Balken offenbart, ob projektorseitig das Objektiv verändert wurde oder ob sich die Beleuchtungssituation nachteilig geändert hat; auch Bodenvibration würden hier die Messung nachteilig beeinflussen und sich in entsprechend schlechten Kalibrierdaten offenbaren. Der rechte grüne Balken gibt über einen Soll-Ist-Vergleich die Abweichung der Punkte an und quantifiziert damit die Kalibriergüte.
Quelle: Selbst

13.2 Sensoreinstellungen und Messparameter – die Digitalisierung und Datennachverarbeitung

Aufgrund der Komplexität von Gemälde ist ihre Digitalisierung diffizil. In Bezug auf das Messverfahren sind Gemälde nicht zwangsläufig kooperativ – Messlücken können die Folge sein.[397] Es legitimiert sich die Verfahrensanwendung jedoch nur, wenn Messdaten generiert werden können. Um bestmögliche Ergebnisse erzielen zu können und dabei zugleich die Verfahrensanwendung für vielschichtige Oberflächen zu gewährleisten, sind in der Gerätesoftware 'COMETplus' verschiedene Sensoreinstellung ausführbar (► Abb. 59|). Da diese Parameter sehr vielseitig sind und untereinander kombiniert werden können, ist aus Autorensicht eine fachgerechte Bedienung des Sensors, unter Ausschöpfung seiner Möglichkeiten, durch ungeschulte Personen nicht möglich – profunde Kenntnisse über die Möglichkeiten und Genzen des Systems sind unverzichbar. Erst durch die Wahl der richtigen Sensoreinstellungen kann eine hochwertige und vollständige Digitalisierung gelingen. Nicht zuletzt aufgrund des Anspruches Schadensmerkmale nahe der Auflösungsgrenze zu

397 Der Terminus ‚nichtkooperative Oberfläche' wird in den Ingenieurwissenschaften zur Beschreibung dieses Sachverhaltes verwendet. Vergleiche: Kalms u. a., 2002, Seite 217

untersuchen, sowie aufgrund des Unikatscharakters von Gemälden, scheidet eine Digitalisierung über Standardwerte aus. Damit negiert sich zugleich auch ein automatischer Messablauf, wie dieses bspw. über einen Makrobefehl denkbar wäre.[398]

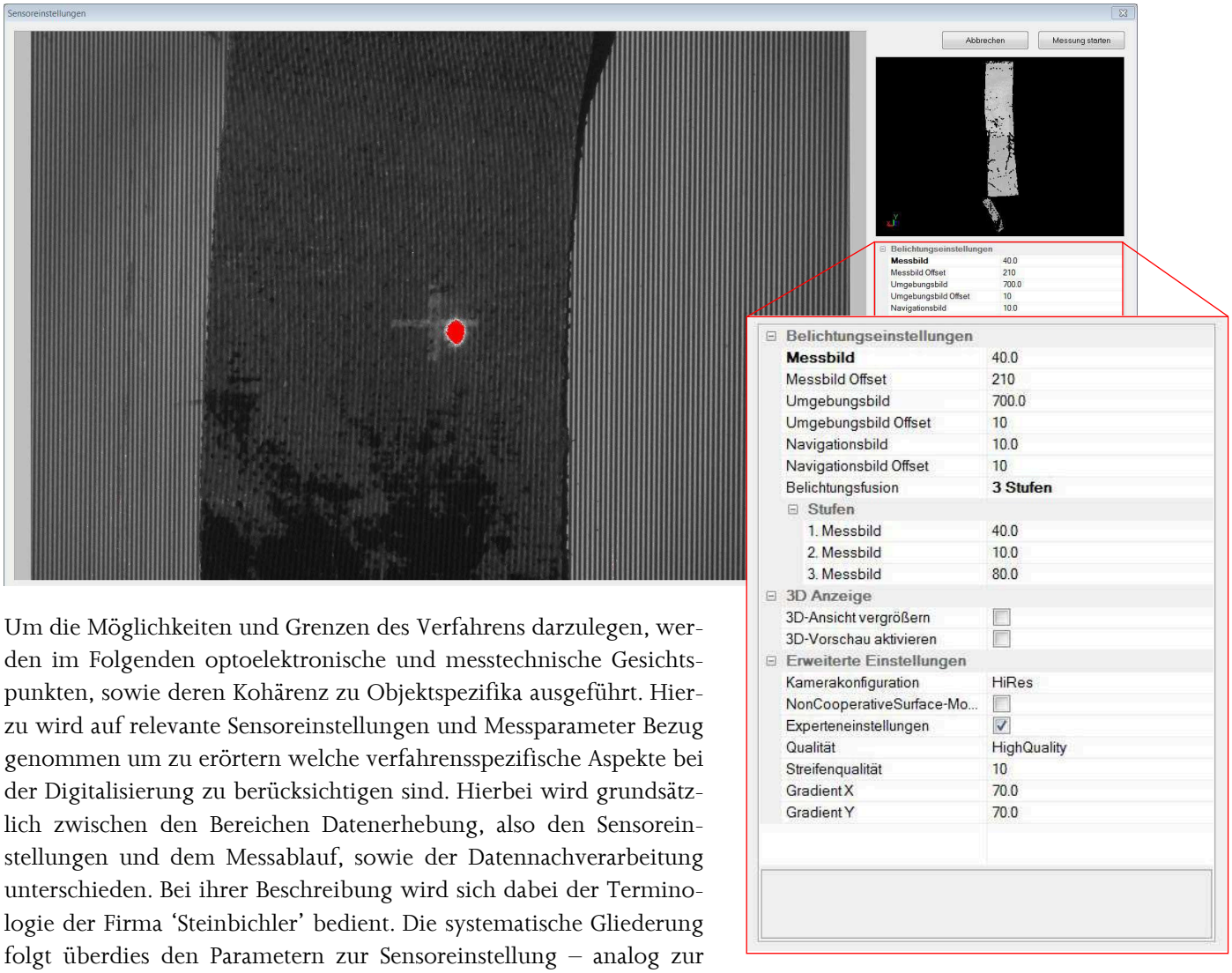


Abb. 59| Sensoreinstellungen des 'COMET-Systems'. Benutzerseitig kann der Sensor über die Eingabe von Ziffern und/oder mit Hilfe eines Drop-down-Menü bestmöglich an das Messobjekt angepasst werden (hier vergrößert).
Quelle: Selbst

Um die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens darzulegen, werden im Folgenden optoelektronische und messtechnische Gesichtspunkten, sowie deren Kohärenz zu Objektspezifika ausgeführt. Hierzu wird auf relevante Sensoreinstellungen und Messparameter Bezug genommen um zu erörtern welche verfahrensspezifische Aspekte bei der Digitalisierung zu berücksichtigen sind. Hierbei wird grundsätzlich zwischen den Bereichen Datenerhebung, also den Sensoreinstellungen und dem Messablauf, sowie der Datennachverarbeitung unterschieden. Bei ihrer Beschreibung wird sich dabei der Terminologie der Firma 'Steinbichler' bedient. Die systematische Gliederung folgt überdies den Parametern zur Sensoreinstellung – analog zur Sensorsoftware. (►Abb. 59|).[399] Weiterführend ist auf das Benutzer-

398 Streifenprojektionsscanner werden vornehmlich im industriellen Umfeld eingesetzt. Bspw. für das Rapid Prototyping, das Reverse Engineering und zur Überwachung von Produktionsprozessen – hierbei stellt die Qualitätskontrolle einen Schwerpunkt dar. Oftmals werden die Sensoren dazu in einen Produktionsablauf implementiert. Neben der Entwicklung und Herstellung der Geräte kennzeichnet sich ‚Steinbichler' auch als messtechnischer und beratender Dienstleister. Mitarbeiter der Firma entwickeln Individuallösungen und adaptieren die Sensoren an die Fertigungsanforderungen. Da in der industriellen Anwendung der Untersuchungsgegenstand in der Regel der gleiche ist, lässt sich der Messablauf standardisieren. Die objektspezifischen Sensoreinstellungen können demzufolge simplifiziert und festgelegt werden. Über eine Deklaration von Einzelanweisungen kann ein Makrobefehl programmiert werden, wodurch eine teilautomatisierte Digitalisierung möglich ist. In den Fällen, bei denen eine robotergesteuerte Führung vorhanden ist, kann die Messungen entsprechend eines Programmablaufes auch vollkommen automatisch erfolgen. Die Möglichkeit der Automatisierung besteht gleichermaßen auch für die Auswertung der Messdaten in der Software ‚INSPECTplus'. Bei dem geschilderten Szenario ist seitens des Anwenders eine genaue Kenntnis über die Einstellungsmöglichkeiten des Sensors nicht zwingend erforderlich – zur Sensorbedienung reicht dann ein Grundwissen aus.

399 In ►Abb. 59| und der dort gezeigten ‚Belichtungseinstellungen' sind noch weitere Parameter abzulesen. Diese bleiben jedoch unberücksichtigt. So bspw. die ‚Offset-

handbuch des Messsystems verwiesen.[400]

13.2.1 'Belichtungseinstellungen'

Im Aufnahmemodus von 'COMETplus' können die Sensoreinstellungen anhand eines Livebildes kontrolliert werden – der sogenannten 'Viewer-Ansicht'. Die Ansicht entspricht dem Kamerabild im Belichtungsmodus. Von der Software rot markierte Objektbereiche weisen auf eine Überbelichtung hin, die Farbe Blau bedeutet eine Unterbelichtung der betreffenden Bildpartie (►Abb. 60| und Abb. 61|). Die 'Belichtungseinstellungen' sind am geeignetsten, wenn gerade kein Bereich des Messobjektes mehr übersteuert ist, also rot dargestellt wird.[401]

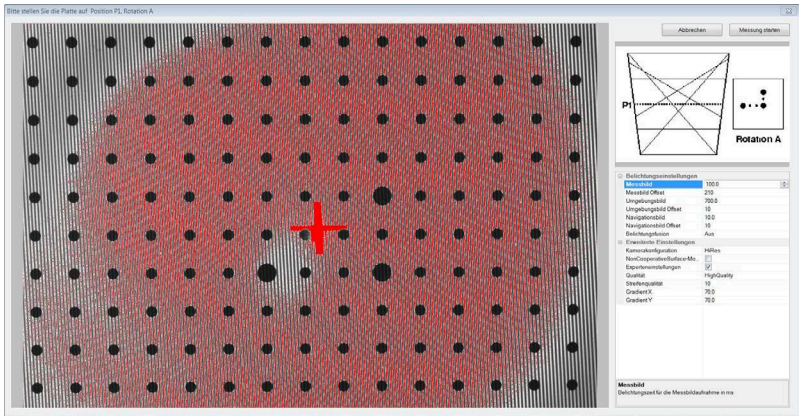


Abb. 60| Während der Sensorkalibrierung werden übersteuerte Bereich der Kalibrierplatte rot markiert dargestellt.
Quelle: Selbst

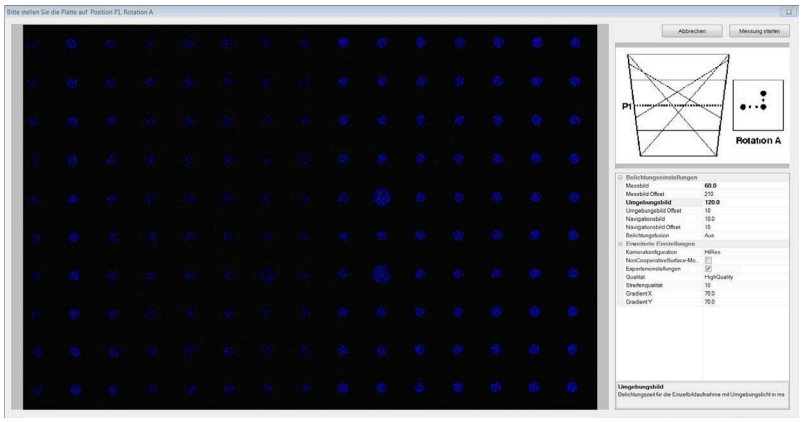


Abb. 61| Während der Sensorkalibrierung werden untersteuerte Bereich der Kalibrierplatte blau markiert dargestellt. Für eine erfolgreiche Kalibrierung sollte keiner der schwarzen Kreise mehr blau sein.
Quelle: Selbst

Einstellungen'. Hierbei wird die Helligkeit des Kamerabildes für die Einzelaufnahmen verändert. Die Werte sollten nicht verändert werden (Standardeinstellung 10). Auch Einstellungen, welche die visuelle Darstellung des Messobjektes in der Vorschau (‚3D-Anzeige') verändern, sind nicht relevant und blieben daher bewusst unberücksichtigt. Andere Einstellungsmöglichkeiten sind wiederum der Entwicklungshistorie geschuldet. Mit der Software ‚COMETplus' können auch Geräte einer älteren Generation betrieben werden. Außerdem wird das verwendete ‚COMET 5-System' in diesem Projektrahmen nicht in der Gänze seines Leistungsumfanges eingesetzt. Der Menüpunkt ‚Navigationsbild', ist bspw. nur dann durch den Benutzer einzustellen, wenn Messmarken verwendet werden. Diese Messmarken sind kreisrunde, selbstklebende Marken und dienen als ‚Matchinghilfe' von Einzelaufnahmen sowie zur Ausrichtung der Datensätze in einem gemeinsamen Koordinatensystem. In Bezug auf die Digitalisierung von Kunstwerken ist die Verwendung selbstklebender Marken aus konservatorischen Gründen abzulehnen.

400 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 57 ff.

401 In der Praxis sieht eine effiziente Arbeitsweise vor, die Sensoreinstellung vom oberen Schwellenwert der Überbelichtung her zu beginnen und diese im Folgenden schrittweise nach unten hin zu korrigieren. Aus der praktischen Systemerkundung heraus resultiert die Erfahrung, dass längere Belichtungszeit tendenziell vorteilhaft sind.

'Messbild'

Die benutzerseitige Einstellung 'Messbild' ist grundsätzlich bei jeder Messung erforderlich. Bei dieser Einstellung wird das Umgebungslicht und die Objektbeschaffenheit berücksichtigt, so auch die Farbigkeit und der Glanz. Die Einstellung bezieht sich auf die Belichtungszeit in Millisekunden.[402] Übersteuerte Bereiche werden softwareseitig farblich hervorgehoben.[403]

'Umgebungsbild'

Die Einstellung 'Umgebungsbild' ist nur beim Vorgang der Kalibrierung und dem 'Verify-Test' erforderlich (►Kapitel 13.1.2|). Dabei wird die Belichtungszeit für die Einzelbildaufnahmen in Abhängigkeit zum Umgebungslicht ermittelt und in Millisekunden eingestellt.[404] Über blaue Markierungen im Livebild wird der Benutzer auf untersteuerte Bereiche hingewiesen. Die Einstellung 'Umgebungsbild' sollte solange korrigiert werden bis die Kreise der Kalibrierplatte nicht mehr blau sondern homogen schwarz sind (►Abb. 61|).[405]

'Navigationsbild'

Die Einstellung 'Navigationsbild' ist für die Messungen der vorliegenden Arbeit nicht von Relevanz. Diese Sensoreinstellung ist für die Markenmessung konzipiert (siehe oben).

'Belichtungsfusion'

Große Kontrastunterschiede ziehen im Regelfall Messlücken nach sich, diese verlaufen dann analog zu besonders hellen oder den sehr dunklen Objektbereichen. Bei einer Standardeinstellung kann sich die optimale Belichtung immer nur auf einen Bildbereich beziehen – sprich helle oder dunkle Areale.[406] Um dieses Defizit auszugleichen gibt es eine sogenannte 'Belichtungsfusion'. Dabei handelt es sich um eine automatische Messung mit bis zu drei unterschiedlichen Belichtungszeiten pro 'Messbild' (►Kapitel 13.2.1|).[407] Zu jedem Bildpunkt wird dabei softwareintern der beste Wert ermittelt und folgend selektiert. Ziel dieser Funktion ist eine qualitative Verbesserung der 3D-Daten. Sowohl helle- als auch dunkle Bereiche werden auf diese Weise optimal belichtet.[408]

---

402 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 59

403 Hierbei ist der Streifenkontrast im Livebild zu berücksichtigen, da dieser einen ersten Aufschluss über die Vollständigkeit des Digitalisates liefert. Bei einem zu geringen Kontrastumfang der Streifen ist mit einer unvollständigen Digitalisierung zu rechnen. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 59

404 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 59

405 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung), 2009, Seite 5

406 Dieser Fall kommt bspw. bei der Markenmessung vor: heller Markenmittelpunkt und dunkler, umschließender Ring.

407 ‚Steinbichler' bezeichnet die verschiedenen ‚Belichtungseinstellungen' als ‚Stufen'. In der Standardeinstellung unterscheiden sich die drei Belichtungszeiten um ein Viertel, bzw. um das Doppelte des Ausgangswertes, welcher aus der Standardeinstellung ‚Messbild' resultiert. Im Screenshot zur Sensoreinstellung (►Abb. 59|) ist der Ausgangswert der Belichtungsfusion im Dialog: ‚1 Messbild' 40 Millisekunden; ‚2 Messbild' 10 Millisekunden; ‚3 Messbild' 80 Millisekunden. Darüber hinaus können alle drei Belichtungszeiten entsprechend der Messanforderung durch den Benutzer frei eingestellt werden. Die farbige Anzeige im Livebild dient hierbei abermals als Hilfestellung.

408 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 59 f.

13.2.2 'Erweiterte Einstellungen'

Bei den folgenden Parametern handelt es sich um Sondereinstellungen für besonders anspruchsvolle Digitalisierungsaufgaben. Etwaige Änderungen sollten nur dann vorgenommen werden, wenn ausnahmslos unzureichende Digitalisierungsergebnisse erzielt werden.[409]

'Kamerakonfiguration'

Dieser Messparameter bezieht sich auf die Kameraauflösung. Der Sensor kann in zwei unterschiedlichen 'Kamerakonfigurationen' betrieben werden. Einerseits in dem Messmodus 'HiRes' mit der vollen Auflösung, andererseits mit einer reduzierten Auflösung im Modus 'LoRes'. Bei letzterem werden seitens des Kamerachip vier benachbarte Pixel zu einem gemeinsamen Wert zusammengefasst. Durch das Herabsetzen der Auflösung reduzieren sich die Messpunkte – gleichermaßen verkürzt sich im Umkehrschluss die Zeit der Digitalisierung.[410] Fraglos nimmt damit die Detailtreue des 3D-Bildes ab.[411]

'NonCooperativeSurface-Mode'

Die Aktivierung der Sensoreinstellung 'NonCooperativeSurface-Mode' ist optional auszuwählen - und dann sinnvoll, wenn bei einer Digitalisierung faktisch zahlreiche Messlücken bestehen. Dieses kann bei Objekten mit optisch unkooperativen Oberflächen der Fall sein, bspw. bei heterogener Farbigkeit. Bei dieser Messmethode wird der Kontrastfilter herabgesetzt, wodurch seitens der Software Daten zu-

409 Bis auf die zuerst genannten Einstellungsmöglichkeiten lassen sich Änderungen nur dann vornehmen, wenn die Experteneinstellung selektiert ist.

410 In einer praktischen Versuchsreihe wurde die oben gemachte Aussage zum Datenvolumen validiert. Hierzu wurden willkürlich gewählte Objekte mit den zwei Kamerakonfigurationen bei gleichbleibenden Sensoreinstellungen und den selben Umgebungsbedingungen digitalisiert. Der Faktor des Datenvolumens betrug gemittelt im Verhältnis des hochauflösenden Messmodus zum niedrigauflösenden Messmodus 3,7 zu 1. Dieses entsprach den Erwartungen des Faktors 4 zu 1, da nur jeder vierte Pixel des Kamerachips ausgelesen wurde. Als Beleg zwei exemplarische Messungen: ‚Druckplatte_Knoll_hq_raw.cdb' mit 31 MB sowie ‚Druckplatte_Knoll_lq_raw.cdb' mit 8 MB (Sensorkonfiguration COMET 5 11M 1000).

411 Gleichwohl hat sich in der Praxis gezeigt, dass in Einzelfällen die Ergebnisse der Digitalisierung im Messmodus mit geringerer Auflösung aussagekräftiger waren als im Messmodus mit hoher Auflösung – dies gilt insbesondere bei ausgeprägt, repetitiv strukturierten Oberflächen. Die beschriebene Besonderheit fiel im Rahmen von Voruntersuchungen zur Sensorhandhabung auf. Untersuchungsgegenstand war ein Gemälde, wobei der Fokus auf Untersuchung eines Haarrisses in der Malschicht lag. Dieser konnte im Messmodus mit der vollen Auflösung nicht erfasst werden. Das Digitalisat wurde an betreffender Stelle frei von Artefakten dargestellt. Mit der Kamerakonfiguration ‚LoRes' ließ sich die Beschädigung jedoch visualisieren. Diese Tatsache ist zunächst nicht schlüssig. Eine Nachfrage bei der Entwicklungsabteilung des Geräteherstellers führte zu einer möglichen Begründung. So kann es bei Kamerakonfiguration mit voller Auflösung vorkommen, dass der Pixel welcher den Messpunkt des Haarrisses repräsentiert, aufgrund von Über- oder Untersteuerungswerten nicht durch die softwareinterne Qualitätskontrolle gelangt. Wird der Sensor hingegen mit niedriger Auflösung betrieben, so werden, analog zu den oben gemachten Ausführungen, vier Pixel zu einem Messpunkt zusammengeschlossen. Das eben exemplarisch betrachtete Pixel des Haarrisses ist folglich von drei benachbarten Pixeln umgeben. Aus diesem Pixelverbund resultiert eine größere Fläche. Darüber hinaus können sich hier mathematisch die Streuwerte so günstig vermischen, dass ihr Mittelwert den Schwellwert der Qualitätskontrolle passiert und der Messpunkt zugelassen wird. Dies führt bei dem geschilderten Fall zur Darstellung des Haarrisses bei vermeintlich ungünstigerer Auflösung. [Vergleiche: Giesler (Fa. Steinbichler), 2012, im Anhang abgedruckt ►Kapitel 29.16] Bei der Detektion einer Leinwandstruktur wiederholte sich der geschilderte Sachverhalt. Beim selben Messobjekt konnten mit der Sensoreinstellung 'LoRes' die Bindungspunkte weitaus genauer wiedergegeben werden als mit der Kamerakonfiguration 'HiRes'. Aus den genannten Gründen sollten daher Versuche unternommen werden, mit welcher Kamerakonfiguration aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden können.

gelassen werden, die andernfalls aufgrund minderer Datenqualität (Bildrauschen etc.) herausgefiltert würden. Teilweise kann die Selektion dieser Anwendung die einzige Möglichkeit sein, um ein hinlänglich geschlossenes 3D-Modell zu erhalten. Im Umkehrschluss muss eine mindere Datenqualität akzeptiert werden.[412]

'Qualität'

Der Sensor kann darüber hinaus in der Konfiguration 'HighQuality' oder 'HighSpeed' betrieben werden. Mit dieser Einstellung lässt sich die Kommunikation zwischen Sensor und Computer, bzw. die Datenübertragungsrate beeinflussen. Auf die Datenqualität hat diese Einstellung keinen Einfluss.

'Streifenqualität'

Die 'Streifenqualität' kann über ein Eingabefeld im Wertebereich von eins bis zehn verändert werden. Die Einstellung bezieht sich auf den minimalen Streifenkontrast ab dem gültige Messdaten erzeugt werden. Ist der Wert der Streifenqualität hoch eingestellt, so sind die Messdaten von besonderer Güte. Gleichwohl wird dann ein größere Anzahl an Messpunkten in unzureichend kontrastierten Streifenbereichen softwareintern ausmaskiert und verworfen.[413]

'Gradienten X / Gradient Y'

Mit der Einstellung des Gradienten lässt sich das Winkelmaß zwischen Kamera und Objektoberfläche festlegen ab dem gültige Daten erzeugt werden.[414] Die Einstellung des Winkels erfolgt in Grad, wobei 'Steinbichler' die senkrechte Ausrichtung von Kamera zur Objektoberfläche mit 0 ° definiert. Die idealisierte Objektoberfläche entspricht dabei der X-/Y-Ebenen und das Ebenenlot dem Normalenvektor. Mit dieser Einstellung wird zum einen die Vollständigkeit der Messung und zum anderen die Qualität der Messpunkte mit beeinflusst. Senkrechte Messungen auf das Objekt stellen den theoretischen Idealzustand dar. Mit der Zunahme des Messwinkels nimmt die Qualität der Daten ab, da sich analog zum Winkelmaß aus optisch schräger Sicht der Punktabstand reduziert – eine Differenzierung der einzelnen Messpunkte wird somit erschwert. In der Geodäsie wird dieser Sachverhalt als 'Schleifender Schnitt' bezeichnet (►Abb. 62| und Abb. 63|).[415] Bei Objekten mit besonders ausgeprägten Hinterschneidungen kann die Oberflächenorientierung so ungünstig sein, dass sich diese nachteilig auf die Datenqualität und/oder ihre Vollständigkeit auswirkt. Softwareintern lässt 'Steinbichler' Standardgradienten bis zu einem Winkelmaß von 75 ° zu. In der praktischen Anwendung hat sich gezeigt, dass mit den Standardeinstellungen überzeugende Ergebnisse erzielt werden können.

Die Einstellung der Gradienten ist jedoch weniger bei der Digitalisierung von Gemälden als vielmehr bei der von Skulpturen rele-

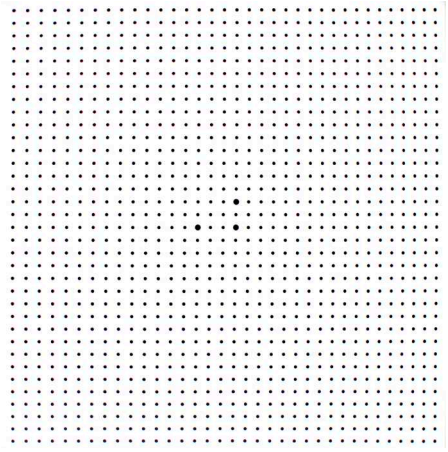


Abb. 62| Grafik zur Verdeutlichung 'Schleifender Schnitt'. Dargestellt ist eine mit Punkten versehene weiße Fläche – repräsentativ für eine Kalibrierplatte, aus senkrechter Blickrichtung (Kamerasicht). Die Punkte sind verzerrungsfrei dargestellt und hinsichtlich ihrer räumlichen Lage deutlich voneinander zu unterscheiden.
Quelle: Selbst

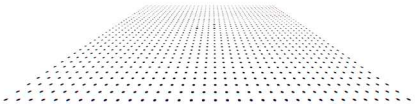


Abb. 63| Die obige Grafik aus optisch schräger Sicht. Die mit den Punkten versehene Fläche ist perspektivisch stark verzerrt. Die im hinteren Bereich verorteten Punkte können nicht mehr eindeutig voneinander unterschieden werden ('Schleifender Schnitt'). Bei der messtechnischen Erfassung der Punkte nimmt die exakte Bestimmung ihrer räumlichen Lage mit dem Winkelmaß des Messgradienten im Verhältnis zur Ebenenausrichtung ab.
Quelle: Selbst

412 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 61

413 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 61. Ein Wert zwischen acht und zehn hat sich bewährt.

414 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 61 f.

415 Vergleiche: Geo DZ (Schleifender Schnitt), 2012

vant. Grundsätzlich ist bei der Einstellung der Gradienten immer die Sensorausrichtung zu berücksichtigen. So kommt hinzu, dass bei der 0 °-Stellung etwaige Reflexionen am ausgeprägtesten sind. In weiterführenden Vorversuchen zur Systemerkundung hat sich in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand Gemälde ein Messwinkel von 45 ° als idealtypische bewiesen. Das Winkelmaß bezieht sich hier auf die Ausrichtung von Kameraachse zur Gemäldeoberfläche (idealisiert als X-/Y-Ebene).

13.3 Prozessablaufdiagramm zum Messablauf und zur Datennachverarbeitung in 'COMETplus'

In einem Überblick gebendem Prozessablaufdiagramm sind jene Arbeitsschritte zusammengefasst die zur Digitalisierung im Regelfall erforderlich sind (►Abb. 64|). Das Diagramm gliedert sich durch eine ereignisorientierte Prozesskette, wobei als semantische Regel das Rechteck als Tätigkeit des Benutzers festgelegt wird und die Raute als Symbol der Implikation fungiert. Ausgangs- und Endpunkt sind als Ellipse dargestellt. Nicht alle der aufgeführten Arbeitsschritte müssen zwangsläufig bei jeder Messung durchgeführt werden. Die Notwendigkeit wird auch durch die Fragestellung der Messaufgabe bestimmt. Grundsätzlich sind im folgenden Prozessablaufdiagramm vier Arbeitsetappen voneinander abzugrenzen: Die erste umfasst die Vorbereitungen zur eigentlichen Messung. Die zweite betrifft die Messung selbst. Sie beginnt mit der Datenerhebung und bezieht sich daher ausschließlich auf die Einzeldatensätze. In der dritten Etappe werden diese Punktewolken global miteinander in Beziehung gesetzt und für die Datennachverarbeitung optimiert. Der letze Abschnitt bezieht sich dann bereits auf die triangulierten Daten, deren Optimierung sowie ihre Datenablage. Die Übergänge dieser vier Bereiche sind in der grafische Darstellung als solche markiert. In Ergänzung zu diesem Prozessablaufdiagramm ist das weiter unten aufgeführte Prozessablaufdiagramm zur Datenverarbeitung und -aufbereitung zu betrachten (►Abb. 155|).

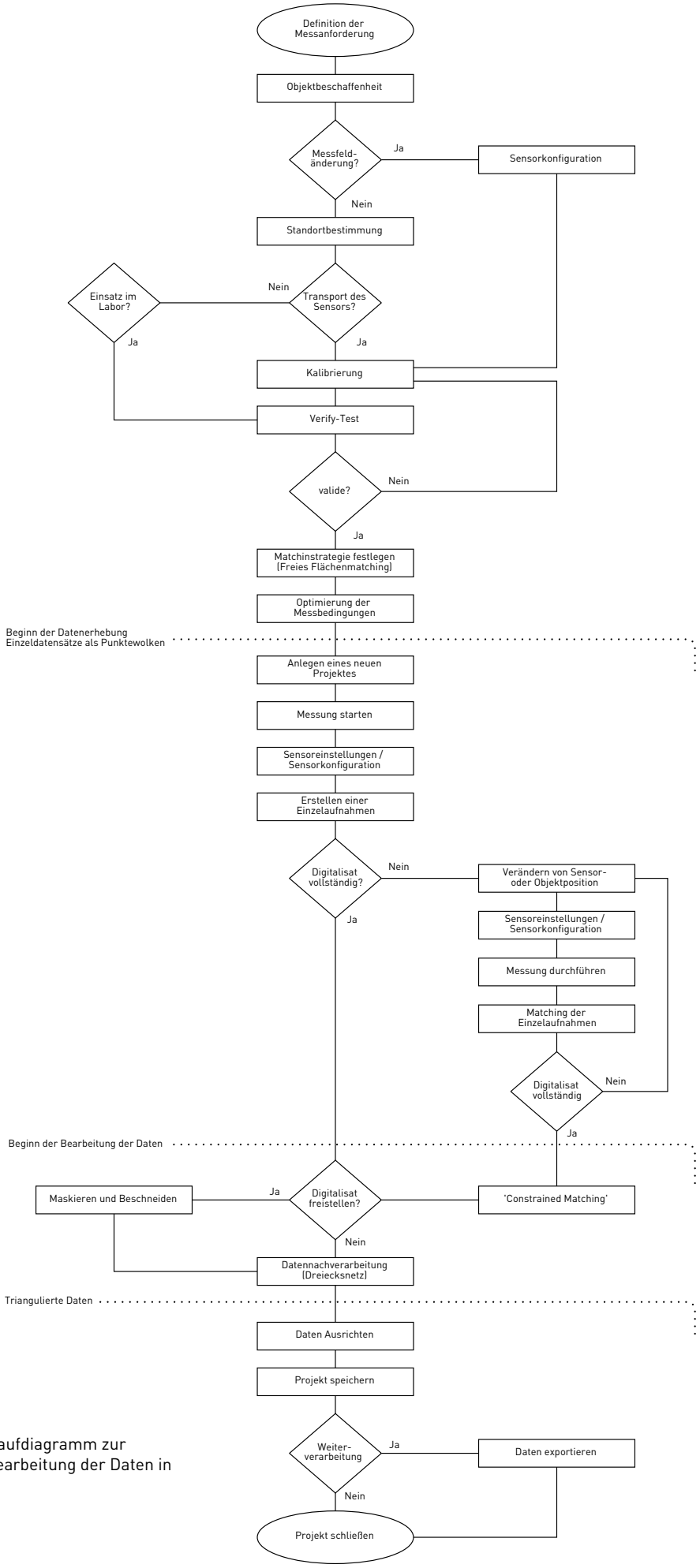


Abb. 64| Prozessablaufdiagramm zur Digitalisierung und Bearbeitung der Daten in 'COMETplus'.
Quelle: Selbst

13.4 Messablauf

Der Messablauf als solcher lässt sich aufgrund individueller Objekte und variierender Fragestellungen nicht standardisieren. So kann bisweilen eine hochauflösende Detailaufnahme einer tendenziell globaleren, niedrig aufgelösten Gesamtaufnahme gegenüberstehen. Überdies ist auch der Ort der Digitalisierung zu berücksichtigen. Das 'COMET-System' ist grundsätzlich transportabel. Prinzipiell entspricht ein abgedunkelter, aber nicht vollkommen dunkler Messraum den Idealbedingungen.[416] Im Weiteren wird der Messablauf maßgeblich durch die 'Matchingstrategie' mit beeinflusst (3D-Einzelaufnahme versus 3D-Modell (►Kapitel 13.4.1|). Ebenso hat eine veränderte Sensorposition immer auch eine andere Lichtsituation zur Folge, sodass im Idealfall das Objekt rotiert. Für optimale Messergebnisse sollten daher bei jeder Aufnahme die Sensoreinstellungen angepasst oder zumindest überprüft werden.

13.4.1 Digitalisierung

Zur Digitalisierung sind die oben geschilderten Sensor- und Belichtungseinstellungen vorzunehmen (►Kapitel 13.2|). Es können sowohl Einzelaufnahmen als auch mehrere Aufnahmensequenzen des Untersuchungsgegenstandes angefertigt werden.

'Matching'

Eine erste Aufnahme repräsentiert lediglich eine Objektansicht, da sie aus einem Kamerablickwinkel erstellt wurde. Sollen mehrere additive Einzelaufnahmen, einen Ausschnitt repräsentierend, zu einer globalen Aufnahme zusammengesetzt werden, so erfolgt dieses über die Funktion des 'Matching'. Auf diese Weise können Gemälde, die größer als das Messvolumen sind, durch eine Veränderung der Kameraposition in Gänze digitalisiert werden. Gleichermaßen gilt dieses für dreidimensionale Objekte und der Zielsetzung einer volumenumspannenden Digitalisierung. Darüber hinaus kann auch bei Objekten mit unkooperativen Oberflächen die Mehrfachmessung, bei zwischenzeitig veränderten Messwinkeln, das Digitalisat komplettieren.[417] Dem Grundprinzip nach wird im Zuge des 'Matching' eine neu erstellte Aufnahme einem bereits bestehenden Datensatz zugeordnet. Anhand korrespondierender Bereiche werden die Aufnahmen dabei miteinander zur Deckung gebracht und mathematisch ausgerichtet. Infolgedessen werden die Einzeldatensätze in ein gemeinsames Objektkoordinatensystem überführt.[418] Aufgrund des veränderten räumlichen Verhältnisses zwischen Objekt und Sensor implizierte bis dato jede Einzelaufnahme ein spezifisches Koordinatensystem. Wird eine Einzelaufnahme nun einem bereits bestehenden Datensatz zugeordnet, so wird erstgenannte mathematisch in das

416 Für die praktischen Versuche entsprach dieser einer ermittelten Beleuchtungsstärke im Bereich von 175 – 50 Lux.

417 In diesem Zusammenhang wurde bisher lediglich auf die Modifikation der ‚Belichtungseinstellungen' hingewiesen. In praktischen Versuchen zeigte sich, dass veränderte Sensorpositionen oftmals weitaus wirksamer sind. Zur Erzeugung möglichst vollständiger 3D-Modelle sieht eine effiziente Arbeitsweise eine Kombination aus optimalen Belichtungseinstellung und unterschiedlichen Sensorpositionen vor.

418 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 63 und Seite 69

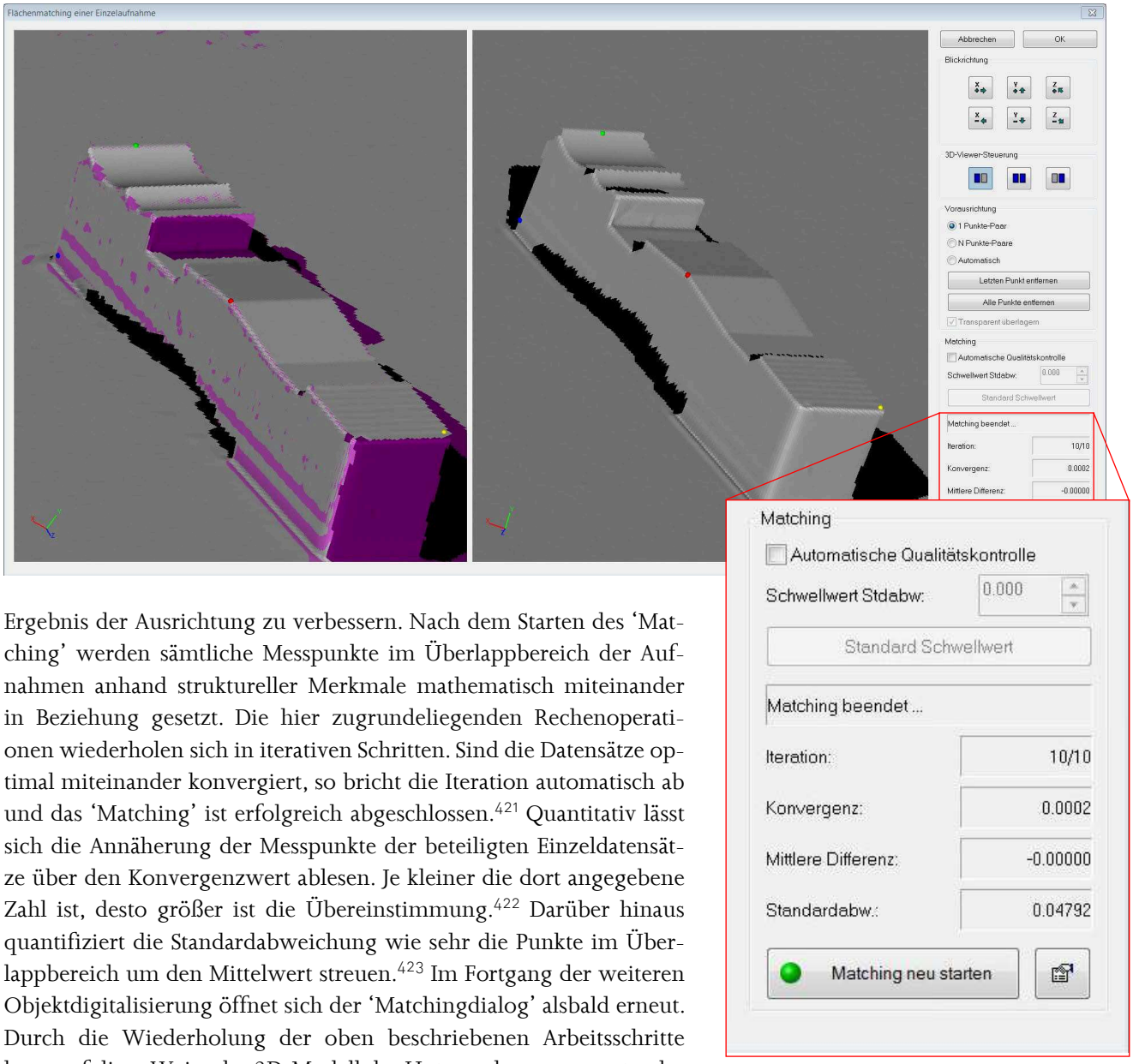
Koordinatensystem der vorausgegangenen Aufnahme überführt. Auf diese Weise entsteht ein globales Objektkoordinatensystem. Da das 'Matching' sowohl interaktiv durch den Benutzer, als auch anhand mathematischer Berechnung seitens der Sensorsoftware vollzogen wird, sollten hierbei zwei wesentliche Bedingungen berücksichtig werden: Zum einen müssen sich die Einzeldatensätze ausreichend überlappen. Zum anderen sollte die Oberfläche spezifische, strukturelle Eigenheiten erkennen lassen. Die beiden genannten Aspekte sind mit ausschlaggebend für den Erfolg und die Qualität des 'Matching'. Da nicht alle Objekte grundsätzlich von hinreichenden Charakteristika geprägt sind, hat 'Steinbichler' verschiedene 'Matchingstrategien' entwickelt.[419]

Anmerkungen zum 'Matching'

Für den praktischen Teil der hier vorliegende Arbeit wird ausschließlich die 'Matchingstrategie' 'Freies Flächen Matching' angewandt. Dabei wird die Oberflächenstruktur des Objektes zur Selbstreferenzierung genutzt.[420] Nach einer Messung sind durch den Anwender im überlappenden Bereich der 3D-Einzelaufnahmen markante Oberflächenstrukturen zu selektieren und mit korrespondierenden Punktepaaren zu versehen. Anhand mindestens zweier Punktepaare wird daraufhin eine erste Grobausrichtung vorgenommen, wobei das Ergebnis gleichsam als überlagernde Aufnahme im geteilten 'Viewer-Fenster' visualisiert wird. Die dem bestehenden Datensatz hinzugefügte Aufnahme wird mit einer eigenen, semi-transparente Farbe dargestellt (►Abb. 65| magentafarben). Dieser Vorgang dient dem Benutzer als eine erste visuelle Bewertung des 'Matching'. So sind möglicherweise weitere Referenzpunkte erforderlich, um das

419 Bei der ‚Matchingstrategie' ‚Auf Referenzpunkte transformieren' werden Messmarken, welche zuvor möglichst homogen auf der Oberfläche des Messgegenstandes verteilt und fotogrammetrisch in ein Koordinatensystem eingemessen wurden, als Referenzpunkte in die Rubrik ‚Solldaten' von ‚COMETplus' importiert. Wird das Objekt im Folgenden durch den Scanner digitalisiert, so gilt dieses gleichermaßen auch für die Messmarken, welche von selbst als solche erkannt werden. Über eine automatische Zuordnung der Messmarken bei den Einzelaufnahmen (Ist-Daten) werden diese in das ihnen übergeordnete Soll-Daten-Koordinatensystem überführt. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 81 und 96 ff.] Auch wenn diese Methode sehr genau ist, bleibt sie aufgrund des Anspruches an eine vollkommen berührungslose Digitalisierung unberücksichtigt. Ebendieses gilt auch für die 'Matchingstrategie' 'Auf Verknüpfungspunkte transformieren'. Hierfür müssen die auf dem Messobjekt angebrachten Messmarken nicht zuvor fotogrammetrisch in ein Zielkoordinatensystem eingemessen werden. Die Referenzierung einer neuen Aufnahme zu einer vorherigen erfolgt über die automatische Erkennung der auf beiden Einzeldatensätze gemeinsam vorhandener Messmarken. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 73 und 73 f.] Hierfür muss gewährleistet sein, dass im gemeinsamen Überlappungsbereich mindestens drei Messmarken vorhanden sind. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 70] Beide der genannten 'Matchingstrategien' weisen den Vorteil auf, dass sie bei besonders geringfügig strukturierten Oberflächen von großem Nutzen sind. Die Arbeit mit Marken kann unter Umständen die einzige Möglichkeit sein, eine Verkettung der Aufnahmen zu ermöglichen. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 74] Dabei übertrifft die ersterwähnte Variante die zweite an Genauigkeit deutlich. Durch die fotogrammetrische Bestimmung sind die Messmarken dort mit hoher Präzision in ein ihnen übergeordnetes Objektkoordinatensystem erhoben worden. Ihr Bezugspunkt ist folglich ein einheitlicher und zugleich universeller Datensatz. Hingegen erfolgt bei der 'Matchingstrategie' 'Auf Verknüpfungspunkte transformieren' die Referenzierung und die damit verbundene Transformation immer über den vorherigen Datensatz. Da der Bezugspunkt hier immer die vorherige Aufnahme ist, besteht die Gefahr der Fehleraddition. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 74 f.]

420 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 74



Ergebnis der Ausrichtung zu verbessern. Nach dem Starten des 'Matching' werden sämtliche Messpunkte im Überlappbereich der Aufnahmen anhand struktureller Merkmale mathematisch miteinander in Beziehung gesetzt. Die hier zugrundeliegenden Rechenoperationen wiederholen sich in iterativen Schritten. Sind die Datensätze optimal miteinander konvergiert, so bricht die Iteration automatisch ab und das 'Matching' ist erfolgreich abgeschlossen.[421] Quantitativ lässt sich die Annäherung der Messpunkte der beteiligten Einzeldatensätze über den Konvergenzwert ablesen. Je kleiner die dort angegebene Zahl ist, desto größer ist die Übereinstimmung.[422] Darüber hinaus quantifiziert die Standardabweichung wie sehr die Punkte im Überlappbereich um den Mittelwert streuen.[423] Im Fortgang der weiteren Objektdigitalisierung öffnet sich der 'Matchingdialog' alsbald erneut. Durch die Wiederholung der oben beschriebenen Arbeitsschritte kann auf diese Weise das 3D-Modell des Untersuchungsgegenstandes sukzessiv komplettiert werden.[424]

Abb. 65| Dialog-Fenster zu ‚Freies Flächen Matching'. Die Zahl im Feld ‚Iteration' gibt an wie viele Iterationsschritte bereits durchgeführt worden sind. Hier sind es bereits zehn von zehn Iterationen. Weiter ist für die qualitative Beurteilung der Deckung der beiden Aufnahmen der Wert der ‚Konvergenz' relevant – dieser ist dort mit 0,0002 mm angegeben und spricht quantitativ für die besondere Güte. Quelle: Selbst

421 Zur benutzerseitigen Überprüfung ob sich das ‚Matching' qualitativ verbessern lässt, sollte die Taste ‚Matching neu starten' wiederholt gedrückt werden. Bricht die Iteration bereits nach dem ersten Schritt ab, so wird durch wiederholte Berechnung eine weitere Optimierung nicht möglich sein.

422 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 84

423 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 85

424 Im ereignisorientierten Prozessablaufdiagramm ist dieses durch eine Schleife kenntlich (▶Abb. 64|). Weitere Angaben zur Durchführung ‚Freie Flächen Matching' findet sich im Bedienerhandbuch des Sensors. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 74 ff. Ein Sonderfall der erörterten Arbeitsweise 'Freie Flächen Matching' ist die Variante mit der 'Automatische Vorausrichtung'. Zu ihrer Anwendung muss im Dialog-Fenster 'Flächen-Matching' einer Einzelaufnahme' unter der Rubrik 'Vorausrichtung' der Selektionspunkt 'Automatisch' angewählt werden. Über das 2D-Kamerabild werden bei beiden Einzeldatensätzen korrespondierende Merkmale automatisch erkannt. Softwareseitig werden daraufhin beide virtuelle Modelle von selbst vorausgerichtet – eine Interaktion durch den Benutzer ist nicht mehr erforderlich. Grundvorraussetzung ist hierfür abermals eine geeignete Objektstruktur und ein genügend großer Überlappungsbereich. Weiter darf die Sichtwinkeldifferenz der beiden Einzelaufnahmen nicht größer als 45 ° sein. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 77] In der praktischen Verfahrensanwendung zeigte sich, dass die 'Automatische Vorausrichtung'

13.4.2 Datennachverarbeitung (Punktewolke)

Nach abgeschlossener Digitalisierung und dem 'Matching' von Einzelaufnahmen erfolgt die Datennachverarbeitung der Messpunkte. Bis dato liegen die Einzelaufnahmen in einer sogenannten Punktewolken vor (►Abb. 77|). Mit der Datennachverarbeitung wird das Ziel verfolgt, die Messdaten für die weiteren Arbeitsschritte global zu optimieren. Vorrangig ist damit die Passgenauigkeit der Einzelaufnahmen zueinander, aber auch die Dateigröße gemeint.[425]

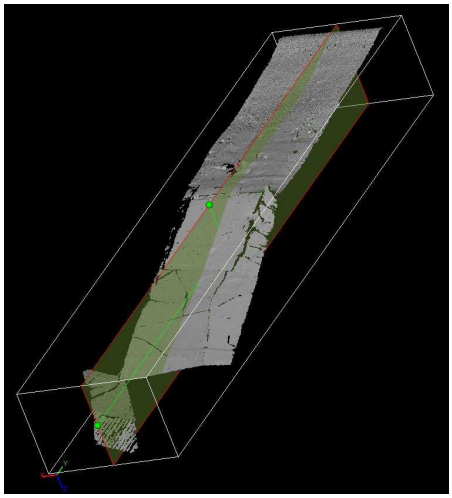


Abb. 66| Bildschirmfoto eines virtuellen, die Messpunkte umgebenden Quaders. Hier verdeutlicht anhand der Schnittlinienfunktion. Quelle: Selbst

'Constrained Matching'

Besteht der Datensatz aus mehreren verketteten Einzelaufnahmen, so können diese aufgrund sich aufsummierter 'Matchingfehler' im Überlappbereich Klaffungen aufweisen.[426] Insbesondere bei volumenumspannenden Aufnahmen und/oder komplex geformten Objekten kann der 'Matchingfehler' so groß sein, dass sich die erste mit der letzten Aufnahme nicht deckungsgleich verbinden lässt. Das Risiko der 'Matchingfehler' ist dabei äquivalent zur Anzahl der Einzelaufnahmen. Zur Berechnung spannungsfreier und geschlossener 3D-Modelle steht in der Sensor-Software die Funktion des 'Constrained Matching' zur Verfügung. Während der Berechnung werden im Überlappbereich korrespondierende Punkte der Aufnahmen ermittelt. Nachdem die Einzeldatensätze global zueinander in Beziehung gesetzt worden sind, wird ihre räumlichen Lage mathematisch so verändert, dass nach Möglichkeit ein spannungsfreies 3D-Modell entsteht. Bei der Berechnung werden zusätzliche Randbedingungen und Durchdringungen der Aufnahmen berücksichtigt.[427] Der räumliche Bezug der Messpunkte der Einzelaufnahmen bleibt dabei untereinander unverändert.[428] Die Annäherung wird über den, im Idealfall immer kleiner werdenden, Konvergenzwert zum Ausdruck gebracht (►Abb. 68|). In der Tabelle werden die Ergebnisse der Berechnung angezeigt bzw. laufend aktualisiert. Darüber hinaus lässt sich das Maß

nur in seltenen Fällen funktioniert. Mutmaßlich sind die Oberflächenstrukturen der Messobjekte hierfür zu ähnlich.

425 In der Gerätesoftware lassen sich verschiedene Einstellungen vornehmen, wobei der Benutzer bei seiner Arbeit anhand verschiedener Dialoge unterstützt wird.

426 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 91. 'Steinbichler' spricht in diesem Kontext von Spannungen.

427 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 91 ff.

428 Die im zugehörigen Dialog-Fenster angezeigten Einstellungsmöglichkeiten der ‚Constraints Toleranzen' (►Abb. 67|) sind nur dann benutzerseitig vorzunehmen, wenn fotogrammetrisch eingemessene Referenzpunkte oder Marken mit digitalisiert worden sind. Hier kann eingestellt werden, wieweit die Datensätze von diesen, ihnen übergeordneten Messpunkten, maximal verschoben werden dürfen – ihre Einstellung erfolgt in der Einheit Millimeter. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 92 f.] Referenzpunkte oder Marken wurden bei dem vorliegenden Projekt nicht verwendet, sodass die 'Constraints Toleranzen' unberücksichtigt bleiben können. Das entsprechende Eingabefeld 'Referenzpunkte' ist daher in ►Abb. 67| ausgegraut. Trotz der verwendeten 'Matchingstrategie' 'Freies Flächen Matching' sollte das Kontrollkästchen 'Freies Matching' nicht selektiert werden. Bei dieser Einstellung werden die Eckpunkten der virtuellen Quader, welche eine jede Aufnahme umschließen, und damit repräsentativ für das Messvolumen sind, zueinander in Beziehung gesetzt. Benutzerseitig lässt sich über Toleranzen einstellen, wie weit die Eckpunkte der einzelnen Quader von ihren Ausgangspunkten wegbewegt werden dürfen. Die Bewegungsfreiheit der auszurichtenden Datensätze würde hierbei jedoch unnötigerweise beschränkt werden, sodass von dieser Einstellung abzusehen ist. Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013

der aktuellen lokalen Klaffungen quantitativ und qualitativ visualisieren. Hierfür steht eine Falschfarbendarstellung zur Verfügung (►Abb. 67|).[429]

Analog zu 'Freies Flächen Matching' ist das 'Constrained Matching' erfolgreich beendet, wenn der eingestellte Konvergenzwert für alle Datensätze erreicht ist. Die mit dem 'Constrained Matching' verbundenen Rechenschritte sind aufwändig, zeit- und performance-intensiv.[430]

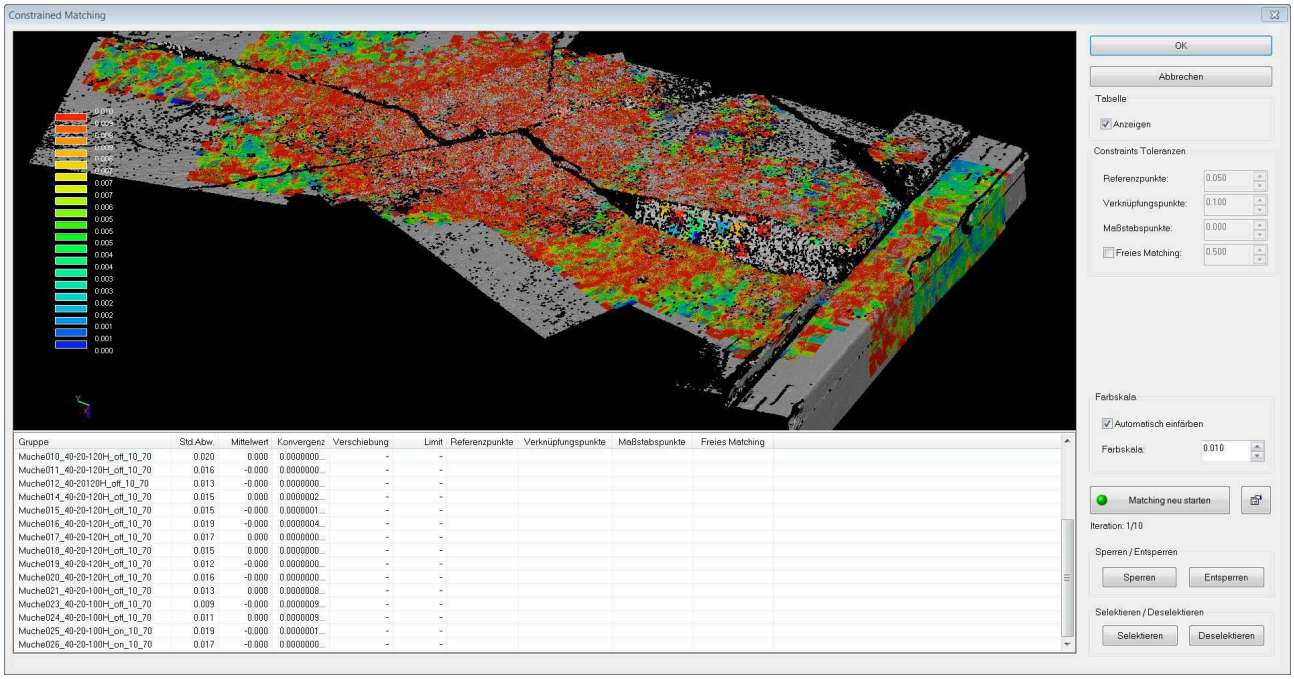


Abb. 67| Bildschirmfoto des Dialogs 'Constrained Matching'. Unterhalb der 3D-Ansicht des Digitalisates befinden sich die tabellarisch aufgeführten Einzeldatensätze. In der ersten Spalte steht der Name und die Nummer des betreffenden Datensatzes. In der zweiten Spalte wird die Standardabweichung in Millimetern angeben. Weiter beinhalten die Angaben zur Konvergenz Aussagen über das Maß der durchgeführten Verschiebungen.
Quelle: Selbst

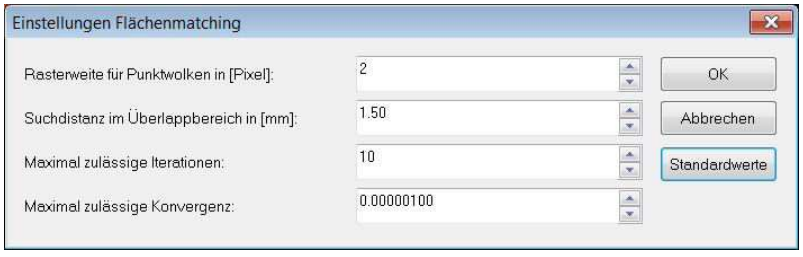


Abb. 68| Dialog-Fenster 'Einstellungen Flächenmatching'. Hier mit den Standardwerten.
Quelle: Selbst

429 Der Wertebereich der Falschfarbenskala ist benutzerseitig über eine Eingabemaske zu justieren. Damit sind Anhaltspunkte zur Bewertung der Güte des ‚Constrained Matching' gegeben. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 92

430 Sind die Rechenoperation sehr zeitintensiv, so ist es möglich diese benutzerseitig abzubrechen. In diesen Fällen ist es ratsam, die ‚Matchingeinstellungen' über das Dialog-Fenster ‚Einstellungen Flächen Matching' zu verändern (►Abbildung 70). Im Bedienerhandbuch der Gerätesoftware gibt der Hersteller als eine Optimierungsmöglichkeit an, den Wert der ‚Rasterweite für Punktwolken' etwas größer zu wählen. Es wird dort die Empfehlung ausgesprochen zunächst mit einem Wert von vier zu beginnen, zu kontrollieren wie schnell die Iterationsschritte verlaufen und gegebenenfalls abzubrechen, um die Rasterweite zu erhöhen. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 94

'Maskieren und Beschneiden'

Im Zuge einer Messung werden, bei geeigneter Belichtung, sämtliche sich im Messvolumen befindenden optisch-brechende Oberflächen digitalisiert. Der Sensor, bzw. die Software, unterscheidet dabei nicht zwischen Messobjekt und Hintergrund. Damit sind beide Bestandteil der Messdaten. Um für die weitere Bearbeitung nur die relevanten Datenbereiche zu berücksichtigen und zudem die Dateigröße zu reduzieren, lassen sich die Messdaten maskieren und beschneiden. Hierdurch kann das 3D-Modell interaktiv vom Hintergrund freigestellt werden (►Abb. 69|).[431]

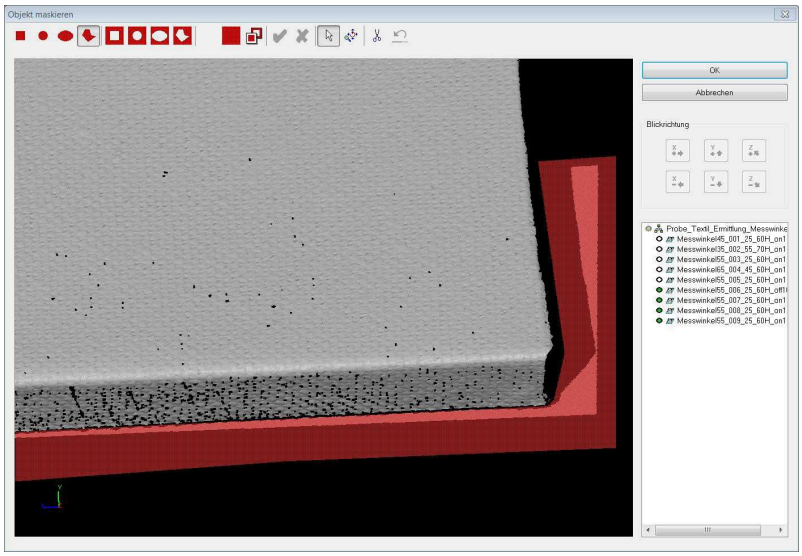


Abb. 69| Dialog-Fenster zur Freistellung des virtuellen Objektes vom Hintergrund. Für diese Arbeit steht eine Werkzeugpalette zur Verfügung.
Quelle: Selbst

13.4.3 Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz)

Bis zu diesem Arbeitsschritt besteht das 3D-Modell aus mehreren Einzelaufnahmen. Mit der Datennachverarbeitung wird das Ziel verfolgt, die daraus resultierende Punktewolke zu einem das Messobjekt umspannenden Dreiecksnetz zu vermaschen. Damit werden die Daten zum einen weiter optimiert, zum anderen reduziert sich die Größe des Datensatzes - bspw. durch das Löschen der im Überlappbereich doppelt vorhandenen Daten.[432] Benutzerseitig sind im Vorfeld der Datennachverarbeitung Einstellungen vorzunehmen, wobei die darauf folgende Berechnung vollautomatisch abläuft. Dieses stellt sich als ein sinnvoller Programmablauf heraus, da die Rechenoperation aufgrund ihrer Komplexität mitunter einige Zeit in Anspruch nehmen können.[433]

'Automatische Datennachverarbeitung'

Grundsätzlich sind die im gleichnamigen Dialog-Fenster einzustel-

431 Die einzelnen Arbeitsschritte und die zur Freistellung erforderlichen Werkzeuge werde im Bedienerhandbuch erörtert. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 97 ff.

432 Des Weiteren können bei diesem Arbeitsschritt die Daten in geeignete Exportformate umgeschrieben werden, sodass der Import in eine weiterverarbeitende Software für bspw. CNC-Fräsmaschinen oder 3D-Drucker möglich ist.

433 Die Ausführungen zu den Optionen und den genauen Einstellungsmöglichkeiten der Datennachverarbeitung sind dem Bedienerhandbuch der Firma ‚Steinbichler' zu entnehmen. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 129-137

lenden Toleranzen und Filter so zu verstehen, dass sich das Ergebnis nach der Berechnung um maximal den eingestellten Betrag von den originalen Ausgangsdaten unterscheidet (►Abb. 70|).[434]

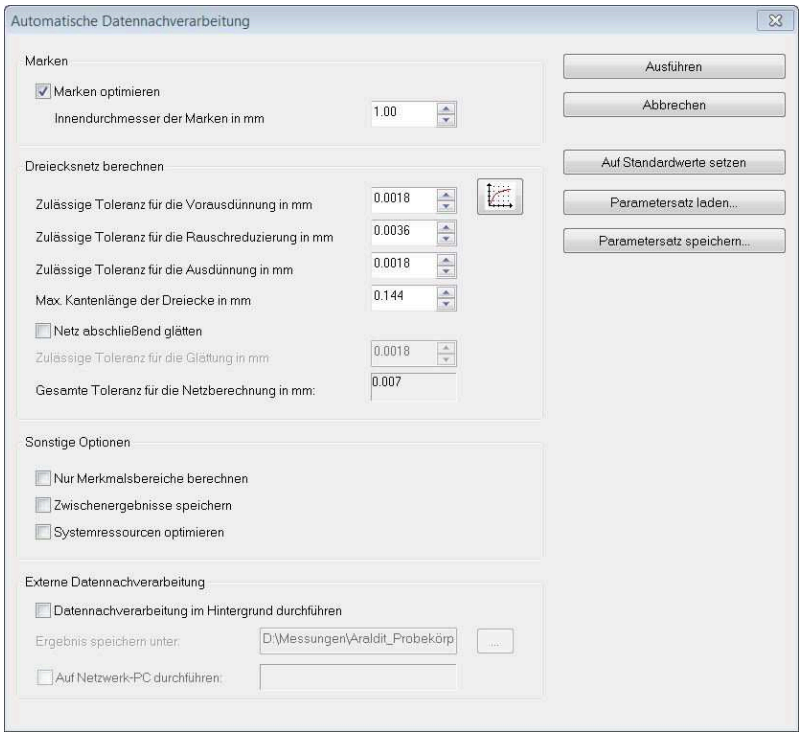


Abb. 70| Dialogfenster zur 'Automatischen Datennachverarbeitung'.
Quelle: Selbst

Zur Reduzierung des Rauschens lassen sich 'Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung in mm', als Schritt vor der Triangulation einstellen.[435,436] Da jedoch der Strukturerhalten im Rahmen der Fragestellung essentiell ist, findet die Funktion keine Anwendung.[437]

434 Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013

435 Der Begriff Triangulation steht hier in doppeldeutiger Verwendung. Neben der Vermaschung der Punktewolken zum Dreiecksnetz, wird damit gleichermaßen auch das Funktionsprinzip des Sensors beschrieben (►Kapitel 12.2|).

436 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 133

437 Zur Ermittlung geeigneter Werte kann eine objektspezifische Datenanalyse vorgenommen werden. Hierzu ist die gesonderte Schaltfläche neben dem betreffenden Eingabefeld zu betätigen. Daraufhin öffnet sich ein Dialog-Fenster ‚Analyse für Datenausdünnung' (►Abb. 71|). Dort lassen sich mittels eines Polygonen-Lasso-Werkzeuges charakteristische Objektbereiche markieren und die Berechnung starten. Anhand eines Graphen wird der Maximalfehler und die Reduktionsrate visualisiert und gleichzeitig die Empfehlung eines Werts für die entsprechende Vorausdünnung angezeigt. Dieser Parameter wird daraufhin automatisch in das Eingabefeld ‚Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung in mm' im Dialogfenster ‚Automatische Datennachverarbeitung' übernommen und kommt dort wiederum bei der Berechnung zur Vorausdünnung des gesamten Datensatzes zur Anwendung. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 133] Bei der Systemerprobung ergaben die über die Datenanalyse ermittelten Parameter bei der folgenden Vermaschung der Punktewolken zu Dreiecken nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse. So wurden teilweise charakteristische Objektstrukturen nivelliert. Insbesondere periodisch auftretende Strukturen, wie bspw. Gewebstrukturen, wurden tendenziell eingeebnet dargestellt. Das betrifft erhabenen Bindungspunkte von Kett- und Schussfäden. In diesem Zusammenhang wird festgehalten, dass durch die selektive Analyse charakteristischer Objektbereiche diese nicht zwangsläufig repräsentativ für das gesamte Objekt sein müssen. Zudem stellt sich die Frage, entsprechend welcher Merkmale repräsentative Objektbereiche ausgewählt werden. Aus Autorensicht mag das oben geschilderte Vorgehen zur Ausdünnung der Daten bei industriell hergestellten Objekten mit homogenen Oberflächen zulässig sein. Für den Untersuchungsgegenstand Gemälde wird diese Funktion negiert. Ein weiteres Argument ergibt sich durch das Schadensmonitoring und die forcierte Detektion von Schadensmerkmalen. Hier stehen insbesondere die Oberflächenstrukturen im Fokus der Untersuchung welche von der übrigen, repräsentativen Objektstruktur abweichen. Keinesfalls dürfen Schadensmerk-

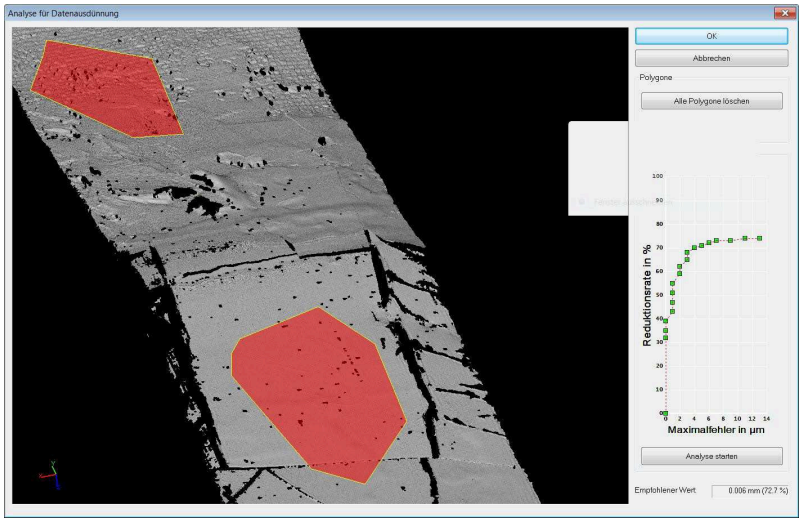


Abb. 71| Dialogfenster zur Ermittlung der Datenausdünnung zur Rauschreduzierung. Quelle: Selbst

Bei dem Eingabefeld 'Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung in mm' kann eingestellt werden, um wie viel Millimeter die Punkte im Dreiecksnetz im Verhältnis zu ihren Originaldaten durch die Berechnung maximal verschoben werden dürfen.[438] Dabei werden die Nachbarpunkte mit berücksichtig. Folglich bleiben die Messpunkte bei dieser Filterung erhalten – lediglich ihre räumliche Position wird verändert (►Abb. 72|). Ein entsprechender Wert sollte nicht zu groß gewählt werden um auch feine Strukturen beizubehalten. Gleichermaßen ist hier abzuwägen zwischen einer Strukturerhaltung und dem Bildrauschen. Ausschlaggebend sind bei dieser Einstellung individuelle Objektstrukturen. Ein Richtwert ist an dieser Stelle für den Untersuchungsgegenstand 'Kunstwerk' nicht zu generalisieren.

Rauschreduzierung 0,0036 mm

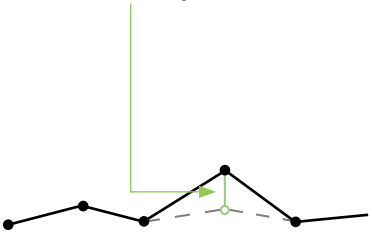


Abb. 72| Grafik zur 'Rauschreduzierung'. Einzelne über den Gesamtverband hinausragende Punkte werden in Relation zu ihren Nachbarpunkten korrigiert. Der Wert der 'Zulässigen Toleranz für die Rauschreduzierung in mm' quantifiziert hierbei das Maß der maximal zulässigen Verschiebung. In Abhängigkeit zu den Standardwerten aus Abbildung 70 beträgt der Wert bei diesem Beispiel 0,0036 mm. Quelle: Nach Franz (Fa. Steinbichler), 2013

Über die 'Zulässige Toleranz für die Ausdünnung in mm' wird benutzerseitig eingestellt bis zu welchem Maximalwert ein Filter wirkt um vereinzelte, signifikant aus dem Gesamtgefüge herausragen Messpunkte zu löschen (►Abb. 73|).[439]

Der Wert 'Max. Kantenlänge der Dreiecke in mm' quantifiziert wie lang die Dreiecke des Dreiecksnetzes nach der Berechnung maximal sein dürfen.[440] Dieser Einstellung liegt der Gedanke zugrunde, dass die Anzahl der Dreiecke proportional konträr zur Kantenlänge derselben ist. Einhergehend mit längeren Dreiecksseiten reduziert sich die Dateigröße, gleichzeitig verringern sich auch die Details des

‚Ausdünnung' durch Löschen von Punkten

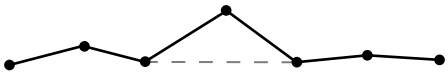


Abb. 73| Glättung durch Löschen von herausragenden Einzelpunkten. Quelle: Selbst

male durch ungünstige Einstellungen verloren gehen. Nachfragen beim Entwickler der Gerätesoftware bestätigten die oben gemachten Überlegungen. Nach einer gemeinsamen Analyse der Daten wurde von 'Steinbichler' die Empfehlung ausgesprochen in Anbetracht der Eigenschaften des Untersuchungsgegenstandes auf die Datenanalyse gänzlich zu verzichten und mit Standardwerten zu arbeiten. [Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013] In diesem Fall werden alle verbleibenden Parameter unter der Rubrik 'Dreiecksnetz berechnen' gleichermaßen mit Standardwerten versehen. Gleichwohl können diese nachträglich manuell verändert werden. In Vorversuchen zeigte sich, dass die 'Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung in mm' in jedem Fall durch Standardwerte erfolgen sollte. Bei den übrigen Parametern kann das Ergebnis der Triangulation unter Umständen durch veränderte Werte zusätzlich gesteigert werden.

438 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 130, sowie: Franz (Fa. Steinbichler), 2013

439 Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013

440 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 130

3D-Modells. Zur Strukturerhaltung sollte dieser Wert daher tendenziell kleiner gewählt werden.
Bei Selektion des Glättungsfilters 'Netz abschließend glätten' wird ein globaler Filter auf das Dreiecksnetz angewandt. In der Einheit Millimeter kann eingestellt werden, wieweit hierzu die Punkte des später berechneten Dreiecksnetzes von den Koordinaten der Messpunkte wegbewegt werden dürfen.[441] Auch bei dieser Funktion ist zwischen dem Strukturerhalt einerseits und den durch das Messrauschen verursachten Effekten andererseits abzuwägen. Diese Funktion ist für Objekte mit homogenen Oberflächen konzipiert. Nach Angaben des Softwareentwicklers hat die Filterung keine Auswirkungen auf die Objektkanten und Oberflächenstrukturen. Gleichwohl wird aufgrund der vorliegenden Messanforderung und der Beschaffenheit des Untersuchungsgegenstandes von einer Funktionsanwendung abgeraten.[442] Zugleich ergaben eigene Untersuchungen den Verlust von Objektstrukturen bei angewandter Filterfunktion (►Abb. 74| - Abb. 76|). Interkurrierend besteht jedoch eine eingeschränkte Nutzbarkeit

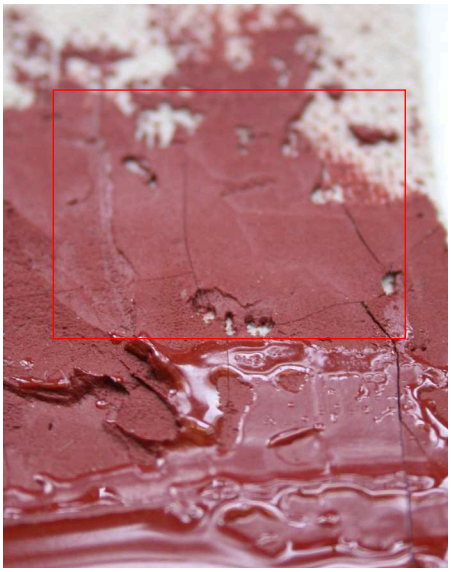


Abb. 74| Zur Untersuchung der Auswirkung des Glättungsfilter wurde eine Malschichtprobe gewählt und digitalisiert. Zu Vergleichszwecken ein Foto der Probe mit einem rot markierten Bereich – repräsentativ für die nebenstehend gezeigten Abbildungen.
Quelle: Selbst

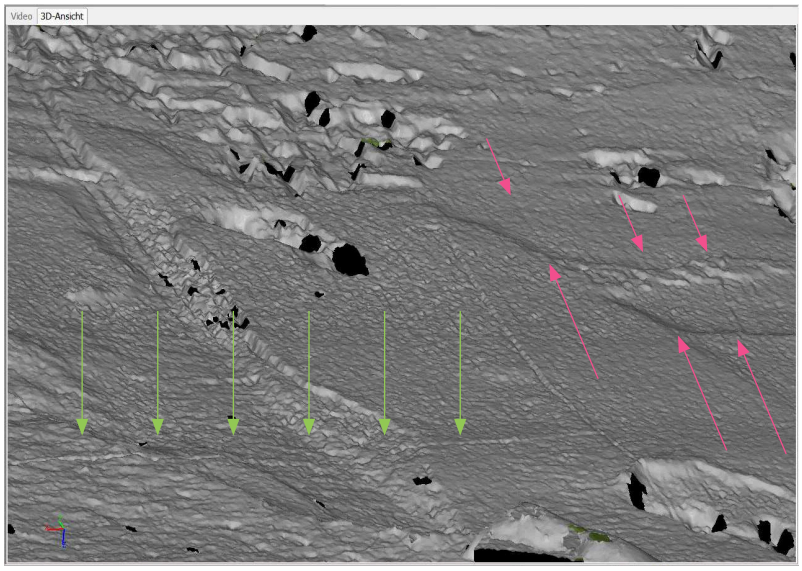


Abb. 75| Bildausschnitt der 3D-Ansicht der Malschichtprobe ohne angewandten Glättungsfilter. Mit dem grünen Pfeil versehen ein feiner Riss. Eine diagonale Struktur ist durch magentafarbene Pfeile hervorgehoben.
Quelle: Selbst

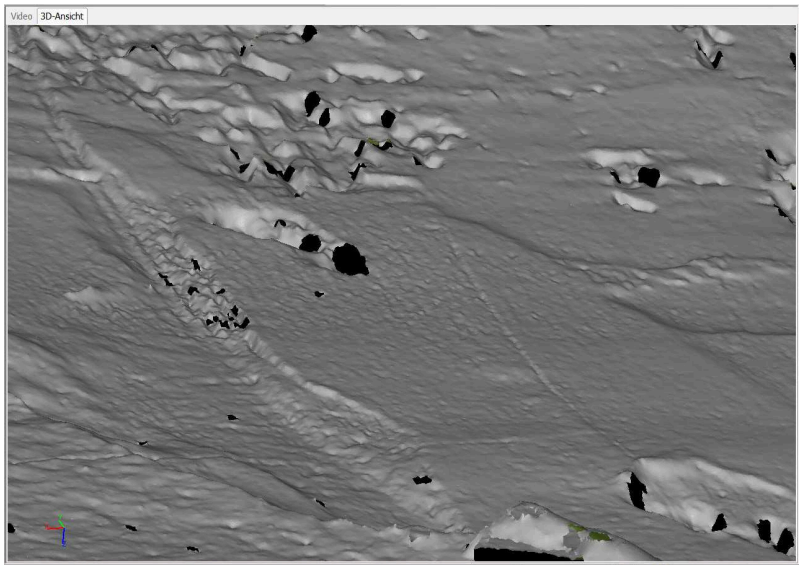


Abb. 76| Der selbe Ausschnitt der Malschichtprobe mit angewandtem Glättungsfilter. Die Oberfläche ist deutlich ebener als in der vorhergehenden Abbildung. Zudem sind Rissstrukturen und Kanten tendenziell nivelliert. Augenscheinlich ist darüber hinaus auch der Strukturverlust im Bildhintergrund.
Quelle: Selbst

441 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 131

442 Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013

sehr großer Datenmengen. Letzteres bezieht sich auf die Trägheit bei der Ansicht im 'Viewer', dem Speicherbedarf und der späteren Datenauswertung sowie etwaige Schritten der Weiterverarbeitung.
Der Wert über die 'Gesamte Toleranz für die Berechnung in mm' wird automatisch ermittelt und gibt „[…] die Summe der zulässigen Toleranzen der Einzelschritte [bei der Berechnung des Dreiecksnetzes] an."[443] Mit diesem Wert wird ein Überblick über die quantitative Veränderung der triangulierten Daten im Vergleich zu ihren Ursprungsdaten gegeben.
Die übrigen Einstellungen im Dialog-Fenster 'Automatische Datennachverarbeitung' sind für die eigenen Messungen nicht bedeutsam und werden daher außer acht gelassen. Insbesondere bei großen Datensätzen sollte jedoch die Einstellung 'Systemressourcen optimieren' selektiert werden. So kommt es trotz der überzeugenden technischen Merkmale des Computers vor, dass der Speicher zur Berechnung der Daten nicht ausreicht. Ist die oben genannte Einstellung selektiert so wird vor der Datennachverarbeitung eine Analyse derselben durchgeführt um den Rechenprozess zu optimieren.[444]
Nach ausgeführter Datennachverarbeitung sind die Punktewolken der Einzelaufnahmen zu einem triangulierten 3D-Modell zusammengeführt (►Abb. 77| und Abb. 78|).[445]

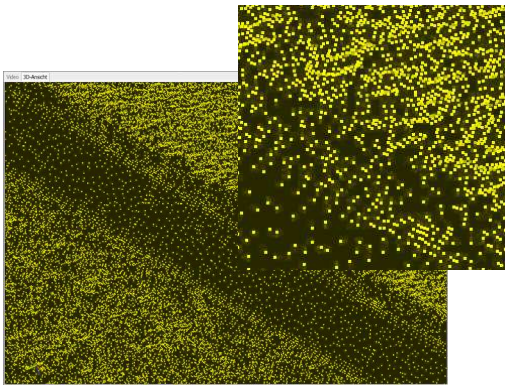


Abb. 77| Bildschirmfoto mit den Punktwolken, wobei die zugehörigen Einzelaufnahmen optisch nicht voneinander zu unterschieden sind.
Quelle: Selbst

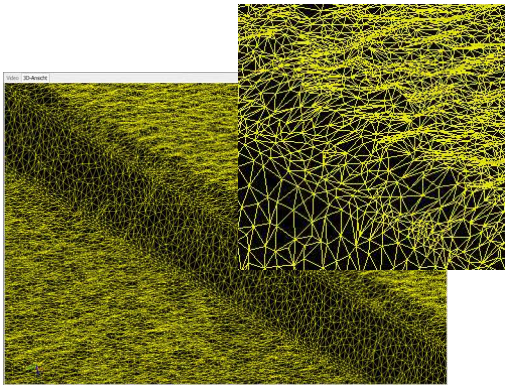


Abb. 78| Der Bildausschnitt entspricht dem der vorherigen Abbildung, allerdings sind hier die Einzelaufnahmen bereits trianguliert. Aus den Punktewolken ist nun ein Dreiecksnetze geworden.
Quelle: Selbs

Anmerkung zur 'Automatischen Datennachverarbeitung'

Aus Autorensicht ist ein detailliertes Wissen über die Parameter der Datenverarbeitung von entscheidender Bedeutung. Durch sie wird die Qualität der Digitalisate maßgeblich beeinflusst. Daher sind die Ausführungen hier entsprechend umfangreich.[446]
Bei den Vorarbeiten zur Systemerprobung zeigt sich, dass grundsätzlich sehr gute Triangulationsergebnisse über herstellerseitige Standardwerte zu erreichen sind. Eine zusätzliche Steigerung kann durch eine leichte Verringerung der Parameter erzielt werden. Die Standardwerte sind in der Software hinterlegt und werden maßgeblich durch das verwendete Messfeld, bzw. durch den Punktabstand der verwendeten Sensorkonfiguration bestimmt.[447] Bei der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' wird bei der Verwendung der hinterlegten Standardwerte die 'Gesamte Toleranz für Nachbearbeitung in mm' mit einer Summe von 0,007 mm angegeben. Das Äquivalent für 'COMET 5 11M 1000' wird mit 0,090 mm quantifiziert.[448]

443 Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 131

444 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 131

445 Im Daten-Explorer der ‚COMETplus-Software' werden daher die bis dato als Einzelaufnahmen gelisteten Messdaten zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengefasst. Die Eigenschaft der zu Dreiecken vermaschten Oberfläche wird dort anhand des Dreieck-Symbols kenntlich.

446 Informationen, die nicht aus dem Bedienerhandbuch hervorgehen, wurden direkt mit Mitarbeitern des Herstellers erörtert. Da es sich hierbei ausnahmslos um ‚Graue Literatur' handelt, bzw. persönliche Mitteilungen, erfolgt der Quellennachweis über die im Anhang abgedruckte Korrespondenz (►Kapitel 29.16|und Kapitel 29.17|).

447 Vergleiche: Franz (Fa. Steinbichler), 2013; Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 132

448 Bei der Initialisierung der betreffenden Messvolumina im Falle einer Sensor-Umstellung und/oder Kalibrierung werden im Hintergrund der Software auch die Verknüfpungen zu den betreffenden Standardwerten aktualisiert. Zudem können eigene

Daten ausrichten

Die räumliche Ausrichtung des 3D-Modells wird bis hierher immer noch durch das Sensor-/Objekt-Verhältnis der zuerst erstellten Aufnahme, bzw. dessen Koordinatensystem bestimmt. Mitunter besteht bei einer Weiterverarbeitung der Daten jedoch die Forderung einer spezifischen Ausrichtung – bspw. für einen Soll-Ist-Vergleich. Ferner verlaufen auch Schnittlinien orthogonal zu den Koordinatenachsen, sodass ihre Reproduzierbarkeit in unmittelbarer Abhängigkeit zur Objektausrichtung steht. In 'COMETplus' stehen für eine Ausrichtung verschiedene interaktive Optionen zur Verfügung. Allen ist gemein, dass für ihre Anwendung bei dem 3D-Modell die Vorraussetzung zumindest einer planen Ebene erfüllt sein muss. Die Ausrichtung gelingt über: 'Transformation',[449] '3-Ebenen Ausrichtung',[450] '3-2-1 Ausrichtung'.[451]

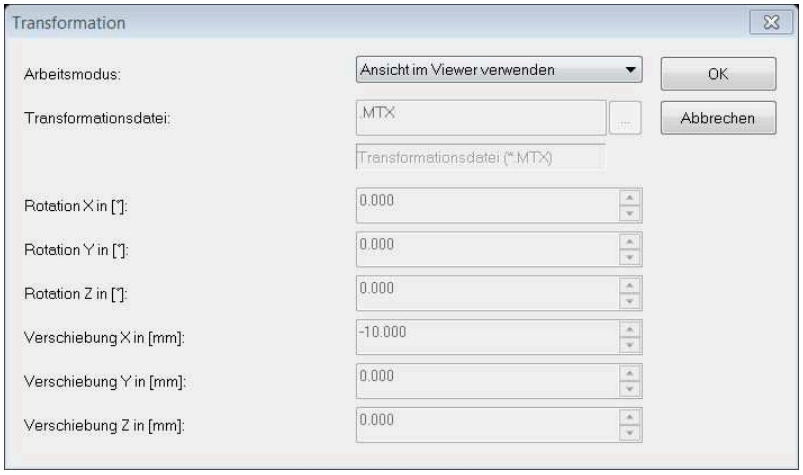


Abb. 79| Dialogfenster zur Ausrichtung der Datensätze mittels 'Transformation'. Quelle: Selbst

Die Ausrichtungsvariante über 'Transformation' der Datensätze ist vergleichsweise ungenau und nicht reproduzierbar (►Abb. 79|). Sie sollte daher nur für einfache Präsentationszwecke verwendet werden. Das 3D-Modell wird hierzu benutzerseitig gemäß subjektiv optischer Gesichtspunkten im 'Viewer' ausgerichtet. Im Zuge der Berechnung werden die Koordinatenachsen daraufhin so transformiert, dass die Betrachtungsrichtung der Z-Achse entspricht.

Die zweite Variante, die '3-Ebenen Ausrichtung', ist weitaus präziser und zudem theoretisch reproduzierbar. Bedingung hierfür sind jedoch drei orthogonal zueinander stehende Flächen – ein Umstand den Kunstwerke nur selten erfüllen (►Abb. 80|). Werden bei der Messung Referenzquader mit digitalisiert, so ist diese Methode sehr effizient und zudem schnell. Dem Grundprinzip nach werden nacheinander die orthogonalen Flächen des 3D-Modells, bzw. die des

Einstellungen der ‚Automatischen Datennachverarbeitung' in der Software hinterlegt und im Bedarfsfall importiert werden (Schaltfläche: ‚Parametersatz laden' / ‚Parametersatz speichern'). Diese Strategie kam bei der eigenen Arbeit zur Anwendung.

449 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 100 ff.

450 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 105 ff.

451 Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 110 ff.

Referenzquaders, über interaktive Zeichenwerkzeuge maskiert und einer entsprechenden Koordinatenachse senkrecht zugeordnet.[452,453]

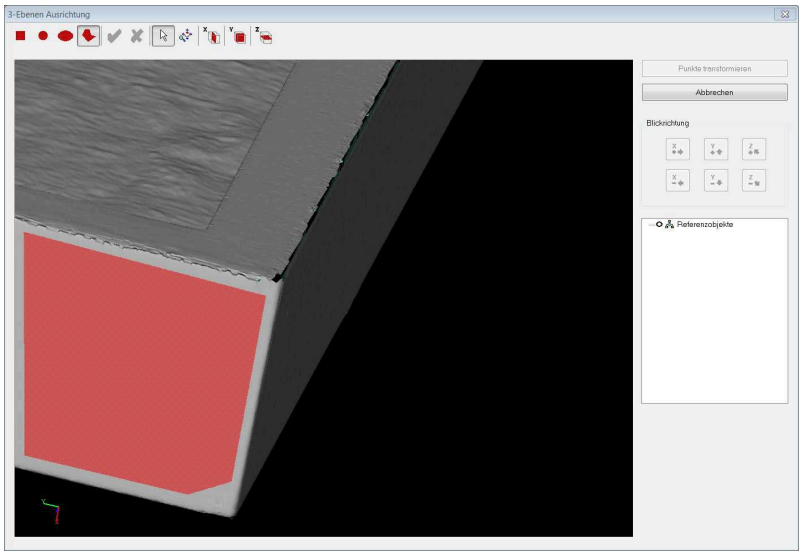


Abb. 80| Dialogfenster zur '3-Ebenen Ausrichtung'.
Quelle: Selbst

Sind keine drei orthogonal zueinander stehende Flächen vorhanden, so ist die Ausrichtungsstrategie der '3-2-1 Ausrichtung' anzuwenden.[454] Hierfür werden über interaktive Maskierungs- und Zeichenwerkzeuge zunächst drei Ebenen definiert. Anschließend wird ihr Verschnitt berechnet, woraus sich Vektoren ergeben. Letztere sind später repräsentativ für die Koordinatenachsen, wobei ihr

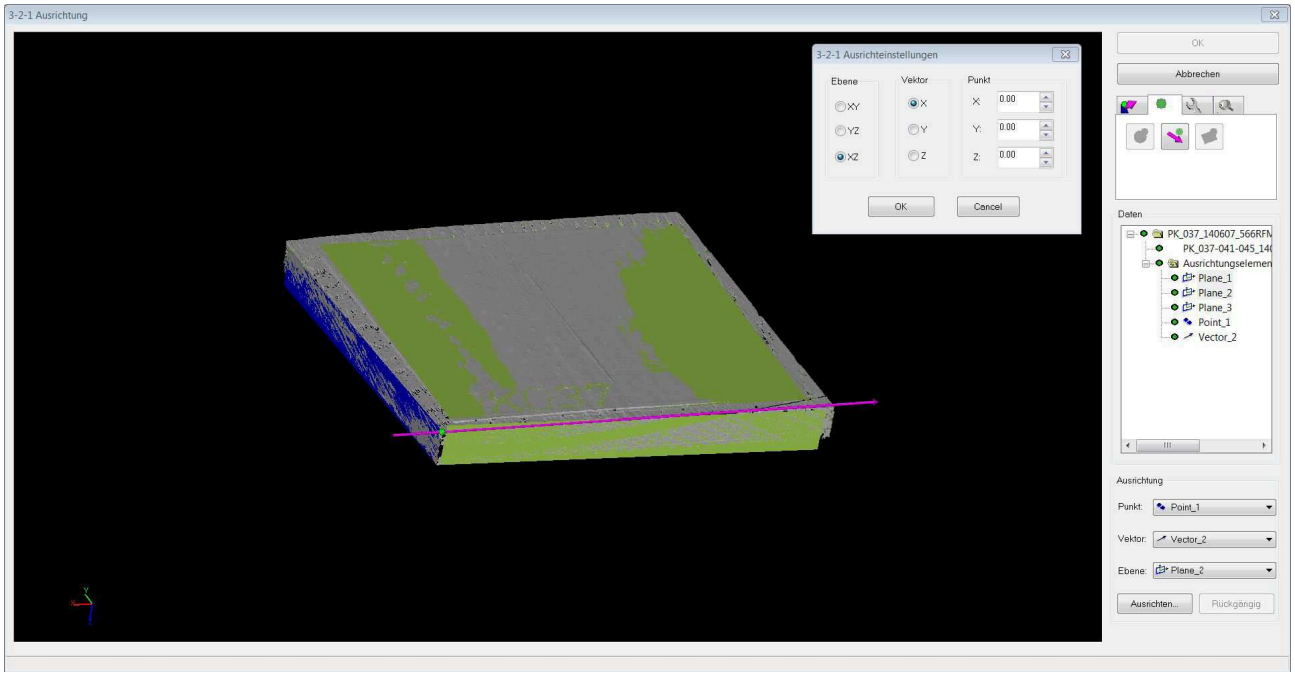


Abb. 81| Dialogfenster zur Ausrichtung der Datensätze mittels '3-2-1 Ausrichtung'. Bei dem virtuellen Modell sind die Elemente von drei Ebenen, einem Vektor, der sich aus dem Verschnitt von zwei Ebenen ergibt, sowie einem den Ursprung definierenden Punkt gezeigt. Neben einer Ebene werden diese Elemente zur virtuellen Ausrichtung verwendet.
Quelle: Selbst

452 Der Ablauf dieser Arbeitsschritte kann dem Bedienerhandbuch entnommen werden. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 105 ff.

453 In den geleisteten Vorarbeiten erfolgte die Ausrichtung der Datensätze über die ‚3-Ebenen Ausrichtung'. Dementsprechend wurde gemeinsam mit dem Objekt immer auch ein Referenzquader digitalisiert (►Kapitel 7.6|). Diese Vorgehensweise stellte sich jedoch prinzipiell als ungeeignet heraus. Dieser Sachverhalt wird in ►Kapitel 20.3.2| erörtert.

454 Drop-down-Menü: ‚Nachverarbeitung' → ‚Ausrichtung' → ‚3-2-1 Ausrichtung'.

Schnittpunkt dem Ursprungspunkt des Koordinatensystems entspricht (►Abb. 81| und Abb. 82|). Anhand der aufgeführten Elemente Ebene, Vektor und Punkt wird folgend das Objekt ausgerichtet.[455] Grundsätzlich obliegt der zuletzt geschilderten Variante der Datenausrichtung der Vorteil, dass diese auch bei Objekten möglich ist, die keine orthogonal-/strenggeometrische Formen aufweisen.

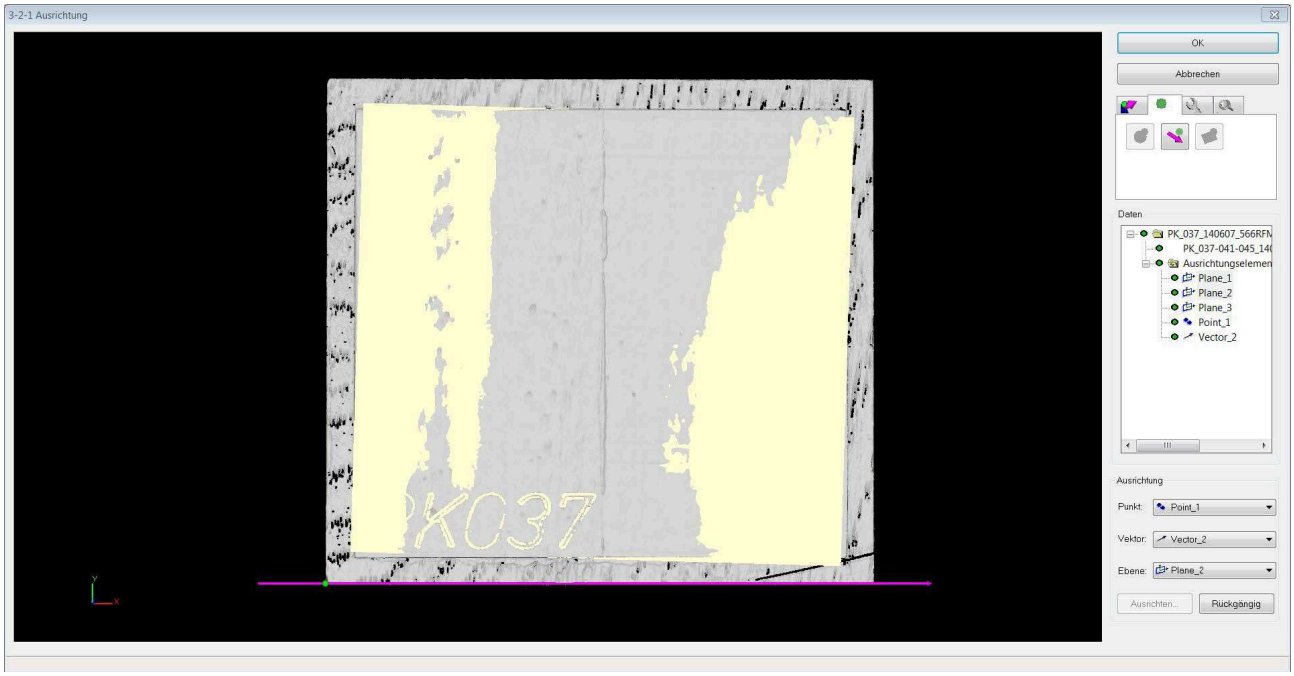


Abb. 82| Dialogfenster mit dem Ergebnis der '3-2-1 Ausrichtung'. Das virtuelle Modell ist nach der Berechnung so ausgerichtet, dass von dem Koordinatendreibein die Y-Achse der Höhe zugeordnet ist, wohingegen die X-Achse die Breite definiert und die Z-Achse der Betrachterachse entspricht.
Quelle: Selbst

13.5 Datenorganisation und Datenformate

Die originären Messdaten des 'COMET-Systems' werden in dem proprietären Datenformat '*.cdb' gespeichert. In diesem können sowohl 3D-Punktwolken als auch Dreiecksnetze und Schnittlinien gespeichert werden.[456] Das aufgeführte Dateiformat ist für die Erhebung und Bearbeitung der Messdaten in 'COMETplus' vorbehalten.
Aufgrund ihrer Komplexität sind die Dateien bei 'Steinbichler' grundsätzlich in Projekten systematisiert. Ein Projekt besteht im Ausgangspunkt aus einer 'COMETplus-Datei', die mehrere Einzelaufnahmen enthalten kann. Im Zuge der Datennachverarbeitung und der Vermaschung der Punktewolken zum Dreiecksnetz wird diese Ausgangsdatei automatisch dupliziert. Um Redundanzen zu umgehen, erfolgt die selbstständige Erweiterung um die Kennung '*_RawData.cdb', wobei der Dateiname dann in Majuskeln geschrieben wird (►Abb. 83|). Aufgrund dieser Speicherstrategie kann im Bedarfsfall auf die Ursprungsdaten mit den Einzeldatensätzen zurückgegriffen werden. Bspw. um bei einer wiederholten 'Automatischen Datennachverarbeitung' durch modifizierte Parameter ein verbessertes Triangulationsergebnis zu erhalten.

455 Der Ablauf dieser Arbeitsschritte kann dem Bedienerhandbuch entnommen werden. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 110 ff.

456 Ein Überblick über weitergehende Informationen und Eigenschaften dieses Speicherformates können dem Benutzerhandbuch des Sensors entnommen werden. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 48 ff.

Soll der triangulierte Datensatz weiter bearbeitet und ausgewertet werden, so können die Daten in die Auswertungssoftware 'INSPECTplus' importiert werden. Daraus geht dann eine 'INSPECTplus-Datei' im Format '*.ipd' hervor. In der Auswertungssoftware zeigt sich der Vorteil der Datenablage in Form zusammengefasster Projekte. So lassen sich hier, durch den Import von zwei Datensätzen, Soll-Ist-Vergleiche und Abweichungen berechnen, sowie Bezüge herstellen. Hierzu stehen virtuelle Messschieber, Schnittebenen, Nadeldiagramme, Vergleichspunkte und -Formen sowie Falschfarbendarstellungen zur Verfügung.[457] Das Ergebnis der Auswertung kann dann in einem entsprechenden Protokoll im PDF-Format ausgegeben werden. Darüber hinaus können die Daten selbstverständlich auch für Folgeapplikationen exportiert werden.[458]



Name	Änderungsdatum	Typ	Größe
Muche.cdb	14.06.2013 17:31	COMETplus Docu...	247.256 KB
Muche.ipd	17.06.2013 16:30	INSPECTplus Docu...	249.249 KB
Muche.pdf	17.06.2013 17:44	Adobe Acrobat D...	207 KB
MUCHE_RawData.cdb	14.06.2013 17:17	COMETplus Docu...	287.659 KB

Abb. 83| Bildschirmfoto aus dem Windows-Daten-Explorer. Übersicht der verschiedenen, in einem Digitalisierungsprojekt anfallenden Dateien. Die erste Datei ist eine triangulierte 'COMETplus' Projektdatei. Bei der zweiten handelt es sich um eine Auswertungsdatei aus 'INSPECTplus'. Die dritte umfasst die Datei des Messprotokolls im PDF-Format und die letzte Datei ist wiederum eine 'COMETplus' Datei mit den Einzeldatensätzen als Punktewolke. Fernerhin wird die Speichergröße deutlich.
Quelle: Selbst

13.6 Ergebnisprotokolle zur Auswertung der Messergebnisse

Wie bereits angesprochen erfolgt die auswertende Dokumentation der Messergebnisse in 'INSPECTplus' über Protokolle.[459] Dabei handelt es sich um eine zweidimensionale Datenausgabe auf Basis des plattformunabhängigen Dateiformates PDF.[460] Dieses kennzeichnet sich durch den Vorteil, dass die Daten unabhängig vom ursprünglichen Anwendungsprogramm, dem Betriebssystem und der Hardwareplattform anderen Nutzern zur Verfügung stehen können. Gleichwohl ist eine grundsätzliche Einschränkung zu konstatieren: Die 3D-Daten werden in die Ebene projiziert zweidimensional dargestellt. Die essenzielle Eigenschaften einer allseitigen Betrachtungsmöglichkeit und der damit verbundenen Interaktivität durch den Benutzer ist damit gegenstandslos. Nichtsdestominder handelt es sich um eine sehr effiziente Methode um das Messobjekt zu visualisieren, Erkenntnisse darüber zu veranschaulichen und dieselben zu dokumentieren. Auf den Protokollseiten können mehrere Objektansichten unterschiedlicher Vergrößerungsfaktoren und Perspektiven abgebildet werden. Ebenso lassen sich hier qualitative und quantitative Ergebnisse von

457 Einen Überblick über die verschiedenen Werkzeuge und den damit verbundenen Möglichkeiten zur Auswertung gibt das Handbuch der Software ‚INSPECTplus'. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011] Die verwendeten Werkzeuge werden bei ihrer Anwendung im praktischen Teil erörtert.

458 Detaillierte Angaben über Import- und Exportformate finden sich im Benutzerhandbuch des Sensors. [Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 44 ff.] Allen voran ist hier das ASCII-Format für die Datenablage und das STL-Format als Standard für weitergehende Anwendungen hervorzuheben.

459 Weitergehende Informationen über das ‚Erstellen und Bearbeiten von Protokollen' finden sich im gleichnamigen Kapitel des Handbuches von ‚INSPECTplus'. Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 161-199

460 Für das vorliegende Projekt wurden eigen Protokollvorlagen konzeptioniert, die sich für ein Monitoring und die geplante Systemanwendung im musealen Bereich eignen.

Vergleichen und anderen virtuellen Werkzeugen zusammentragen und statisch dokumentieren (►Kapitel 20.3|).[461]

13.7 Kritische Bewertung der Sensor- und Auswertungssoftware, respektive der Bedienbarkeit

Prinzipiell ist durch die Kombination der Sensorsoftware 'COMET-plus' zur Datenerhebung und der Auswertungssoftware 'INSPECT-plus' eine gute Vorraussetzung für effiziente Arbeitsabläufe geschaffen. Aus pragmatischen Gründen eignet sich zudem die Organisation der Daten in Projekten. Die Sensorsoftware ist mit einer sehr übersichtlichen Benutzeroberfläche ausgestattet, sodass sich die Datenerhebung einfach gestaltet. Dieses gilt auch für die Arbeitsschritte zur Weiterverarbeitung, also das 'Matching' und das 'Constrained Matching'. Ebenso kann dieses für die Datennachverarbeitung konstatiert werden. So ist hier die Abwicklung über spezifische Dialog-Fenster unter systematischen Aspekten hervorzuheben. Im Kontext der Fragestellung und des messtechnischen Anforderungsprofils, welches sich aus der Komplexität der Objektgruppe Gemälde ergibt, werden die zahlreichen Einstellungsmöglichkeiten des Sensors und die Auswertungssoftware ebenso als positiv bewertet, und bilden die Grundlage für eine umfassende Datenauswertung und eine effiziente Arbeitsweise.[462] Die in Vorversuchen erprobten vielfältig zur Verfügung stehenden, virtuellen Auswertungswerkzeuge, sowie die Möglichkeit kalkulatorischer Bezüge lassen eine positive Bewertung von 'INSPECTplus' zu. Die Software skizziert sich bereits hierorts für die geplanten Experimente als prinzipiell geeignet. Auch die optionale Dokumentation der Ergebnisse über statische Messprotokolle ist ein konsequenter Schritt. Ebenso wird hierfür die Verwendung des plattformunabhängige Dateiformat PDF als positiv bewertet.

Trotz des positiven Leistungsumfang des Software-Paketes wird seine technische Dokumentation aus Autorensicht als mangelhaft bewertet. Viele Sachverhalte werden hier nicht tiefgreifend genug erörtert. Aufgrund der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes und des messtechnischen Anspruches über den Nachweis geringster struktureller Merkmale, sind fundierte Kenntnisse über den Sensor und seinen Einstellungsmöglichkeiten unverzichtbar. Vorrangig betrifft dieses die verschiedenen 'Belichtungseinstellungen' sowie die 'Erweiterten Einstellungen' zur Datenerhebung.

'Steinbichler' gibt in seiner technischen Dokumentation lediglich einen Überblick zum Funktionsumfang, der nicht zur umfassenden Sensorbedienung befähigt. Dies gilt im Allgemeinen auch für die Erörterung der Parameter zur Weiterverarbeitung der Punktwolken

461 Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 138 ff.. Ferner lassen sich bei Bezügen und Vergleichen quantitative Ergebnisse anhand von Skalen, Tabellen oder sogenannten 'Flyern' ablesen. Hierbei handelt es sich um fähnchenähnliche Tabellenfelder, die über Ankerpunkte am virtuellen Werkzeug befestigt sind und weitergehende Informationen über das Werkzeug, respektive das Objekt, beinhalten. Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 155 ff.

462 Der Beleg wird im praktischen Teil erbracht.

zum Dreiecksnetz. Für eine souveräne, die Möglichkeiten erschöpfende Nutzung von Sensor und Software, ist daher eine ausführliche Einweisung zwingend erforderlich.[463] Obgleich der vorgebrachten Mängel, die als eklatant bewertet werden, muss der hervorragende Support des Herstellers angemerkt werden. Dieser gleicht die Defizite der technischen Dokumentation aus. Im Gesamten müssen die angemerkten Aspekte zur Sensor- und Softwarebedienung vor dem Hintergrund des geplanten musealen Einsatzes des Scanners, in eine umfassende Systembewertung mit einfließen.

463 Da das Gerät voranging im industriellen Umfeld eingesetzt wird, kann bedingt durch serielle Messobjekte in der Regel die Digitalisierung gleichermaßen mit standardisierten Sensoreinstellungen oder gar über Makro-Befehle erfolgen. So stelle das Wissen, welches im Rahmen der Anwenderschulung vermittelt wurde einen soliden Grundstock dar. Jedoch erforderte die praktische Arbeit am Untersuchungsgegenstand Gemälde detailliertere Kenntnisse über Einstellungen und Parameter, um adäquate Lösungen für die Vielzahl von Oberflächen und individuellen Fragestellungen entwickeln zu können.

14. Untersuchungen der Leistungsfähigkeit von 'COMET 5 11M'

Wie oben aufgezeigt ergeben sich wesentliche Systemvorteile einerseits aus der Dimension der beiden Messvolumina und andererseits aus ihrer überzeugenden Auflösung. Zur Einschätzung der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des Scanners wird eine praktische Systemerprobung durchgeführt. Hierzu werden Untersuchungen vorgenommen, die sich in einem ersten Schritt der Bestimmung der Messvolumen widmen und in einem zweiten seinem Auflösungsvermögen von Strukturmerkmalen in lateraler und axialer Hinsicht (►Abb. 84|). In einem dritten Schritt erfolgt die Eruierung der Leistungsfähigkeit des 'COMET-System' zur Detektion realer Gemäldestrukturen.

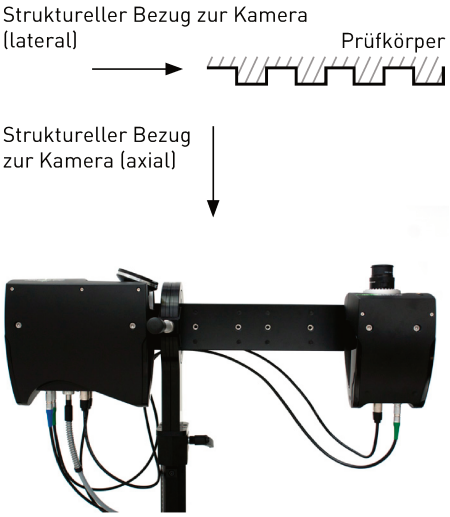


Abb. 84| Definition des lateralen und axialen Bezuges.
Quelle: Selbst

14.1 Ausmaß der Messvolumina

Die praktische Verfahrensanwendung zeigt, dass die tatsächliche Form und Größe des Messvolumens nicht den herstellerseitig angegeben Dimensionsangaben entspricht (►Tab. 16|). Genaue Kenntnisse zu den Abmessungen der Messvolumina sind jedoch von essenzieller Bedeutung. So orientiert sich an ihnen bspw. die Größe der später in den Laborexperimenten verwendeten Probekörpern. Zweifelsohne stellen bekannte Eigenschaften der Sensoren zugleich eine Grundvoraussetzung für die forcierte, museale Anwendung dar.
Im Rahmen verschiedener Versuche erfolgt daher eine Bestimmung der Größe der Messvolumen für 'COMET 5 11M 80' und für 'COMET 5 11M 1000'. Die Darlegung der hierzu vorgenommenen Messungen sind in den Anhang ausgegliedert (►Kapitel 29.8| und Kapitel 29.9|) – wiederum auf ihre Ergebnisse wird im Folgenden verwiesen (►Kapitel 14.1.1|).

14.1.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Messvolumina

Die selbst ermittelten Angaben der Messvolumina ergeben in einer Gegenüberstellung mit den Herstellerangaben signifikante Diskrepanzen. Die Ergebnisse sind in ►Tab. 17| zusammengestellt. Die Versuche für das 1000er Messvolumen offenbaren eine ermittelte Abmessung von 68 x 730 x 585 mm^3. Gegenüber der Herstellerangaben sind diese in Bezug auf die Höhe und Breite um >19 % geringer. Das bedeutet eine schwerwiegende Verkleinerung des tatsächlichen Messvolumens. Unter Berücksichtigung des ohnehin kleinen 80er Messvolumens sind die selbst bestimmten Abmessungen von 44,5 x 67 x 46 mm^3 als eine nachteilige Verringerung des Messvolumens zu werten. Relativ quantifiziert sich diese im Durchschnitt mit einer Einschränkung der Höhe und Breite von 11 %. Gleichwohl wird angemerkt, dass von vornherein der Anwendungsschwerpunkt der zuletzt genannten Sensorkonfiguration im experimentellen Bereich verortet sein wird. Im Blickpunkt steht hier vornehmlich die Untersuchungen geringster Strukturveränderungen. Erfahrungsgemäß sind diese hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägung lokal begrenzt. Demgegenüber

steht wiederum die Sensorkonfiguration mit dem großen Messvolumen. Sein Einsatz ist hier für das Monitoring ganzer Gemälde im praktischen Zusammenhang des Kunsttransportes zu sehen.

Sensorbezeichnung	Provenienz	Messvolumen			Arbeitsabstand
		Höhe	Breite	Tiefe	
COMET 5 11M 80	'Steinbichler'	50 mm²	75 mm²	50 mm²	450 mm²
	Selbst	44,5 mm²	67 mm²	46 mm²	463 mm²
absolute Abweichung		5,5 mm²	8 mm²	4 mm²	-13 mm²
relative Abweichung		11 %	10,7 %	8 %	-3 %
COMET 5 11M 1000	'Steinbichler'	600 mm²	900 mm²	600 mm²	1400 mm²
	Selbst	468 mm²	730 mm²	585 mm²	1380 mm²
absolute Abweichung		132 mm²	170 mm²	15 mm²	20 mm²
relative Abweichung		22 %	18,9 %	2,5 %	1 %

Tab. 17| Gegenüberstellung der Herstellerangaben mit den selbst ermittelten Werten zur Dimensionierung und Abmessungen der Messvolumina.
Quelle: Selbst

14.2 Auflösungsvermögen

Die herstellerseitig angegebene Auflösung ist, wie bereits oben erwähnt, so überzeugend, dass sie ein zentrales Auswahlkriterium bei der Wahl des 'COMET-System' darstellt. Der Begriff Auflösung wird in diesem Zusammenhang jedoch ausdrücklich nicht als synonym für die herstellerseitige Angabe des Punktabstandes verwendet. Im Zusammenhang der vorliegenden Schrift wird die Auflösung als jene Grenze definiert, die determiniert, welche dreidimensionalen, strukturellen Unterschiede gerade noch voneinander unterschieden werden können (►Abb. 85|).[464] Der Punktabstand wird für 'COMET 5 11M 80' mit 0,018 mm und für 'COMET 5 11M 1000' mit 0,225 mm angegeben (►Tab. 16| und Kapitel 29.9| - Kapitel 29.15|). Im Kontext der Detektion von Gemäldestrukturen besteht eine unmittelbare Abhängigkeit zum Auflösungsvermögen des Untersuchungsverfahrens. Zudem wurde in den eigenen Vorarbeiten die Auflösung als ein einschränkender Faktor bestimmt.[465] In diesem Zusammenhang ist die favorisierte Detektion des Craquelés beispielhaft zu apostrophieren – hierzu wird später dezidiert Stellung genommen (►Kapitel 15.1|).

Im Zuge der Systemerkundung wird das Auflösungsvermögen der verwendeten Sensorkonfiguration in Laborexperimenten systematisch untersucht. Hierzu werden technische Prüfgegenstände eingesetzt – zunächst vergleichsweise grob profilierte Konturnormale (►Abb. 278| und Abb. 279|). Im weiteren Verlauf werden hingegen feiner strukturierte verwendet (►Abb. 296|). Abgeschlossen wird die Systemerprobung durch die quantitative und qualitative Bestimmung eines fein strukturierten Realobjektes (►Abb. 302|), welches den Stellenwert eines Kunstwerkes besitzt.[466] Gleichermaßen erfolgt im Rah-

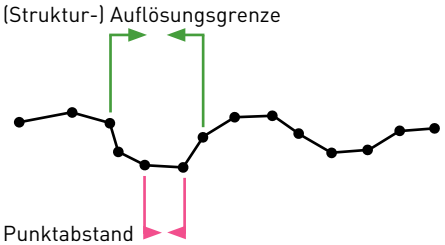


Abb. 85| Das Auflösungsvermögen der beiden Sensorvarianten ist für die vorliegende Arbeit von entscheidender Bedeutung. Der herstellerseitig angegebene Punktabstand von 0,018 mm, bzw. von 0,225 mm bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass sämtliche Strukturen in diesem Bereich erfolgreich digitalisiert werden können. So sind strukturelle Unterschiede nur dann aufzulösen, wenn selbiges auch für den sie diskriminierenden Zwischenraum gilt (►Abb. 309|). Damit kommt der Objektbeschaffenheit eine maßgebliche Bedeutung zu. Dieses verdeutlicht sich durch den begrifflich deskriptiven Unterschied zwischen Punktabstand und Auflösungsgrenze: Der gerade noch messtechnisch nachweisbare strukturelle Unterschied definiert die Auflösungsgrenze des Sensors (grün). Der Punktabstand muss unterhalb desselben liegen (magentafarben). Bei dieser exemplarischen Abbildung wird dieser Sachverhalt in die zweidimensionale Papierebene projiziert veranschaulicht.
Quelle: Selbst

464 Vergleiche: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 und Ohne Verf. (DIN 1319-1), 1995

465 Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 158

466 In einer prinzipiellen Abgrenzung wird darauf hingewiesen, dass die folgend beschriebenen Experimente einem nicht standardisierten und damit nur eingeschränkt reproduzierbaren Versuchsaufbau entstammen. Die Rauheitsmessung ist ein komplexer Teilbereich der Werkstoffwissenschaft. Auf diesem Gebiet kann der Autor keine Kompetenz vorweisen. Die Versuche erfolgen ausschließlich autodidaktisch und ohne die Berücksichtigung entsprechender DIN-Normen. An dieser Stelle wird auf die Fachliteratur verwiesen. Einen Überblick über wesentliche Terminologien und die relevanten DIN-Normen gibt JUNG, wobei der Schwerpunkt seiner Ausführungen im Bereich taktiler Messverfahren liegt. Vergleiche: Jung, 2011, Seite 1 ff.

men einer Evaluation eine Verifizierung mit anderen Messsystemen. Analog zur obigen Vorgehensweise sind Versuchsbeschreibungen und -Ergebnisse in den Anhang ausgegliedert (►Kapitel 29.10| - Kapitel 29.15|). Hierorts wird auf die Zusammenfassung verwiesen.

14.2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zum Auflösungsvermögen

Durch die Experimente konnte die Auflösungsgrenze der 'COMET-System' präzisiert- und zugleich seine praktischen Eigenschaften näher bestimmt werden. Dabei war es möglich, sowohl qualitativ als auch quantitativ plausible Messergebnisse zu generieren. Dieses bezieht sich auf verschiedene Strukturen bei technischen Konturnormalen, auf feine Strukturen eines natürlichen Präparates, sowie auf Objektmerkmale und Schäden eines Realobjektes. Dabei konnte die Leistungsfähigkeit einerseits und die hohe Güte der Messergebnisse andererseits belegt werden. Anzuführen ist hier die Selbstreferenzierung der Ergebnisse beider Sensorkonfiguration und der Beweis einer prinzipiellen Reproduzierbarkeit.[467] Dennoch bestehen in Bezug auf die Auflösungsgrenze bisher ungeklärte Abweichungen zu den Herstellerangaben, bzw. dem angegebenen Punktabstand. Abermals ist hier jedoch auf den begrifflich deskriptiven Unterschied von Auflösungsgrenze und Punktabstand verwiesen (►Abb. 85|). Folgende Ergebnisse könne aufgrund der eigenen Experimente zusammengefasst werden:

- 'COMET 5 11M 1000': zuverlässige Nachweisgrenze von Strukturmerkmalen > 0,191 mm[468]
- 'COMET 5 11M 80': zuverlässige Nachweisgrenze von Strukturmerkmalen > 0,100 mm[469]

Die kleinsten von 'COMET 5 11M 1000' nachgewiesen Strukturmerkmale (> 0,191 mm) liegen mit 0,034 mm unterhalb des herstellerseitig angegebenen Punktabstandes von 0,225 mm. Eine Begründung für die Unterschreitung steht bis dato aus. Erkundigungen beim Gerätehersteller ergaben, dass es sich bei den Angaben des Punktabstandes um einen rein mathematisch ermittelten Wert handelt.[470] Letzterer ergibt sich aus dem Messvolumen und der Kameraauflösung. Pro Kamerapixel kann bei einer Aufnahme ein Punkt bestimmt werden. Für den Sensor 'COMET 5 11M 1000' ergibt sich, unter der theoretischen Annahme einer Messfeldgröße von 900 x 600 mm² und einer Pixelzahl der Sensorkamera von 4016 x 2688 px somit eine

467 Vergleiche hierzu die Ergebnisse für ‚COMET 5 11M 1000' (►Tab. 93|) und für ‚COMET 5 11M 80' (►Tab. 100|).

468 Dies entspricht dem kleinsten Ebenenmissverhältnis beim Untersuchungsgegenstand ‚Konturnormal_01' (Einzelaufnahme), ‚Stufe_04' (►Tab. 93|) .

469 Dies entspricht dem kleinsten nachweisbaren Stegzwischenraum beim Untersuchungsgegenstand ‚Schulp' (Einzelaufnahme), ‚Schieblehre_01' (►Tab. 100|).

470 Vergleiche: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013

Sensorauflösung von ca. 0,225 mm.[471,472]
Die Auflösung des 1000er Messfeldes berechnet sich gemäß:
900 mm : 4015 px = 0,224 mm
600 mm : 2688 px = 0,223 mm

Auch für den Sensor 'COMET 5 11M 80' berechnet sich die herstellerseitige Angabe zum Punktabstand aus dem Verhältnis zwischen der Größe des Messvolumens und der Kameraauflösung. Unter der theoretischen Annahme einer Messfeldgröße von 75 x 50 mm² und einer Pixelzahl der Sensorkamera von 4016 x 2688 px ergibt sich so eine Sensorauflösung von ca. 0,018 mm.[473]
Die Auflösung des 80er Messfeldes berechnet sich gemäß:
75 mm : 4015 px = 0,018 mm
50 mm : 2688 px = 0,018 mm

Die selbst bestimmten, gerade noch von 'COMET 5 11M 80' eindeutig nachweisbaren Strukturmerkmale (> 0,100 mm), sind mit 0,082 mm deutlich größer als der herstellerseitig angegebene Punktabstand von 0,018 mm. Dieses überrascht jedoch nicht, da anhand der Versuche belegt werden kann, dass zwischen den identifizierten Strukturen weitere Messpunkte liegen (►Strukturzwischenraum Schulp Abb. 309|). Der Punktabstand ist daher der Größenordnung nach plausibel (►Tab. 18|). In die Bewertung zum Auflösungsvermögen des Sensors muss ein weiteres Ergebnis mit einbezogen werden: die Quantifizierung einer Lackschicht in den Bereich von 0,006 mm bis 0,024 mm (►Abb. 295|). Obgleich diese nur indirekt über die Bestimmung einer Ebenendifferenz abgeleitet werden kann gibt sie einen Hinweis

Tab. 18| Zusammenfassung der quantitativen Ergebnisse zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen der beiden Sensorkonfiguration an den unterschiedlichen Prüfgegenständen. Bei den Angaben des Ebenenmissverhältnisses auf der Rückseite des 'Rauheitsnormal_ITO' besteht zwischen den Ergebnissen der beiden Sensorkonfiguration eine deutliche Diskrepanz, da 'COMET 5 11M 1000' die Strukturen hier nicht zuverlässig voneinander abgegrenzen konnte.
Quelle: Selbst

Bestimmung Auflösungsgrenze (mm)				
Untersuchungsgegenstand			'COMET 5 11M	'COMET 5 11M 80'
'Rauheitsnormal (ITO)' (Rückseite)	3D-Modell	geringstes Ebenenmissverhältnis	(0,428)	0,215
'Rauheitsnormal (ITO)' (Vorderseite)	3D-Modell	geringstes Ebenenmissverhältnis	(nicht aufzulösen)	0,096
		Radius (Zylinder_01)	9,955	9,956
		Radius (Zylinder_02)	(3,760) / 4,838	4,977
'Rauheitsnormal (ITO)' (Lackfehler)	3D-Modell	Ebenenmissverhältnis	(nicht untersucht)	0,006 – 0,024
'Konturnormal_01'	3D-Modell	Ebenenmissverhältnis	0,187	0,193
'Konturnormal_01'	Einzelaufnahme	Ebenenmissverhältnis	0,191	(nicht untersucht)
'Schulp' (Steg)	Einzelaufnahme	Abstand	(unter Auflösungsgrenze)	0,100
'Druckplatte' (Kratzer)	Einzelaufnahme	Länge	(unter Auflösungsgrenze)	5,137
'Druckplatte' (Kratzer)	Einzelaufnahme	Breite	(unter Auflösungsgrenze)	0,069 – 0,236
'Druckplatte' (Kratzer)	Einzelaufnahme	Tiefe	(unter Auflösungsgrenze)	0,004 – 0,024
'Druckplatte' (Ätzung)	Einzelaufnahme	Durchmesser	(unter Auflösungsgrenze)	0,062 – 0,106
'Druckplatte' (Ätzung)	Einzelaufnahme	Tiefe	(unter Auflösungsgrenze)	0,011 – 0,044

471 Die Angaben sind dem Datenblatt des Sensors entnommen (►Tab. 16|).

472 Physikalisch gesehen erfolgt die Detektion des Bildes bei Streifenprojektionsscannern ausschließlich zweidimensional (►Kapitel 12.2|). Die Tiefeninformation (Z-Achse) ergibt sich durch die zeitlich sequenzielle Folge der Streifenbilder. Als Berechnungsgrundlage für die Auflösung kann daher lediglich die Fläche des Kamerachips durch die Angaben von Höhe x Breite fungieren.

473 Die Angaben sind dem Datenblatt des Sensors entnommen (►Tab. 16|).

auf die prinzipiell als positiv zu wertende Leistungsfähigkeit des 'COMET-System'.
Weiter zeigen die Experimente jedoch auch Einschränkungen. Diese gelten sowohl für die Datenerhebung, die Datennachverarbeitung und die Datenauswertung. Sie alle implizieren ein Fehlerpotenzial, welches sich mitunter gravierend auf die Ergebnisse auswirken kann.[474] Die bisherigen Experimente stellen daher einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Messstrategie und einer Verbesserung der Arbeitsweise dar. Darüber hinaus konnten umfangreiche Rückschlüsse bei der Interpretation der Messergebnisse hinsichtlich qualitativer Aussagen gezogen werden. So wird resümiert, dass die vermeintlich objektiven Daten generell kritisch zu interpretieren sind – sie sind immer auch subjektiv behaftet. Gleichwohl konnte die anfängliche Skepsis, die dem angenommenem Fehlerpotenzial des 'Matching' innewohnte, experimentell ausgeräumt werden. 'Matchingfehler' sind von tendenziell untergeordneter Rolle – entscheidender sind objektimannente Charakteristika, sowie der Arbeitsweise.[475]

Durch die vorgenommenen Experimente sind folgende Fehlerquellen zu benennen:

- Mit abnehmender Größenordnung der aufzulösenden Struktur nimmt das Fehlerpotenzial qualitativer und quantitativer Ergebnisse zu, wobei Abhängigkeiten zur Sensorkonfiguration bestehen. Das Fehlerpotenzial begründet sich in der Auflösungsgrenze und subjektiven Aspekten bei der Auswertung der Daten durch den Benutzer. Negative Einflüsse, verursacht durch das Messrauschen kommen hinzu.
- Die virtuelle Ausleuchtung und der Darstellungsmodus im 'Viewer' kann die Messergebnisse mit beeinflussen.[476] So bestehen Abhängigkeiten bei der Visualisierung von Strukturen, woran sich letztlich wiederum die benutzerseitige Position virtueller Messwerkzeuge orientiert.
- Mit der Realsituation verglichen, werden sehr feine Kanten beim Digitalisat tendenziell nivelliert dargestellt. Folglich ist der Nachweis von Strukturen, bzw. deren Untersuchung erschwert und/ oder zumindest nicht zuverlässig möglich.
- Virtuelle Messwerkzeuge und geometrische Vergleichsformen (Messschieber, Mess- und Bezugspunkte, Ebenen, Kegel und Kugeln) können fehlerbehaftet sein.

474 Beispielhaft zu belegen anhand der Versuche zur ersten Einschätzung der Leistungsfähigkeit von ‚COMET 5 11M 1000' am Untersuchungsgegenstand ‚Rauheitsnormal_ ITO'.

475 Vergleiche hierzu exemplarisch die Ergebnisse für ‚COMET 5 11M 1000' (►Tab. 94|).

476 Vergleiche hierzu ►Abb. 87|.

15. Detektion von Gemäldestrukturen

An die vorherigen Versuche zur Erkundung der Leistungsfähigkeit des 'COMET-System' anknüpfend, erfolgt im Weiteren eine Konkretisierung hin zur Detektion realer Gemäldestrukturen. Neben der Erkundung der Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens, sollen Parameter zur optimalen Ausleuchtung, dem Messwinkel und andere Sensoreinstellungen eruiert werden. Für die späteren Experimente sollen somit Vorraussetzungen geschaffen werden, um Ergebnisse von hoher Güte und Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können. Hierbei wird unmittelbar auf die eigenen Vorarbeiten Bezug genommen und auf die eingangs erwähnten, vier zentralen Verfahrenslimitierungen rekurriert (►Kapitel 11|). Als Einschränkungen wurden bestimmt: die Detektion von Craquelé-Strukturen, die Detektion glänzender Oberflächen, lange Belichtungszeiten sowie Probleme bei der Ausrichtung und der Referenzierung von Vor- und Nachzustand. Die beiden zuletzt angefügten Punkte sind mittlerweile gegenstandslos geworden. Die in den eigenen Vorarbeiten bemängelten langen Belichtungszeiten von mehreren Minuten ließen sich, anhand der oben beschriebenen Versuche, nicht mehr bestätigen. Hier offenbart sich der technische Fortschritt der aktuell verwendeten Sensorengeneration. Die Probleme einer eingeschränkten Ausrichtung der 3D-Modelle durch die bestehende Abhängigkeit zu einem Referenzquader (►Kapitel 13.4.3|), und den Einschränkungen, die sich aus Mängeln der Referenzierung von Vor- und Nachzustand ergeben, sind mittlerweile obsolet. Hierzu wird später Bezug genommen (►Kapitel 20.3.2|), wobei vorweg zunehmen ist, dass hierfür eine mathematische Lösung gefunden wurde ('Best-Fit-Ausrichtung').

Die übrigen, der oben beschriebenen Limitierungen sind Ausgangspunkte der folgenden praktischen Systemerprobung. Zentral ist hier die Detektion sehr feiner Gemäldestrukturen – wie bspw. die eines Craquelé, Strukturen die zur Einschätzung und Bewertung von Transportfolgen in besonderem Maße ausschlaggebend sind. Die Auswirkung klimatischer Schwankungen äußert sich – zunächst im mikroskopischen, dann im makroskopischen, anhand morphologischer Strukturveränderungen. Im Verdacht stehen hier insbesondere die Grenzflächen des Craquelés, sodass ihre Detektion für das forcierte Monitoring das *Punctum saliens* ist.

Es wird untersucht inwiefern sich durch die Verwendung des 'COMET-System', gegenüber dem vormals eingesetzten Sensor 'COMET VarioZoom', eine Verbesserung der Ergebnisse erzielen lässt. Als eine sehr wahrscheinliche Ursache für die damalige Nachweisproblematik gilt, aus heutiger Sicht, die zu geringe Auflösung des verwendeten Scanners.[477] Im Verhältnis zum damals verwendeten 'COMET

[477] Ebenso sind die Strukturen des Craquelés mitunter in transparenten Überzügen verortet. Neben einer anteiligen Reflexion an der Oberfläche kann die Firnisschicht vom Weißlicht des Sensors durchstrahlt werden, sodass erst an den darunter liegenden Bildschichten eine Reflexion und Absorption stattfinden kann. Demzufolge besteht die Diskrepanz in der Beurteilung mikrotopografischer Veränderungen des Firnis und/oder der darunter liegenden Malschichten. Hypothetisch muss zwischen der optischen und der physikalischen Oberfläche unterschieden werden. Die Untersuchung transparenter Überzüge erfolgt traditionell mit UV-Licht. Hierbei wird die Tatsache genutzt, dass Licht

VarioZoom-System' besteht beim aktuell verwendetem Gerät gemäß der Herstellerangaben eine Verkleinerung des Punktabstandes, beinahe um den Faktor sieben.[478] Demzufolge werden vielversprechende Messergebnisse und interessante Rückschlüsse in qualitativer und quantitativer Hinsicht erwartet. In diesen Vergleich wird auch die Mikro-Streifenprojektion mit einbezogen, um zu belegen welche Details grundsätzlich durch das Verfahren nachweisbar sind.[479] Dabei liegt der Fokus allein auf der Auflösung relevanter Gemäldestrukturen und nicht auf globalen Gesichtspunkten.
Für die folgende Praxiserprobung werden Untersuchungsgegenstände gewählt, die generell verfügbar und leicht handhabbar sind. Diese Objekte haben den Stellenwert von Probekörpern (►Kapitel 19.2|). In der Regel handelt es sich um entsprechend präparierte Fragmente originaler Gemälde, wobei in einem ergänzenden Versuch auch ein vollständiges Original digitalisiert wird um damit dem Wirklichkeitsanspruch zu genügen.[480]

15.1 Detektion von Craquelé-Strukturen

Die Merkmalsausprägungen eines Craquelé sind mannigfaltig. Ein Nachweis über entsprechend komplexe und feine Strukturen ist für das Untersuchungsverfahren eine besondere Herausforderungen.

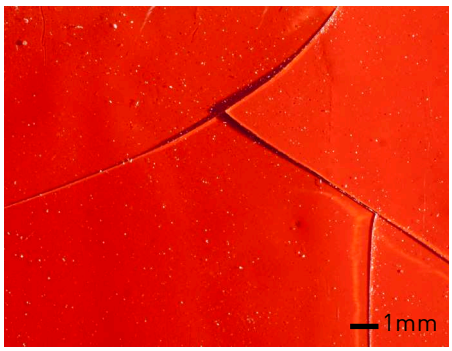


Abb. 86| Windschiefe Verwerfung der an den Riss angrenzenden Oberflächenbereiche. Insbesondere die aufstehende Risskante in axiale Richtung erleichtert hier die Detektion mit der Streifenprojektion. Auch durch leichtes Streiflicht, wie bei dieser Makro-Aufnahme, lassen sich solche Strukturen bildgebend nachweisen.
Quelle: Stella Overmann

mit abnehmender Wellenlänge weniger tief in Materie eindringt. [Vergleiche: Mairinger, 2003, Seite 62 ff.] Dieses Prinzip sollte im Rahmen experimenteller Versuche auf die Streifenprojektion übertragen werden, indem das Spektrum des projizierten Lichtes in den Bereich < 400 nm eingeschränkt wird. Ziel war eine technische Modifikation, sodass zuverlässig und ausschließlich die physikalische Oberfläche detektiert werden konnte. Aufgrund technischer Schwierigkeiten (Lichtintensität, Filterwirkung der optischen Komponenten des Scanners, Einschränkung der Untersuchungsgegenstände in Abhängigkeit ihrer Farbigkeit) gelang dieses Vorhaben nicht. Demgemäß konnte abschließend nicht geklärt werden, inwiefern sich strukturelle Veränderungen der Firnisschicht mittels kurzwelligem Licht nachweisen lassen und welche Rückschlüsse dadurch auf die Materialität des Gesamtgefüges möglich sind. Hierorts wird auf den weiteren Forschungsbedarf verwiesen.

478 Diese Angaben beruhen auf dem Vergleich des früher verwendeten Messsystems ‚COMET VarioZoom 2M C250' (250er Messfeld, 3D-Punktabstand: 125 µm) mit dem aktuellen Sensor ‚COMET 5 11M 80' (80er Messfeld, 3D-Punktabstand: 18 µm). Mit der gesteigerten Auflösung, beinahe um den Faktor 7, ist zugleich eine erhebliche Verkleinerung des Messfeldes verbunden. Der Sensor ‚COMET VarioZoom 2M 250' wird vom Hersteller mit einem Messvolumen von 250 x 220 x 220 mm (Raumdiagonale: 400 mm) angegeben, wohingegen sich der Sensor ‚COMET 5 11M 80' durch ein Messvolumen von 75 x 50 x 50 mm, (Raumdiagonale: 103 mm) auszeichnet. Beim Vergleich des alten Sensors mit dem aktuell verwendeten Gerät in der Konfiguration ‚COMET 5 11M 1000' (1000er Messfeld, 3D-Punktabstand 225 µm), ist das Messvolumen ca. dreimal so groß (Messvolumen: 900 x 600 x 600 mm (Raumdiagonale: 1122 mm)), wohingegen sich der 3D-Punktabstand um den Faktor 1,8 vergrößert hat. Eine Sensorkonfiguration mit einem 250er Messvolumen wird von ‚Steinbichler' aktuell nicht angeboten (►Tab. 16|) und vergleiche die Angaben zum Sensor ‚COMET VarioZoom 2M 250'. Vergleiche: Hein, 2007, Seite 24). Daher ist ein direkter Vergleich der beiden Geräte nicht möglich. Um dennoch die Innovation der aktuellen Gerätegeneration herauszustellen, kann der alte Sensor mit einer aktuellen Version, dem Sensor 'COMET 5 11M 350', verglichen werden (3D-Punktabstand von 85 µm, Messvolumen von 345 x 230 x 200 mm, Raumdiagonale: 460 mm). Dieser kommt dem in den eigenen Vorarbeiten verwendeten Gerät am nächsten. Der Vergleich der beiden Raumdiagonalen zeigt eine Steigerung des Messvolumens um den Faktor 1,15 bei der aktuellen Geräteversion. Zusätzlich hat sich das Auflösungsvermögen im dreidimensionalen Raum, verglichen am Punktabstand, um den Faktor 1,47 gesteigert. Das spricht für die allgemeine qualitative Verbesserung der Messdaten der aktuelleren Sensoren-Generation.

479 Die Messung wurde vom Projektpartner am ‚Institut für Technische Optik', namentlich Daniel Claus, durchgeführt (►Kapitel 29.13|).

480 Die Untersuchungsgegenstände werden bei den Laborexperimenten im dritten Teil ausführlich beschrieben (►Kapitel 19.1|). Ihre Verwendung stellt hierorts einer Vorwegnahme dar.

Hier sind insbesondere die Spaltbreiten des Craquelé anzuführen. Hinzu kommen morphologische Besonderheiten wie windschiefe Verwerfungen (►Abb. 86|) entlang der Kanten des Craquelé und/ oder andere geometrische Merkmale wie bspw. eine Schüsselbildung (►Kapitel 9|). Wie in den vorherigen Untersuchungen zur Bestimmung der Nachweisgrenze des 'COMET-System' aufgezeigt werden konnte, sind neben der Digitalisierung jedoch auch methodische und visuelle Aspekte bei der Merkmalsidentifikation mit ausschlaggebend (►Kapitel 14.2.1|). Dieses gilt ausdrücklich dann, wenn sich die Strukturen im Bereich der Nachweisgrenze befinden. Konkret ist damit die virtuelle Darstellung und Auswertung in 'COMET-/INSPECTplus' gemeint. So lassen sich durch Veränderungen der virtuellen Betrachtungs- und Beleuchtungsgeometrie im 'Viewer' Oberflächenstrukturen leichter identifizieren. Diese Möglichkeit sollte und wird daher in jedem Fall bei der Identifikation von Merkmalen, der Interpretation von Ergebnissen sowie ihrer Aus- und Bewertung genutzt (►Abb. 87|).

Für eine erste Untersuchung wird ein geeignet strukturiertes Gemäldefragment gewählt, dass sich sowohl durch glatte, als auch raue Oberflächenbereiche kennzeichnet (Realobjekt: 'RO_002', ►Abb. 90|). Der Firnis des Fragmentes ist verhältnismäßig dick und weist ein differenziertes Craquelé auf. Ein sich verjüngender und auslaufender Riss im transparenten Überzug ist für die Systemerprobung besonders geeignet (►Abb. 90|, Papiermarkierung und Abb. 88|). Zur Gewährleistung einer reproduzierbaren Verortung dieses Areals über die Versuche hinaus erfolgt seine Papiermarkierung.

Datenerhebung: 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000'

Zunächst wird sowohl die Vorderseite als auch die Rückseite des Untersuchungsobjektes digitalisiert. Messwinkel, Sensor- und 'Belichtungseinstellungen' sind in einer Tabelle zusammengefasst. Diese Metadaten sind dem zugehörigen Messprotokoll vorangestellt (►Tab. 19|).[481] Das Gemäldefragment wird sowohl im Modus 'HiRes' als auch 'LoRes' digitalisiert. Dieses gilt sowohl für die Vorder- als auch die Rückseite.

Auswertung: 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000'

Die Auswertung der Daten erfolgt in 'INSPECTplus'. Um die Wiedergabe originaler Gemäldestrukturen zu untersuchen, werden die beiden Aufnahmen mit unterschiedlichen 'Kamerakonfiguration' einander direkt gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in einem Protokoll zusammengefasst (►Abb. 90|-Abb. 92|).

Ergebnis: 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000'

Verglichen mit dem gezeigten Objektfoto auf der ersten Protokollseite, kennzeichnet sich das Digitalisat durch deutliche Einschränkungen bei der Wiedergabe von Strukturen. Dieses gilt sowohl für die Strukturen der Vorderseite als auch die der Rückseite. Die feinen Risse in der Firnisschicht, die bei der unteren linken Ecke der fotografischen

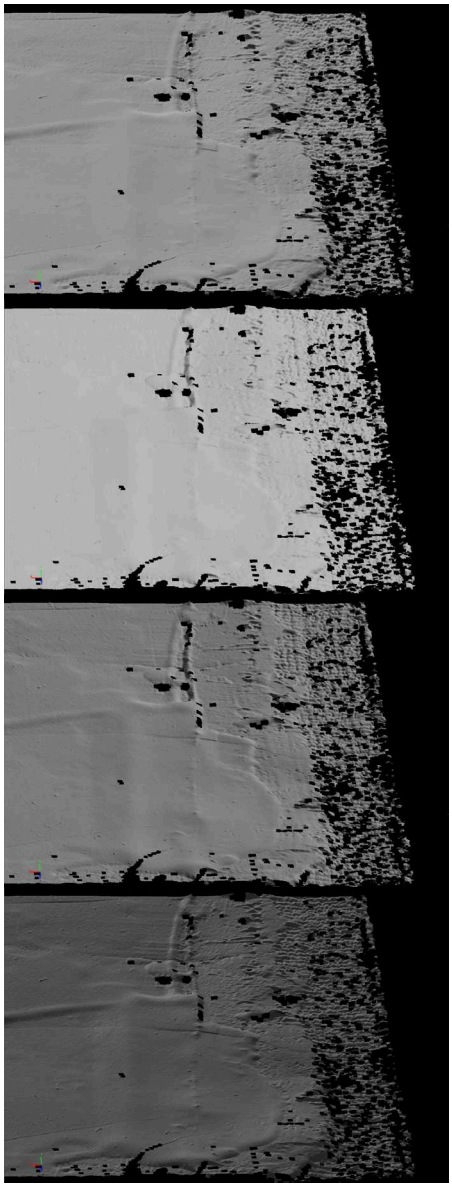


Abb. 87| Die oben gezeigten Abbildungen unterscheiden sich durch verschiedene virtuelle Beleuchtungsgeometrien im 'Viewer' von 'COMETplus'. In der Reihenfolge:
- Beleuchtung von links
- Beleuchtung von oben
- Beleuchtung von rechts
- Beleuchtung von unten

Die Visualisierung struktureller Objektgegebenheiten wird hierdurch stark beeinflusst. Quelle: Selbst

481 Diese Gliederung gilt für alle Experimente der vorliegenden Schrift.

Abbildung deutlich sichtbar sind, können an den 3D-Modellen nicht nachvollzogen werden. Gleichwohl wird die vorderseitige Papiermarkierung an sich erfasst. 'COMET 5 11M 1000' eignet sich jedoch nicht um die feinen Risse inmitten der Maskierung zu detektieren. Der Vergleich der 3D-Aufnahmen mit der Sensoreinstellung 'LoRes' kennzeichnet sich durch weitaus weniger Details als jene der Sensoreinstellung 'HiRes'. Dieses entspricht den Erwartungen. Die niedrig aufgelöste 3D-Aufnahme erscheint sehr viel weicher und kontrastärmer.

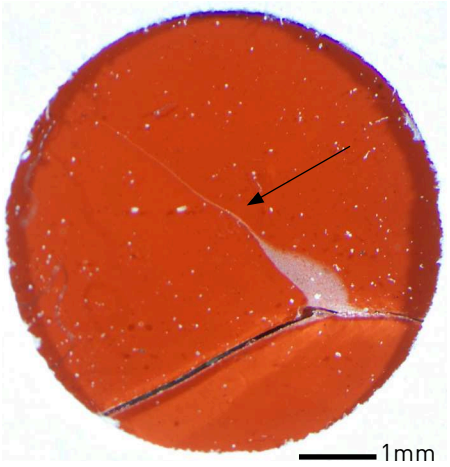


Abb. 88| Foto des sich zum Ende hin verjüngenden Risses in der Firnisschicht des Realobjektes 'RO_002'. Es handelt sich bei der Abbildung um ein Mikroskopfoto, aufgenommen bei 16-facher Vergrößerung (Ausschnitt von ►Abb. 90).
Quelle: Stella Overmann

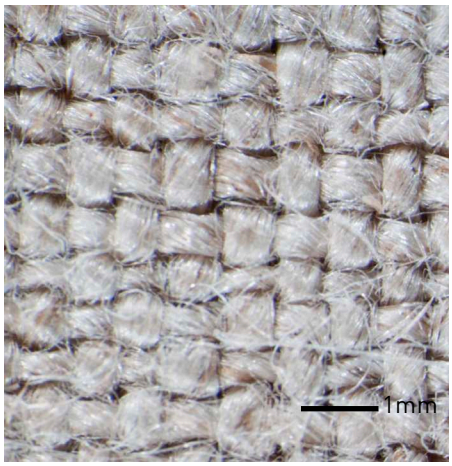


Abb. 89| Detailfoto der Rückseite von 'RO_002' zur Darstellung der optisch rauen Textil-Struktur.
Quelle: Stella Overmann

Metadaten und Messparameter

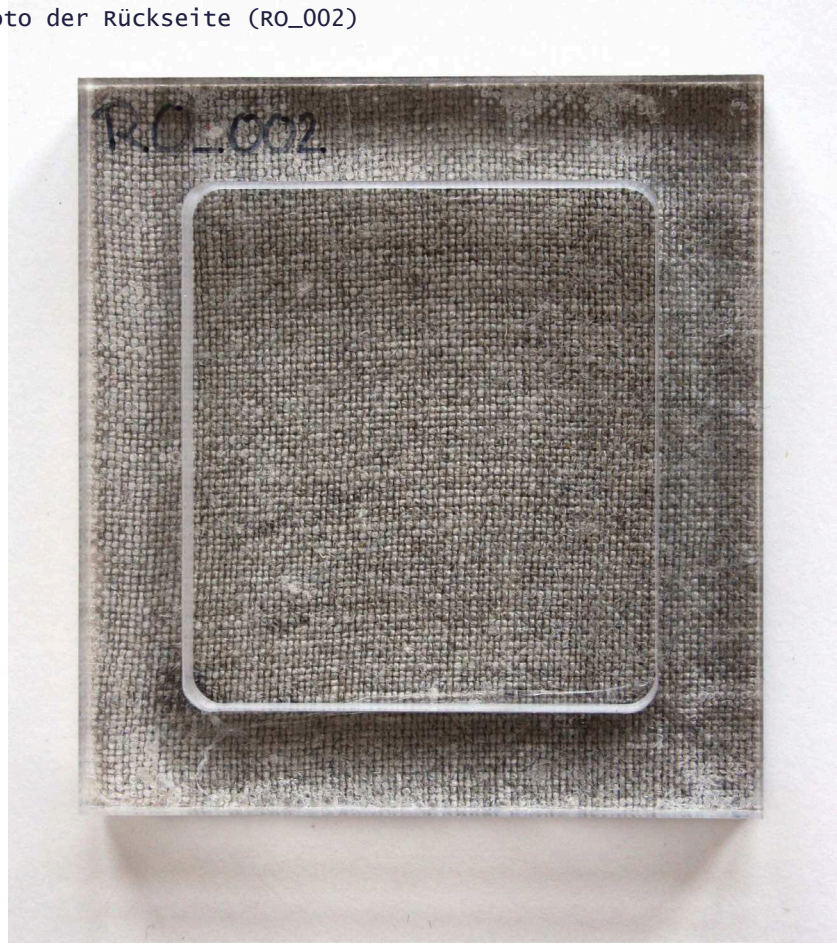
Objekt	RO_002	
Benennung	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguration	
Datum	20.02.2014	
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000	
	Anzahl Messungen	1
	Matchingstrategie	ohne
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	350
	2. Messbild	560
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes/LoRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	k. A.
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	k. A.
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	k. A.
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	k. A.
	Anzahl (Knoten)punkte Vorderseite (HiRes)	8.229.480
	Anzahl (Knoten)punkte Vorderseite (LoRes)	2.050.464
	Anzahl (Knoten)punkte Rückseite (HiRes)	8.266.825
	Anzahl (Knoten)punkte Rückseite (LoRes)	2.050.950
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 19| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000'.
Quelle: Selbst

Foto der Vorderseite (RO_002)



Foto der Rückseite (RO_002)



Objekt: RO_002 Benennung: Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 20.02.2014
3D_artscan	Seite 1 von 3

Abb. 90| Wiedergabe der Protokollseite 1 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000' (Protokollseite 1).
Quelle: Selbst

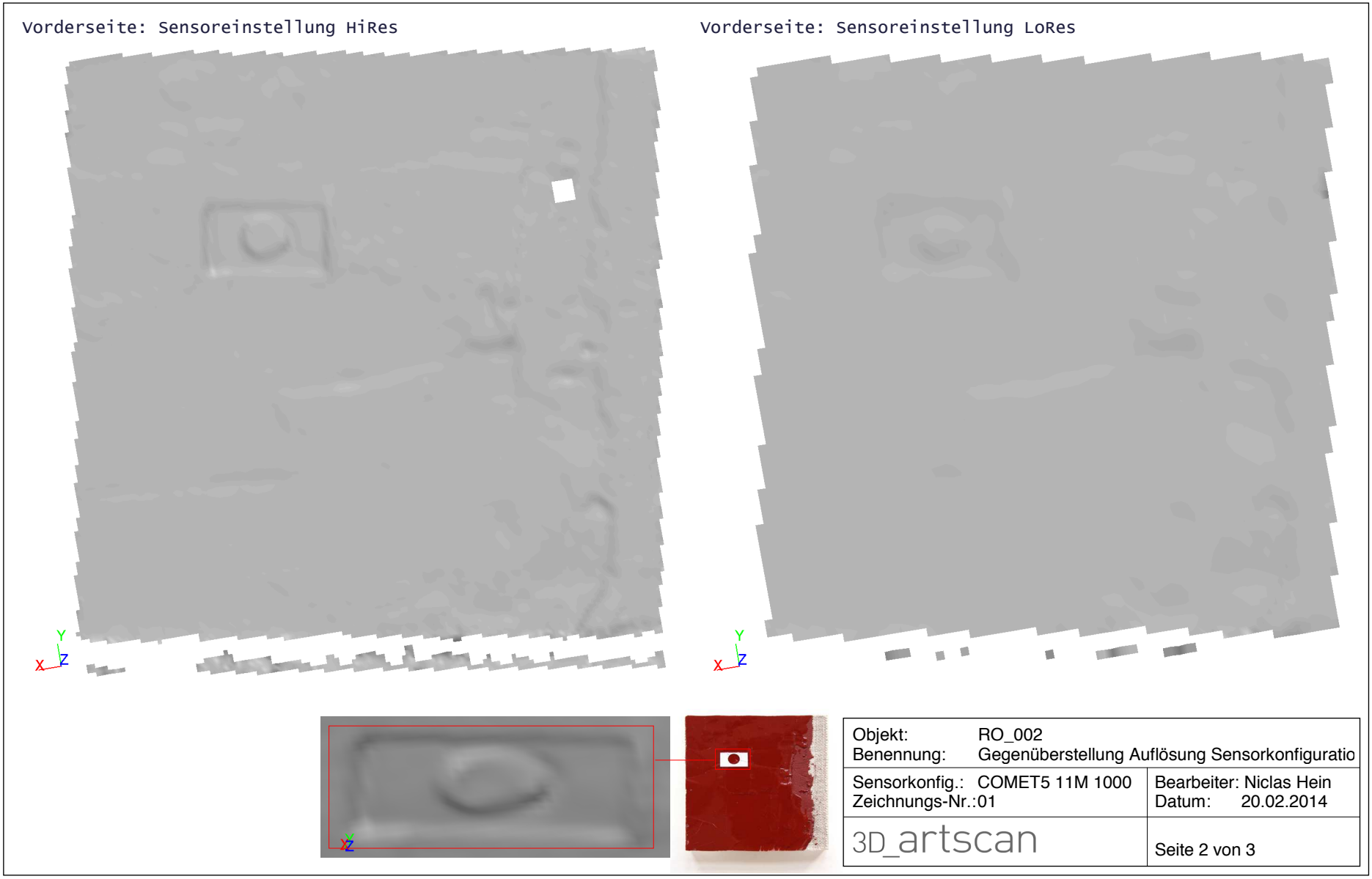
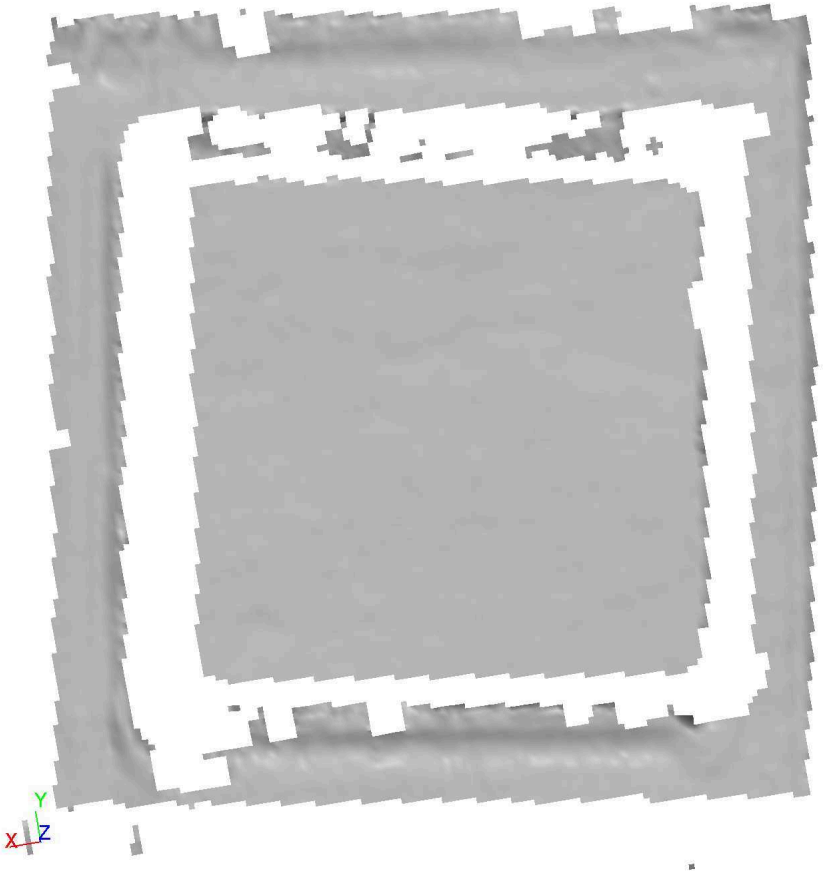
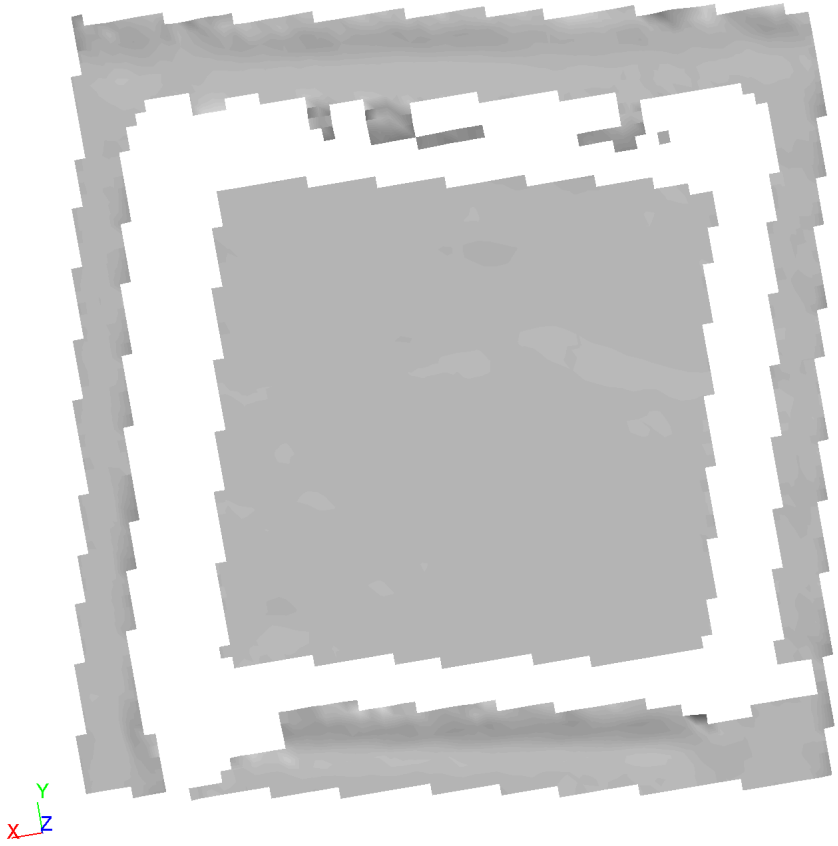


Abb. 91| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000' (Protokollseite 1).
Quelle: Selbst

Rückseite: Sensoreinstellung HiRes



Rückseite: Sensoreinstellung LoRes



Objekt:	RO_002		
Benennung:	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	20.02.2014
3D_artscan		Seite 3 von 3	

Abb. 92| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 1000' (Protokollseite 1).
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'

Aus Gründen der Vergleichbarkeit folgt die Datenerhebung mit dem hochauflösenden Sensor 'COMET 5 11M 80' gemäß oben geschilderten Vorgehen. Die Position der Probe blieb zwischen den Messungen unverändert. Lediglich der Sensor wurde, zur erforderlichen Kalibrierung im Anschluss an den Messvolumenwechsel, zwischenzeitlich in die 0°-Stellung gebracht. Die Rückstellung auf den Messwinkel von 60° ist reproduzierbar. Im Anschluss wird abermals sowohl die Vorder- als auch die Rückseite der Gemäldeprobe digitalisiert.

Auswertung: 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'

Die Zusammenfassung der Auswertung findet sich in einem Messprotokoll (►Abb. 93| - Abb. 98|).

Ergebnis: 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'

Dem Ergebnis nach sind mit 'COMET 5 11M 80' Craquelé-Strukturen aufzulösen. Insgesamt überzeugt die 3D-Bildgebung durch die aussagekräftige Wiedergabe von Oberflächenstrukturen. Im Detail offenbart sowohl die Aufnahme, die mit der 'Kamerakonfiguration' 'HiRes' erzeugt wurde, als auch jene der Einstellung 'LoRes', dass die Rissstruktur inmitten der Maskierung prinzipiell nachweisbar ist. Einschränkungen bestehen jedoch hinsichtlich der Vollständigkeit. Im Vergleich zum Tageslichtfoto (►Abb. 88| und Abb. 95|) wird bei beiden 3D-Aufnahmen der Riss sehr viel kürzer wiedergegeben. So kann der fein auslaufende Bereich vom Sensor nicht mehr aufgelöst werden. Auffällig ist beim direkten Abgleich der visuellen Ergebnisse beider Verfahren, dass bei der fotografischen Aufnahme zusätzlich auf eine partielle Delamination in oder unter der Firnisschicht rückgeschlossen werden kann. Anhaltspunkte hierfür bestehen aufgrund eines vom Riss ausgehenden blinden Bereiches und logisch-kombinative Rückschlüsse aus dem Erfahrungswissen. Hingegen sind entsprechende Ableitungen bei den 3D-Aufnahmen nicht möglich. Jedoch können bei allen Aufnahmen feine Staubpartikel nachgewiesen werden, wodurch sich ihre hohe Güte beweist.

Die mit der Einstellung 'LoRes' erzeugte Aufnahme weist sehr viel weniger Messlücken auf als die hochauflösende Aufnahme. Insbesondere bei den 3D-Aufnahmen der Gemälderückseite wird dieses offensichtlich. Hier überrascht, dass mit der niedrig auflösenden Kamerakonfiguration bessere, da vollständigere Ergebnisse erzielt werden konnten als im hochauflösenden Modus (►Abb. 96| undAbb. 97|).[482] Die zusätzliche Aktivierung des 'NCS-Mode' brachte keine weitere Verbesserung – das Messbild blieb in etwa gleich unvollständig (►Abb. 98|). Die Detektion der Gewebestruktur ist für den Sensor insofern eine besondere Herausforderung, da die Oberfläche des Textiles, durch die Verdrehung der Elementarfasern zum Garn, aus optischer Sicht sehr rau ist (►Abb. 89| - Abb. 102|). Zahlreiche Hinterschneidungen und Verschattungen durch die einzelnen Fasern erschweren die Bildgebung. Durch die abstehenden Fasern des Garnes sind die Messpunkte vergleichsweise stark gestreut, sodass die Software Schwierigkeiten

482 Vergleiche: Anmerkungen in ►Kapitel 13.2.2|.

hat, diese einer sinnvollen Oberfläche zuzuordnen.[483] Möglicherweise ist dieses ein Grund dafür, dass die 3D-Aufnahmen der Objektrückseiten von vergleichsweise vielen Messlücken bestimmt sind. Im Zuge der Triangulation ist eine Eliminierung einzelner ausreißender Messpunkte anzunehmen – woraus dann letztlich Messlücken resultieren. Zudem erfolgt ein Glättung, sodass die Textilstruktur zusätzlich nivelliert dargestellt wird.[484] Die Oberfläche wird daher als tendenziell verfahrensunkooperativ eingeschätzt.
Ungeachtet dessen ist jedoch der Beleg erbracht, dass mit der hochauflösenden Sensorkonfiguration die rückseitige Textilstruktur des Untersuchungsgegenstandes digitalisiert werden kann. Die Aufnahmen im hochauflösenden Modus sind dem Grundsatz nach weitaus detailreicher und schärfer als die Aufnahmen im Modus 'LoRes'.

483 Vergleiche: Ausführungen zur Ausdünnung der Daten im Zuge der ‚Automatische Datennachverarbeitung' (►Kapitel 13.4.3|).

484 Hierin begründet sich mutmaßlich auch die mangelhafte Wiedergabe der Textilstruktur durch den Sensor ‚COMET 5 11M 1000'. Die Textilstruktur müsste ihrer Größenordnung nach in den Auflösungsbereich des Gerätes fallen – zumindest das Relief der Bindungspunkte.

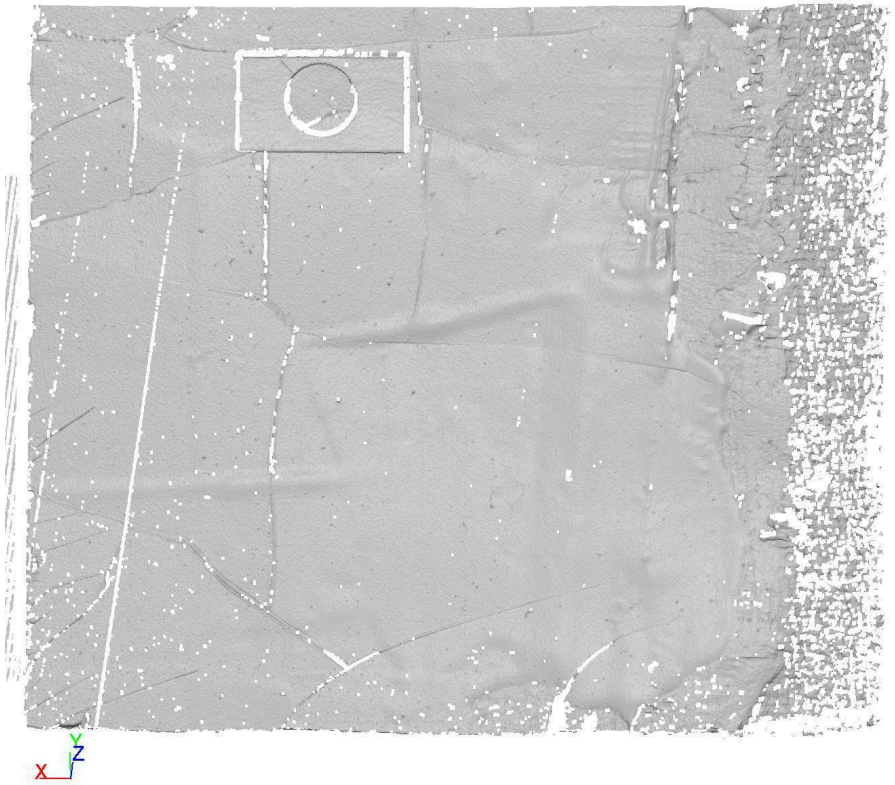
Metadaten und Messparameter

Objekt	RO_002
Benennung	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguration
Datum	20.02.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

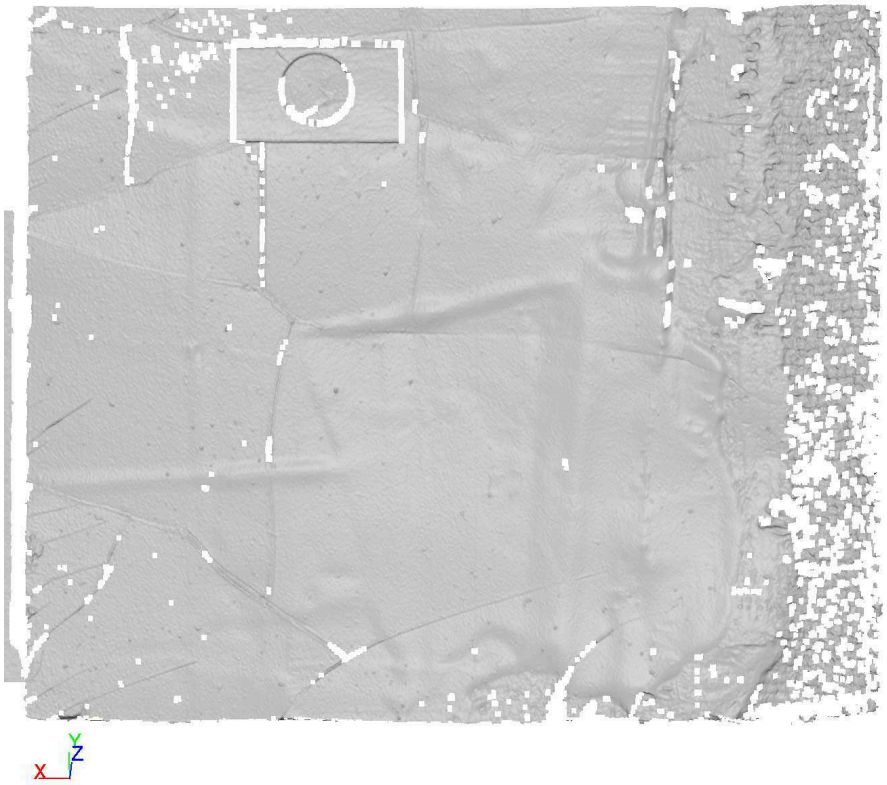
	Anzahl Messungen	1
	Matchingstrategie	ohne
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	350
	2. Messbild	560
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes/LoRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	k. A.
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	k. A.
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	k. A.
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	k. A.
	Anzahl (Knoten)punkte Vorderseite (HiRes)	8.229.480
	Anzahl (Knoten)punkte Vorderseite (LoRes)	2.050.464
	Anzahl (Knoten)punkte Rückseite (HiRes)	8.266.825
	Anzahl (Knoten)punkte Rückseite (LoRes)	2.050.950
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 20| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

RVorderseite: Sensoreinstellung HiRes



Vorderseite: Sensoreinstellung LoRes



Objekt:	RO_002	
Benennung:	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 26.02.2014
3D_artscan		Seite 1 von 6

Abb. 93| Wiedergabe der Protokollseite 1 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

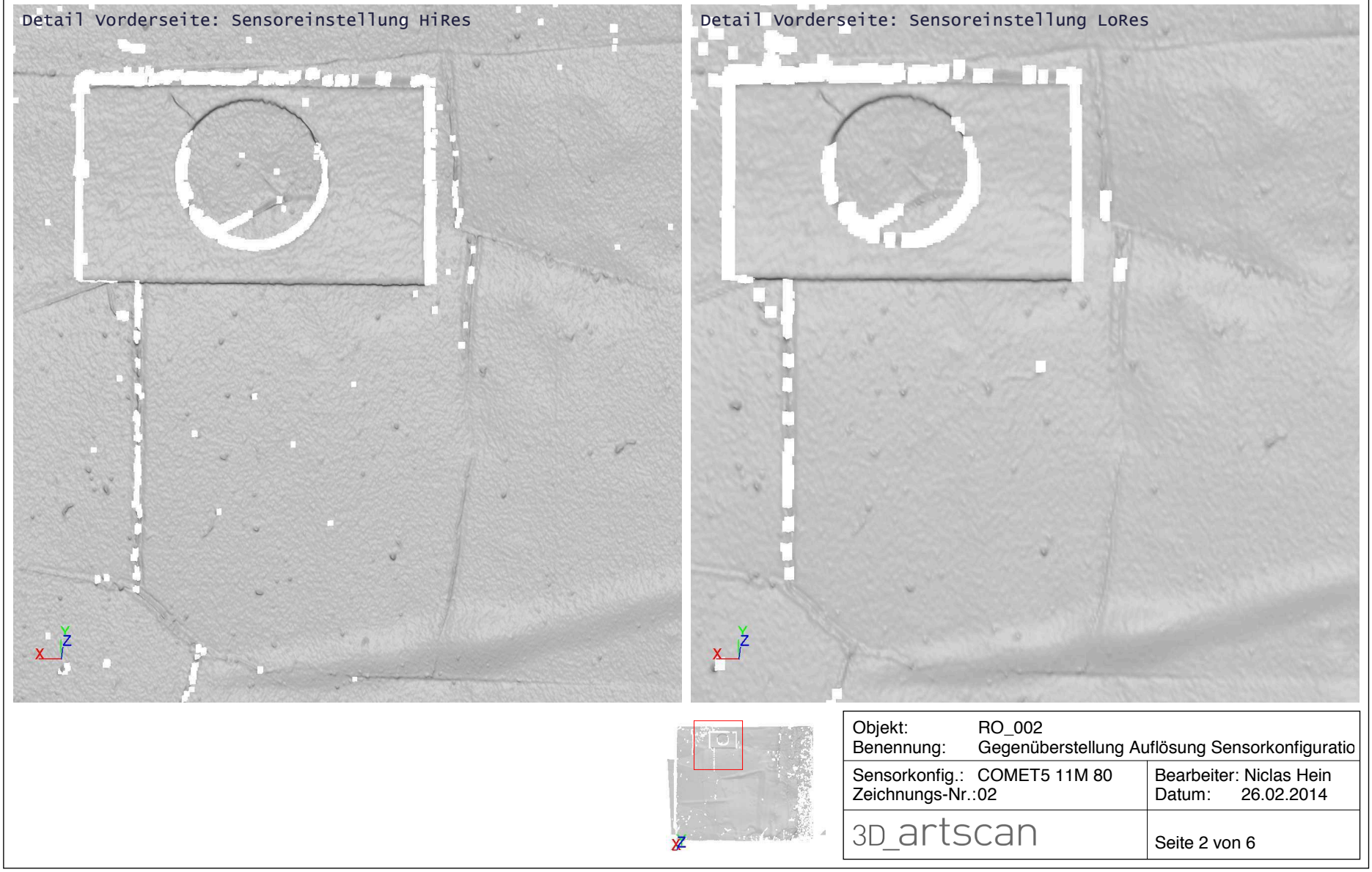
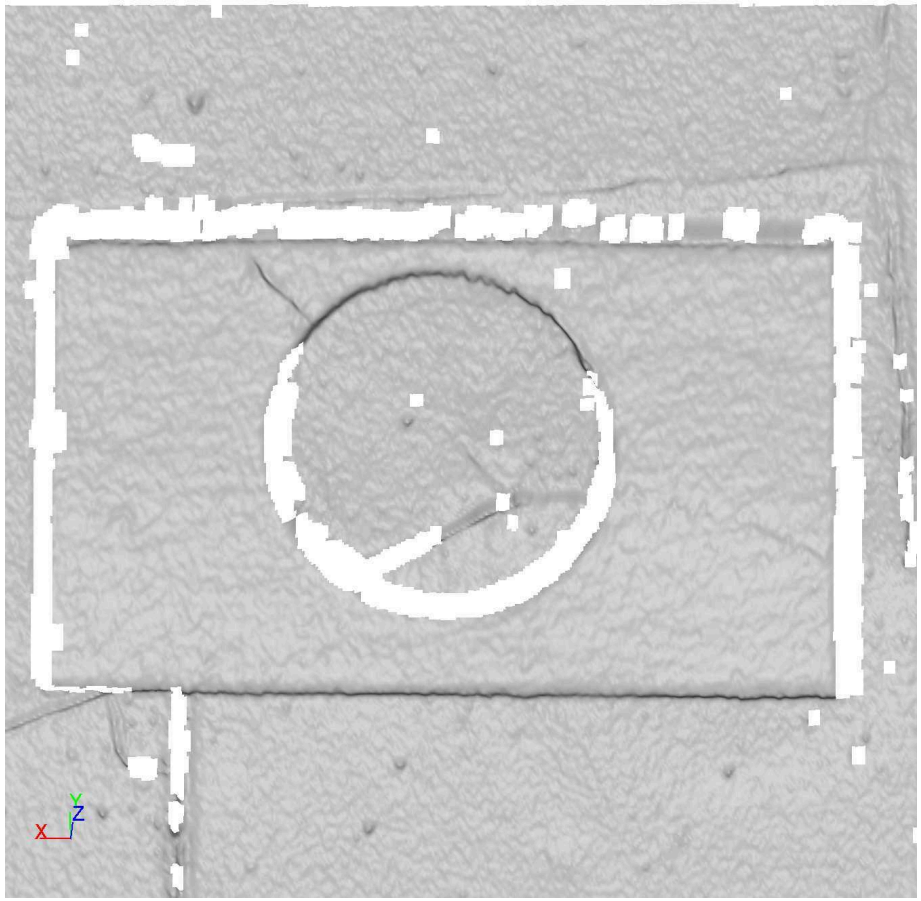
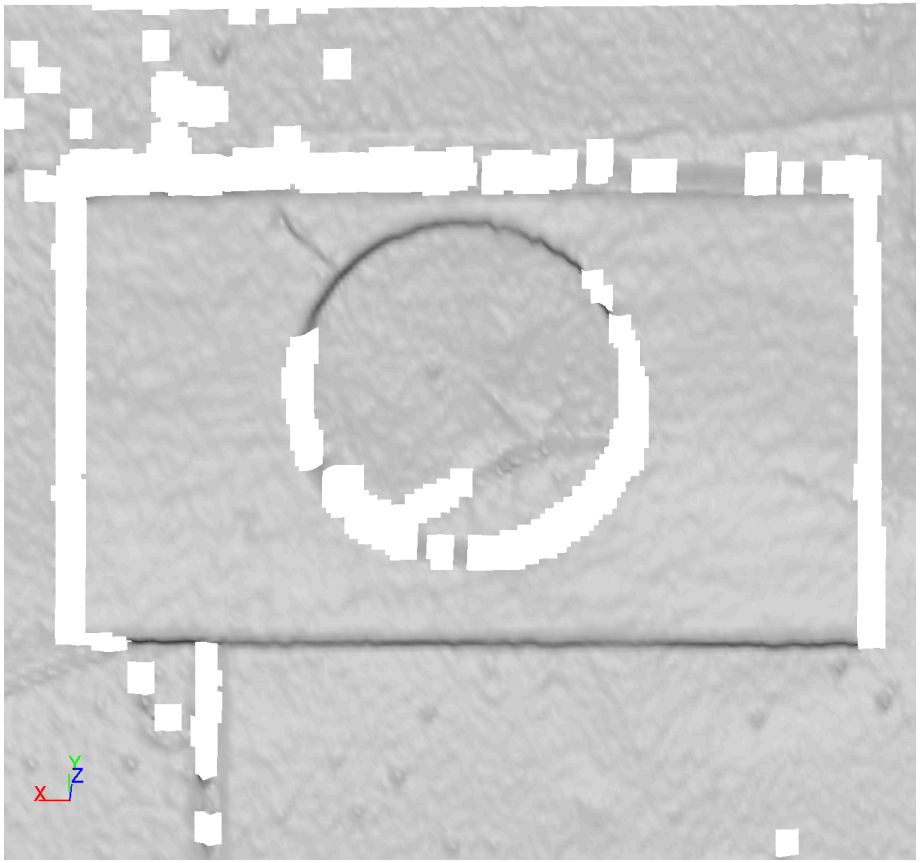


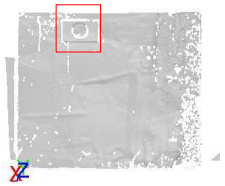
Abb. 94| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

Detail Vorderseite: Sensoreinstellung HiRes



Detail Vorderseite: Sensoreinstellung LoRes





Objekt:	RO_002		
Benennung:	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum:	26.02.2014
3D_artscan		Seite 3 von 6	

Abb. 95| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

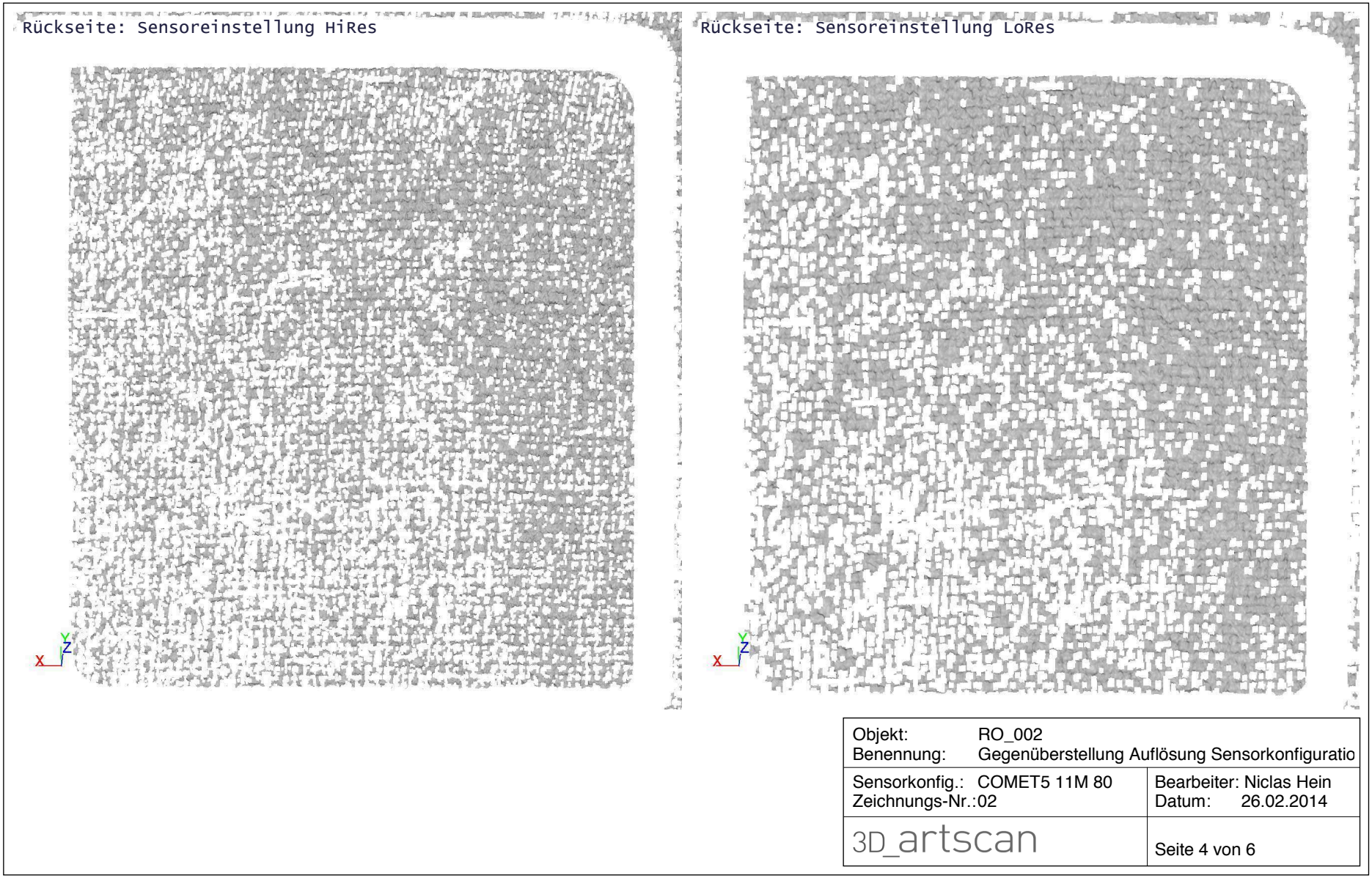
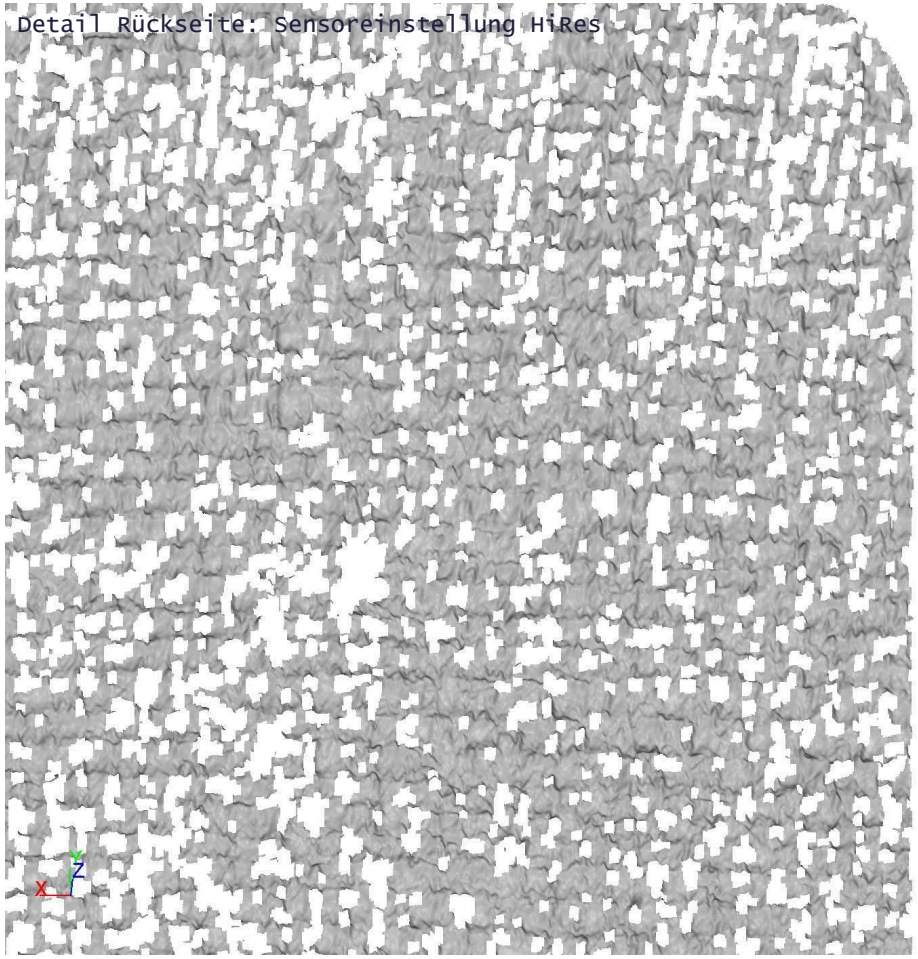
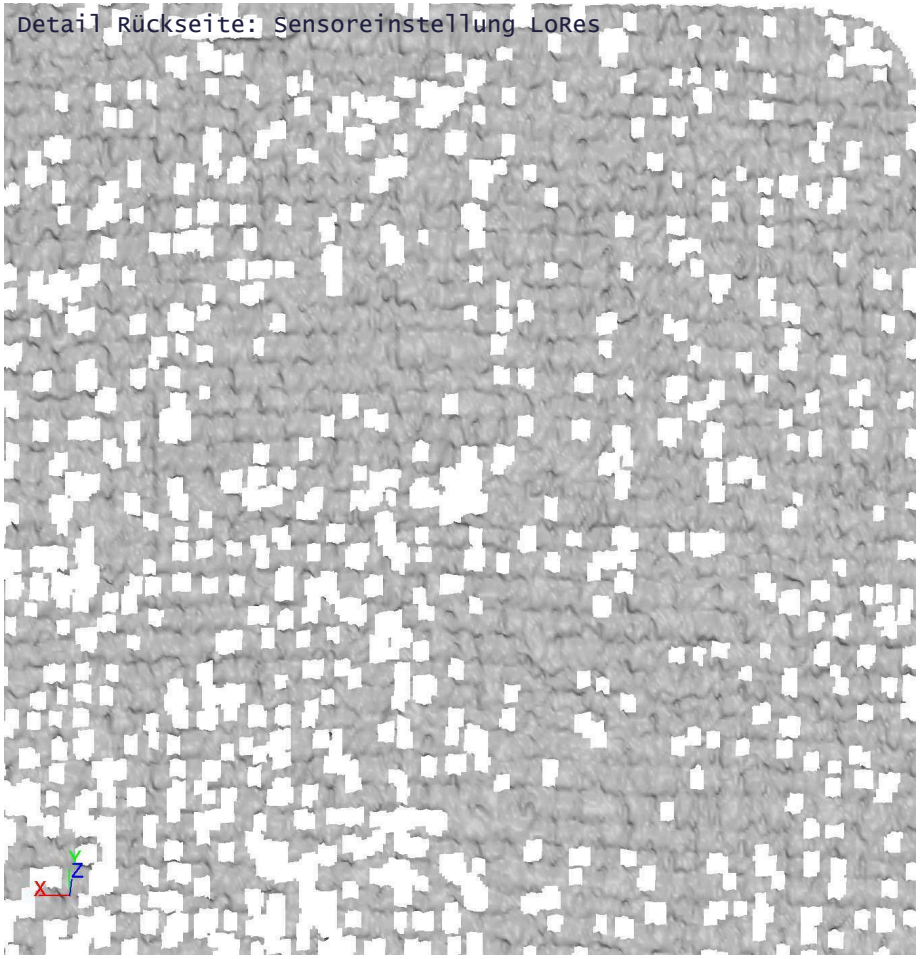


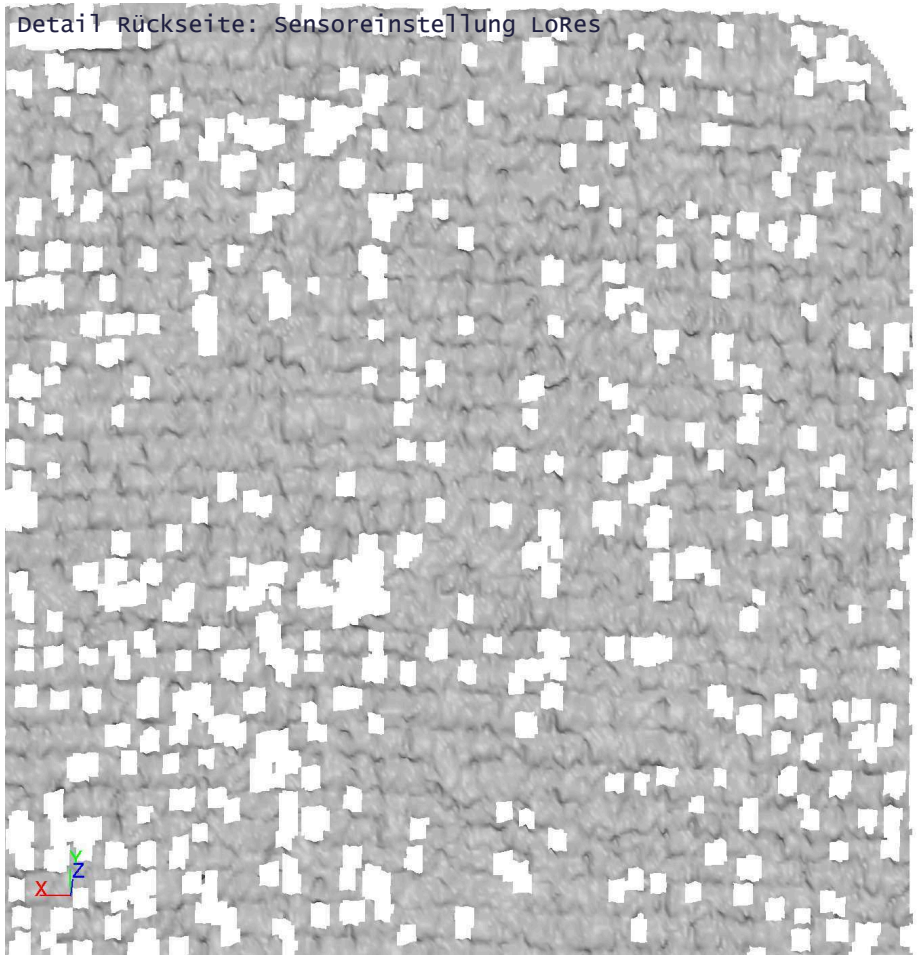
Abb. 96| Wiedergabe der Protokollseite 4 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

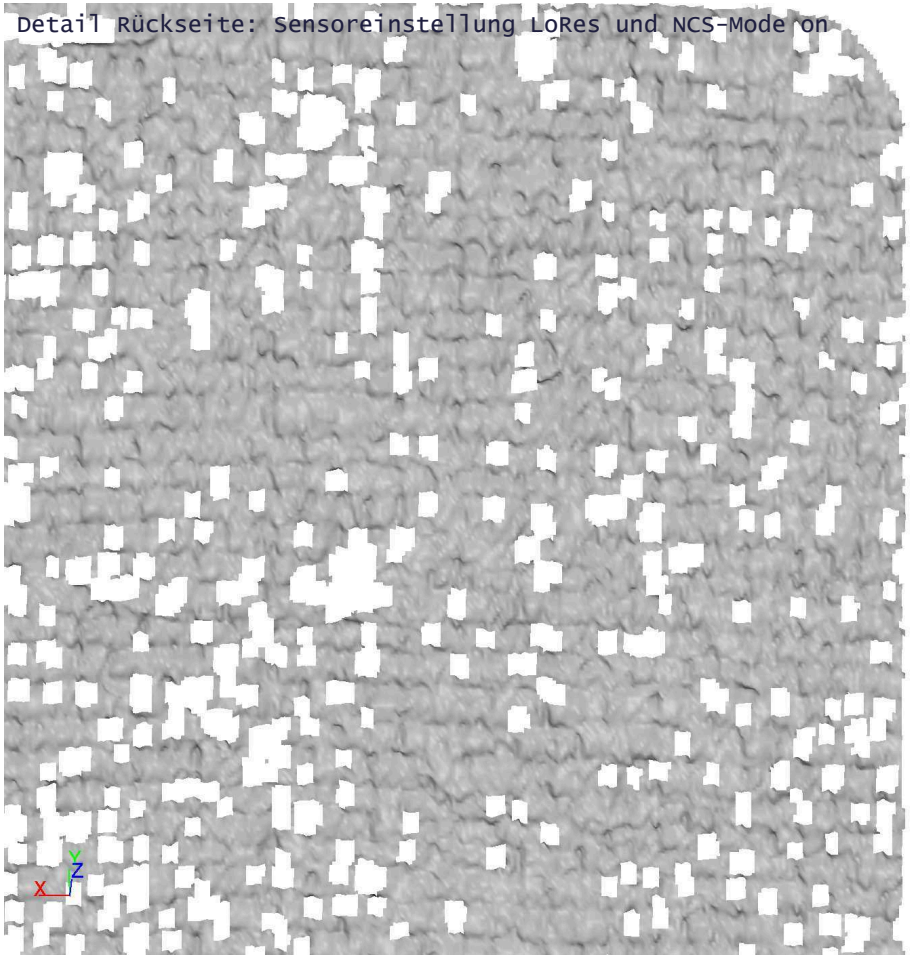




Objekt:	RO_002	
Benennung:	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 26.02.2014
3D_artscan		Seite 5 von 6

Abb. 97| Wiedergabe der Protokollseite 5 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst





Objekt:	RO_002		
Benennung:	Gegenüberstellung Auflösung Sensorkonfiguratio		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum:	26.02.2014
3D_artscan		Seite 6 von 6	

Abb. 98| Wiedergabe der Protokollseite 6 von 'RO_002', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

Ergebnis: 'RO_002', Mikro-Streifenprojektion

Zur Darstellung der grundsätzlichen Verfahrensmöglichkeiten wird die Probe mit einem hochauflösenden Mikro-Streifenprojektionsscanner digitalisiert.[485] Hier überzeugen die Ergebnisse durch eine weitaus höhere Detailgenauigkeit. Der Riss in der transparenten Harzschicht kann vom System eindeutig aufgelöst werden. Die Quantifizierung der Spaltbreite kann anhand der folgenden Bildgebung mit ca. 0,100 mm angegeben werden (►Abb. 99| und Abb. 100|). Besonders anschaulich wird die Leistungsfähigkeit des Systems bei der Digitalisierung der Rückseite. In beeindruckender Detailgenauigkeit können hier sogar einzelne Elementarfasern aufgelöst werden (►Abb. 101| und Abb. 102|).

Wenngleich die zuletzt geschilderten Ergebnisse überzeugen, wird die Mikro-Streifenprojektion bezüglich der praktischen Eignung und unter dem Gesichtspunkt eines Transportschadensmonitorings als

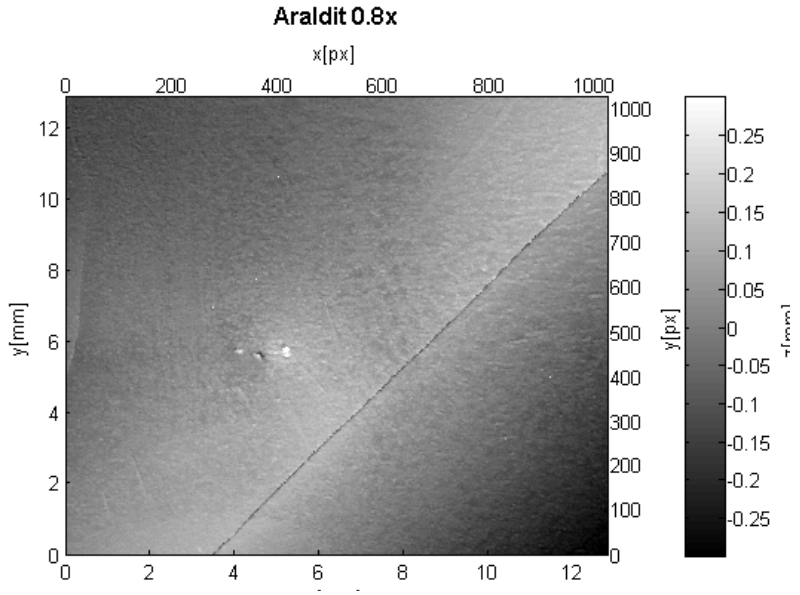


Abb. 99| Mikro-Streifenprojektionsaufnahme von 'RO_002': Vorderseite bei einem 8-fachen Vergrößerungsfaktor (Graustufen).
Quelle: Daniel Claus

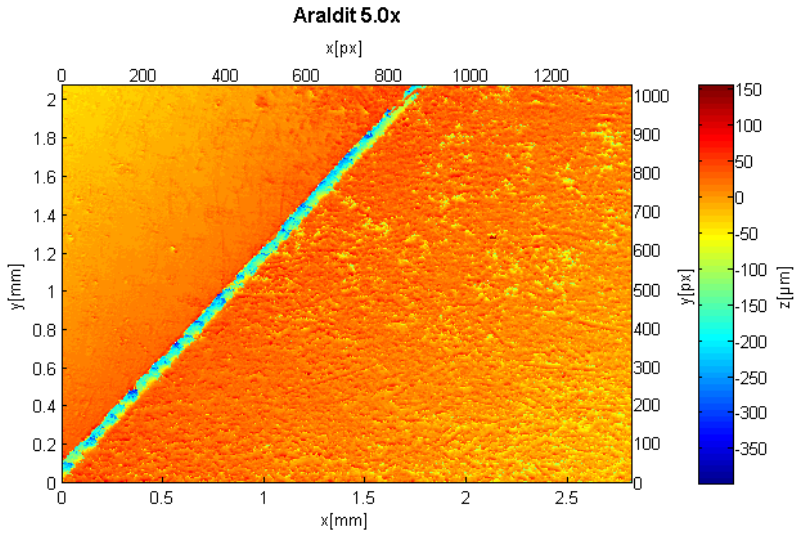


Abb. 100| Mikro-Streifenprojektionsaufnahme von 'RO_002': Vorderseite bei einem 50-fachen Vergrößerungsfaktor (Falschfarben).
Quelle: Daniel Claus

485 Hinsichtlich der Verortung an ‚RO_002' entstammen die Ergebnisse dem maskierten Bereich. Präzisere Angaben über die genaue Messposition sind nicht möglich – die starke Vergrößerung erlaubt hier keine evidenten Schlüsse. Daher haben die Messergebnisse lediglich einen grundlegenden und dokumentarischen Charakter und keine die eigenen Ergebnisse verifizierenden.

negativ bewertet. Ausschlaggebend sind hierbei Einschränkung aufgrund verwehrter globaler Aspekte. Auch wenn ein 'Matching' mehrerer Aufnahmen prinzipiell möglich ist, wird in diesem Fall eine Verfahrenslimitierung durch die Datenmenge erwartet, bzw. daraus resultierende Probleme bei der Datennachverarbeitung und Datenauswertung. Bei der gezeigten fünfzigfachen Vergrößerung beträgt das Messfeld lediglich 2 x 3 mm.

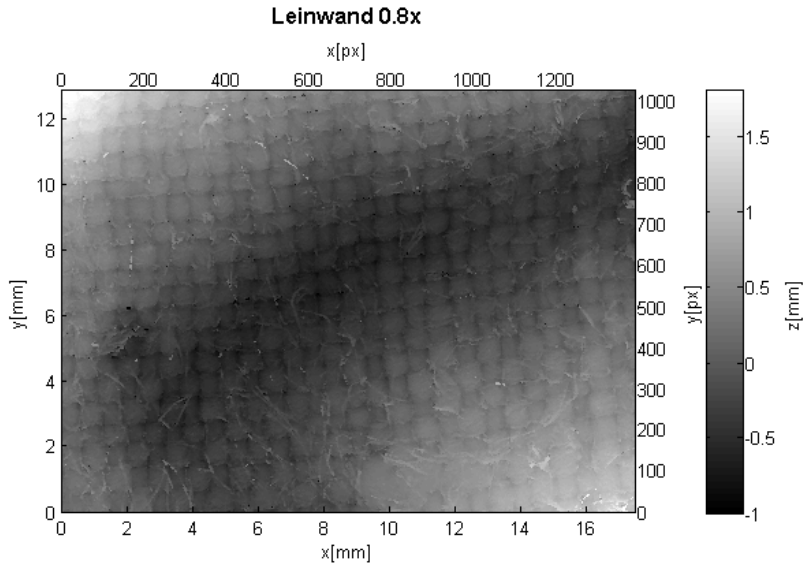


Abb. 101| Mikro-Streifenprojektionsaufnahme von 'RO_002': Rückseite bei einem 8-fachen Vergrößerungsfaktor (Graustufen).
Quelle: Daniel Claus

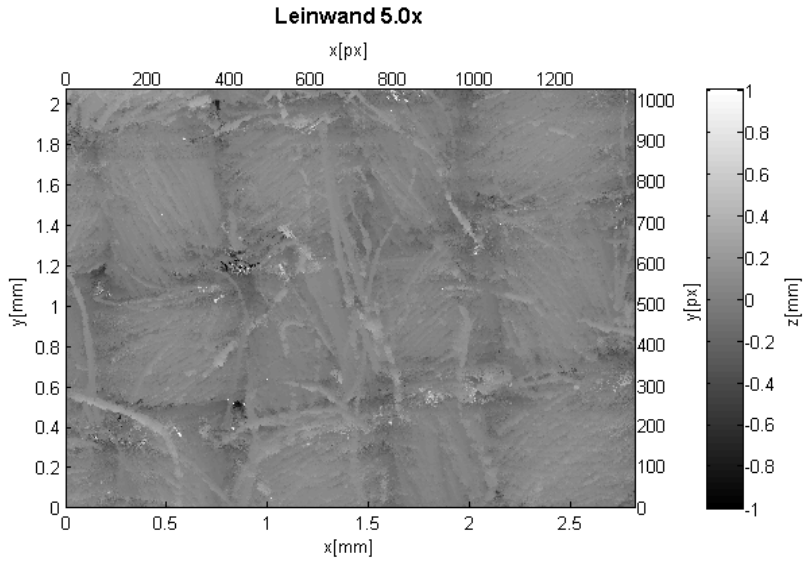


Abb. 102| Mikro-Streifenprojektionsaufnahme von 'RO_002': Rückseite bei einem 50-fachen Vergrößerungsfaktor (Graustufen).
Quelle: Daniel Claus

Datenerhebung: 'RO_003', Versuch zur Detektion des Craquelé

Wenngleich die prinzipielle Eignung des Sensors 'COMET 5 11M 80' zum Nachweis eines Craquelé vorgewiesen werden kann, soll, über eine rein qualitative Einschätzung hinaus, ebenso der Möglichkeit einer quantitativen Bestimmung nachgegangen werden. Hierzu wird als Prüfobjekt ein weiteres historisches Gemäldefragment gewählt, welches sich gemäß einer optischen Einschätzung durch ein weitaus feineres Craquelé kennzeichnet, als dieses bei 'RO_002' der Fall ist. 'RO_003' charakterisiert sich durch eine helle Oberfläche und ein extrem feines, sich jedoch dunkel abzeichnendes Craquelé. Der Messablauf und die Sensoreinstellungen folgt der bisher beschriebenen Vorgehensweise.

Auswertung: 'RO_003', Versuch zur Detektion des Craquelé

Die Auswertung folgt dem bisherigen Muster. Die Quantifizierung der Rissbreite des Craquelé erfolgt über virtuelle Messschieber. Die Auswertung ist in einem Messprotokoll dokumentiert (►Abb. 103| - Abb. 108|).

Ergebnis: 'RO_003', Versuch zur Detektion des Craquelé

Das sich bei der fotografischen Aufnahme markant dunkel abzeichnende Craquelé kann mit dem Streifenprojektionsscanner in seiner Komplexität nicht vollständig nachgewiesen werden. So kennzeichnet sich die Oberfläche der 3D-Aufnahme im Rissbereich, unabhängig der virtuellen Betrachtungs- und Beleuchtungsgeometrie, im Regelfall nivelliert. Lediglich vereinzelt finden sich Hinweise auf Rissstrukturen. Gemäß einer optischen Überprüfung am Original sind diese dann durch tendenziell breitere Riss-Zwischenräume bestimmt. Auf der linken Abbildung der zweiten Protokollseite sind unscheinbare Kontraständerungen entlang vertikaler Strukturen zu sehen (►Abb. 104| a).[486] Die nebenstehende rechte Abbildung des Protokolls zeigt das Areal vergrößert, sodass diese Strukturen als Risse identifiziert werden können (b). Die erhebliche Vergrößerung wird anhand des sich reliefartig abzeichnenden Pinselduktus in der oberen linken Bildecke offensichtlich (c), wobei diesbezüglich die Abbildung auf der dritten Protokollseite noch weitaus aussagekräftiger ist (►Abb. 105|). Dort wird der Riss in einer nochmals vergrößerten Ansicht gezeigt.[487] Bei der vierten Protokollseite können anhand der vergrößerten Tageslichtaufnahme (links) die Risse anhand ihres Kontrastverhältnisses eindeutig nachvollzogen werden (►Abb. 106|). Bei der 3D-Aufnahme (rechts) hingegen, sind dieselben nur noch zu erahnen. Die beiden gezeigten Abbildungen entsprechen einem vergleichbaren Ausschnitt und Vergrößerungsfaktor. Ein selektierter Riss kann mit einer differie-

[486] Eingeklammerte Minuskeln werden in diesem Kontext, sowie im weiteren Verlauf der vorliegenden Schrift, als verweisendes Element auf die zugehörigen Stellen im Messprotokoll verwendet.

[487] Der Vergrößerungsfaktor wird anhand des eingeblendeten Messschiebers (Länge: 16,510 mm) sowie der roten Markierung in der übersicht-gebenden fotografischen Abbildung deutlich. Die Anfangs- und Endpunkte des Messschiebers sind anhand eindeutig identifizierbarer Rissstrukturen positioniert, wobei dieselben auch auf dem Tageslichtfoto erkennbar sind. Der angesprochene Pinselduktus rührt nach optischem Ermessen von einer lasierend aufgetragenen, extrem dünnen Farbschicht her.

renden Breite zwischen 0,071 und 0,110 mm quantitativ bestimmt werden. Hier zeigt die wiedergegebene 3D-Bildgebung der fünften Protokollseite, dass der Riss vergleichsweise offensichtlich ist (►Abb. 107|).[488] Der Darstellungsmodus vermaschter Dreiecke belegt, dass zwischen der Rissstruktur und der unversehrten Oberfläche weiche Übergänge bestehen (►Abb. 106| d). Abweichend von diesem Ergebnis offenbart das Mikroskopfoto der selben Stelle jedoch, dass dieses nicht der Realsituation entspricht. Die Risskanten sind dort scharfkantig und die Übergänge abrupt (d). Quantitative Rückschlüsse unterliegen demzufolge einem Unsicherheitsfaktor – ein Zusammenhang der bereits erörtert wurde (►Kapitel 14.2.1| und Kapitel 29.15|).
Abschließend wird festgehalten, dass die Craquelé-Struktur von 'COMET 5 11M 80', an 'RO_003' grundsätzlich bestimmt werden kann. Dieses gilt sowohl qualitativ, als auch quantitativ. Dennoch gibt es ebenso feine Craquelé-Strukturen, die sich unterhalb der Nachweisgrenze des Sensors befinden.

488 Rückblickend auf die Vorversuche am Untersuchungsgegenstand ‚Druckplatte' und die Probleme bei der Vermessung des Kratzers, ist eine vergleichsweise deutliche Kantenführung nicht selbstverständlich. Anhand der verifizierenden Messung durch die Mikro-Streifenprojektion konnte der Kratzer bei der ‚Druckplatte', wie oben angegeben, im Mittel mit einer Breite von 0,093 mm bestimmt werden. Beide untersuchten Merkmale weisen daher ungefähr die selbe raumdimensionale Ausprägung auf.

Metadaten und Messparameter

Objekt	RO_003
Benennung	Auflösung_Craquelé
Datum	07.03.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

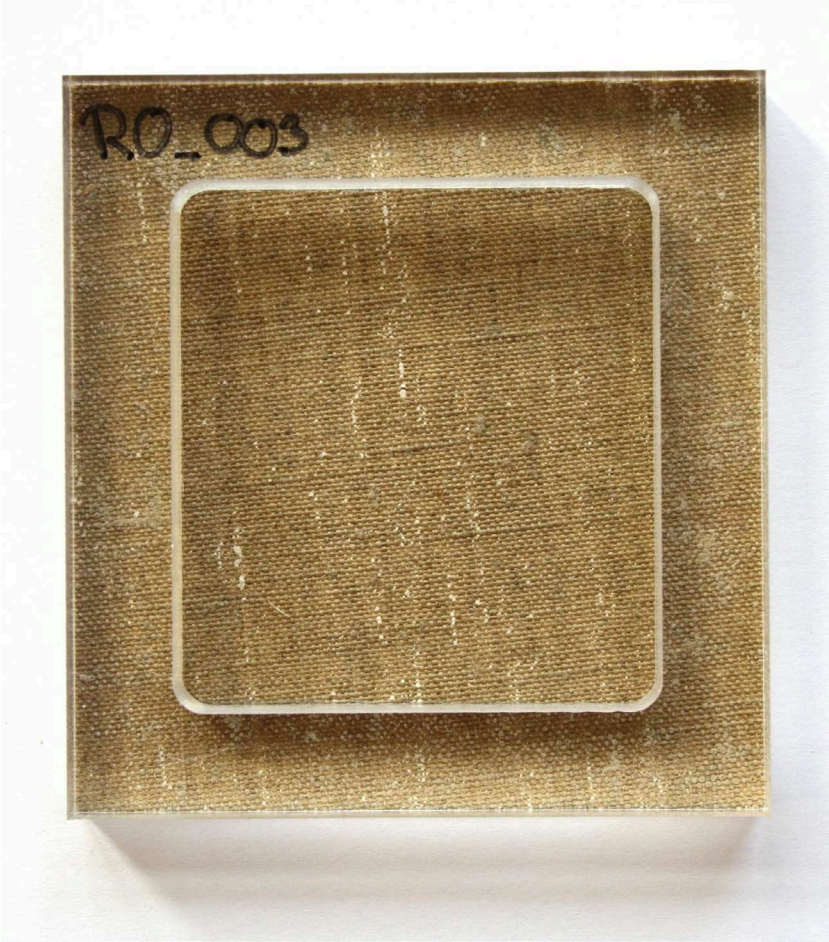
Anzahl Messungen	1/0°
Matchingstrategie	Freies Fl.m.
Messwinkel	60°

Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	425
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00

Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	2.696.536
	Anzahl Dreiecke	5.366.333
	Oberfläche (mm^2)	3.781.063

Tab. 21| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst





Objekt:	RO_003	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 07.03.2014
3D_artscan		Seite 1 von 6

Abb. 103| Wiedergabe der Protokollseite 1 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

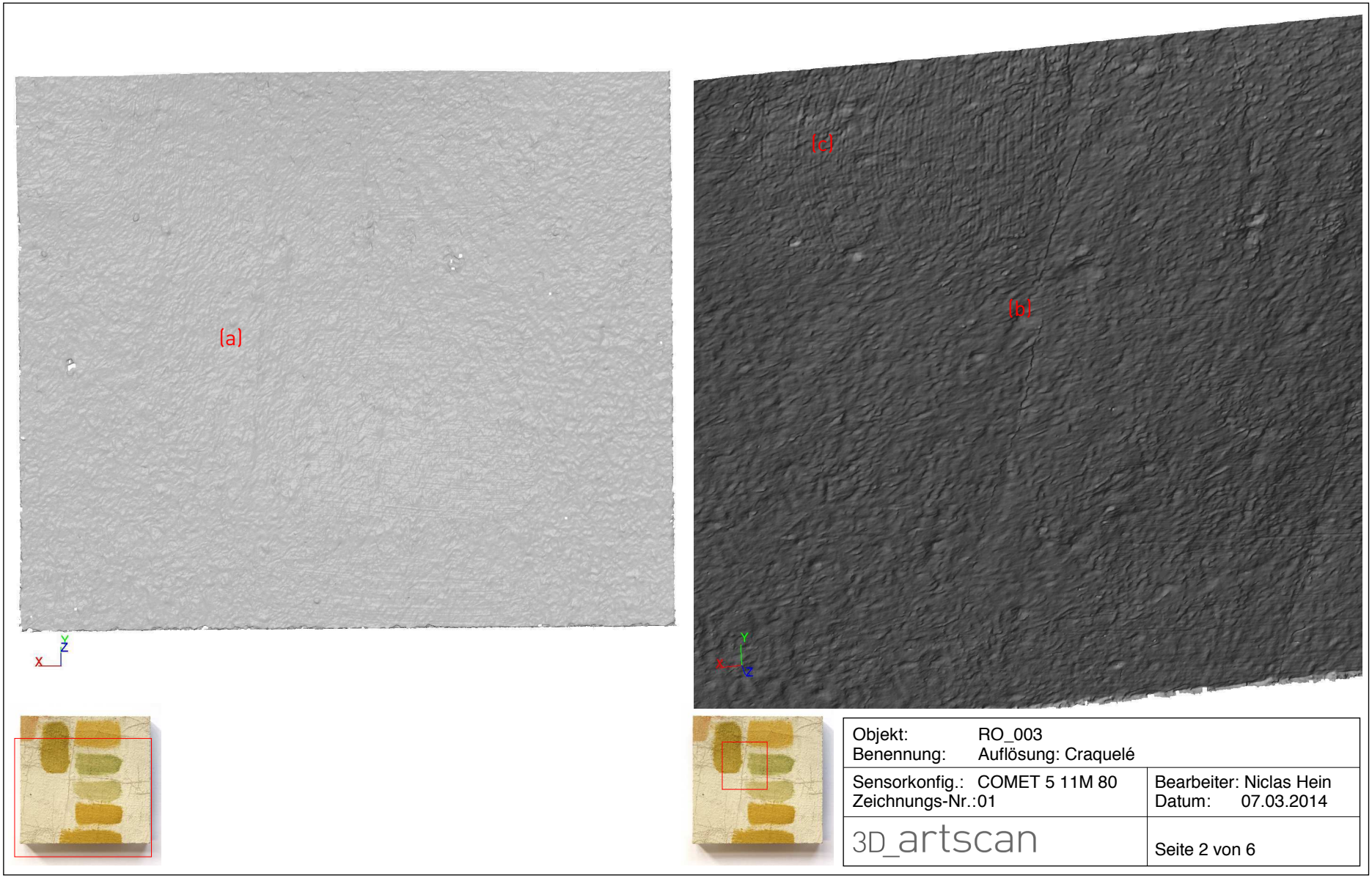
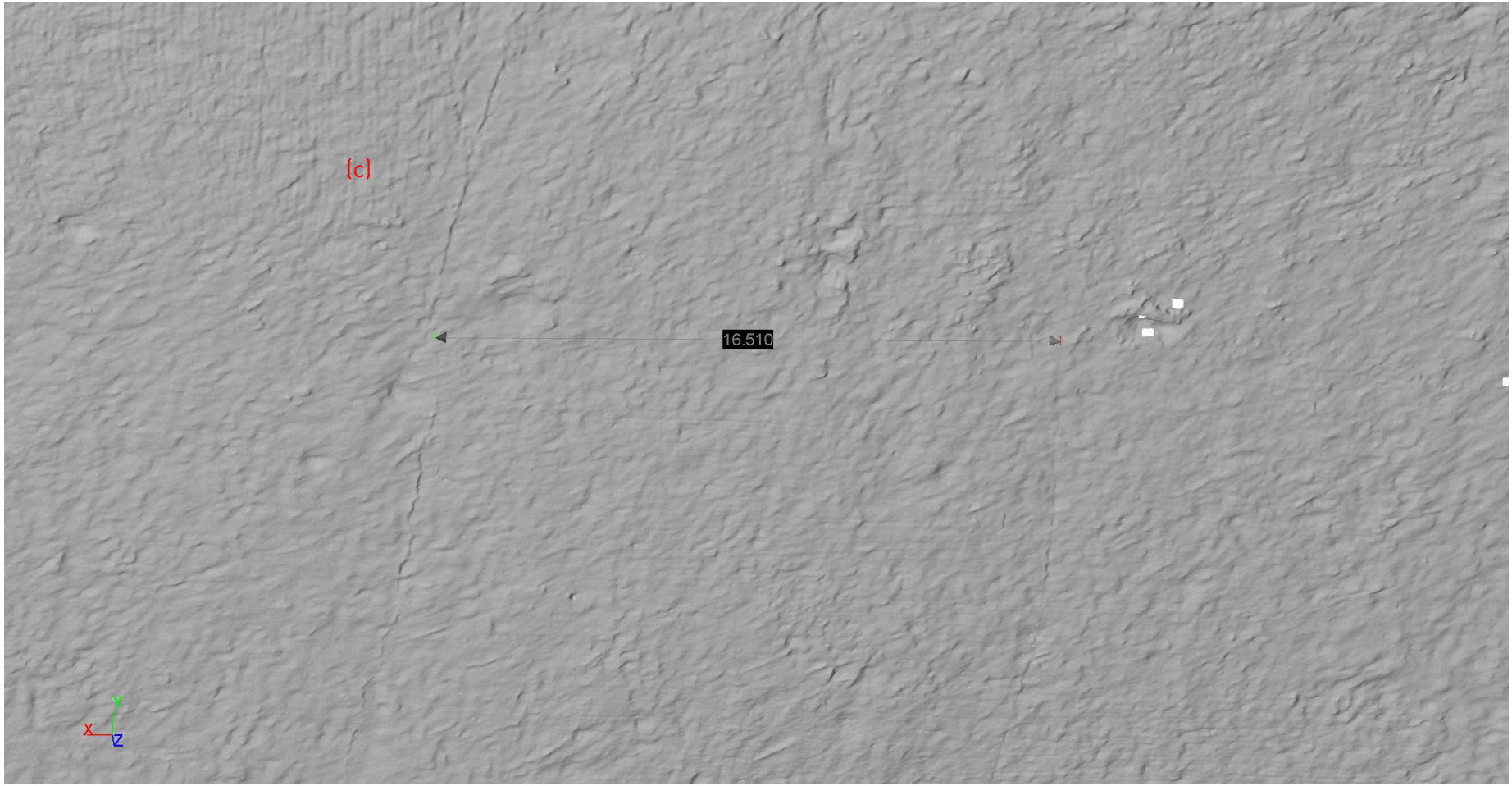
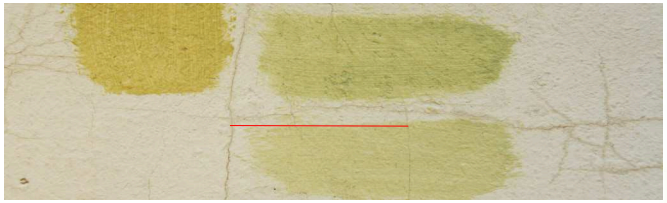
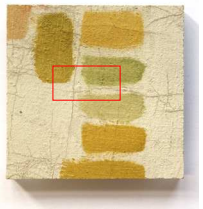


Abb. 104| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

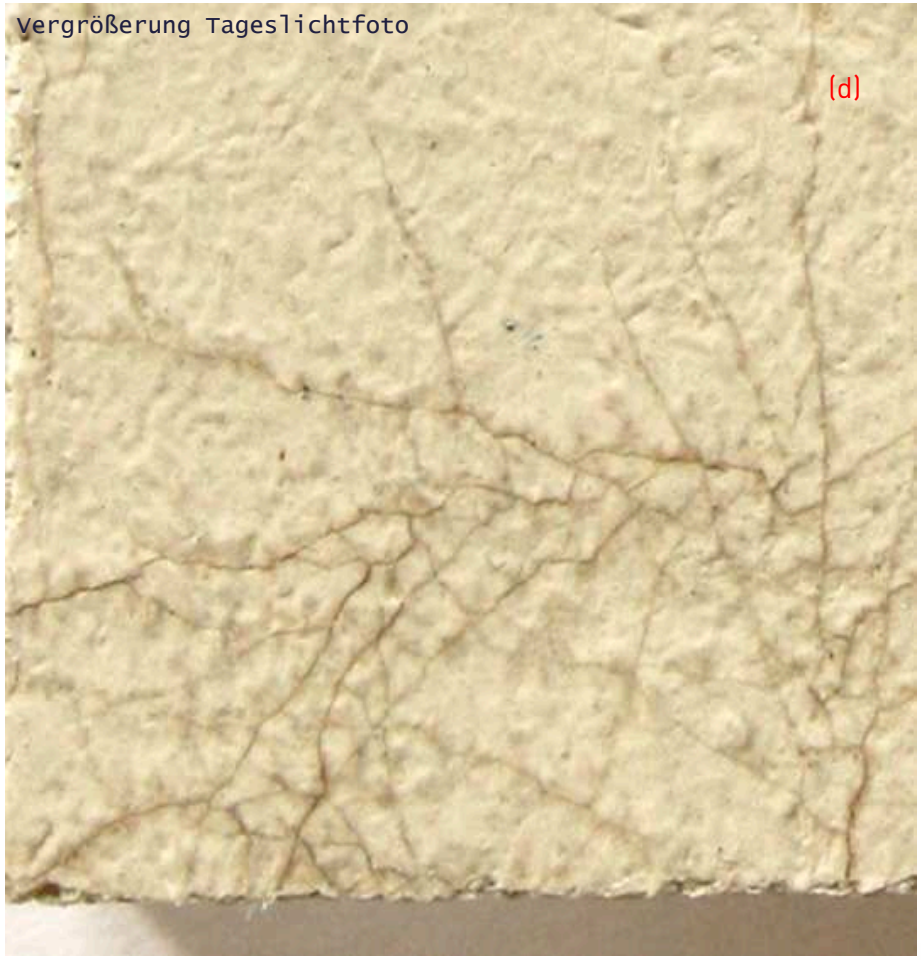


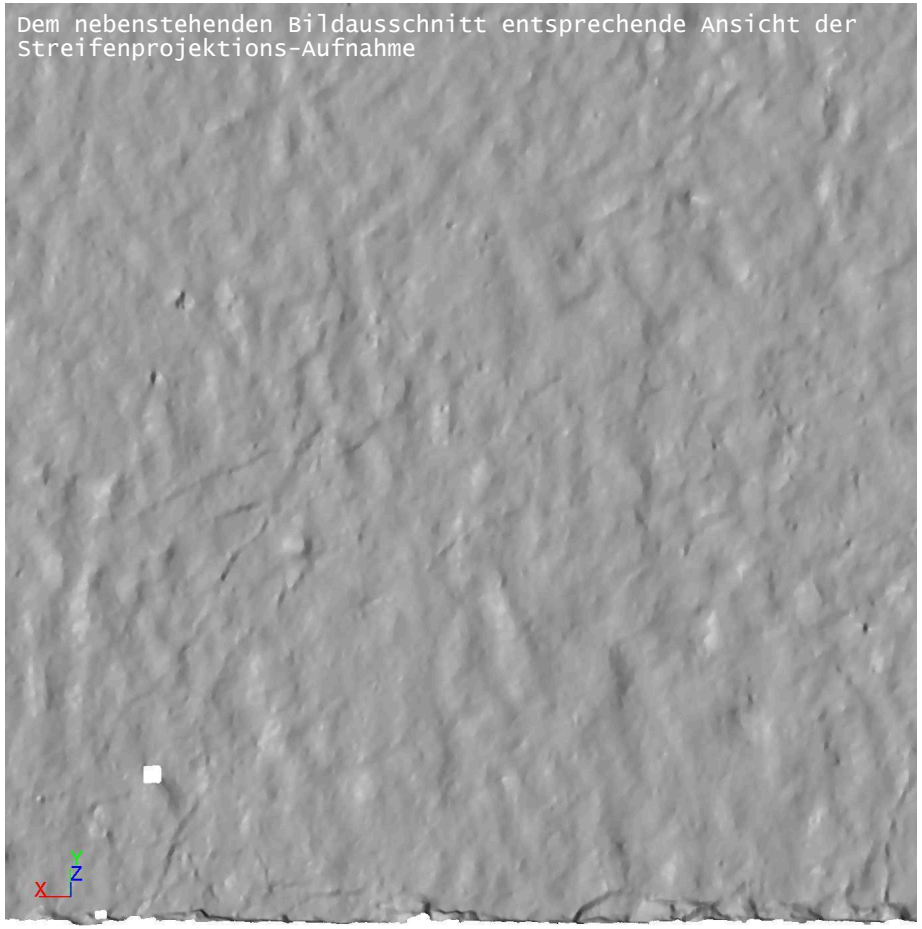


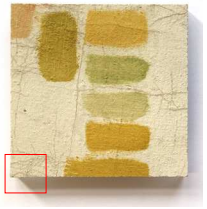


Objekt:	RO_003	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 07.03.2014
3D_artscan		Seite 3 von 6

Abb. 105| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

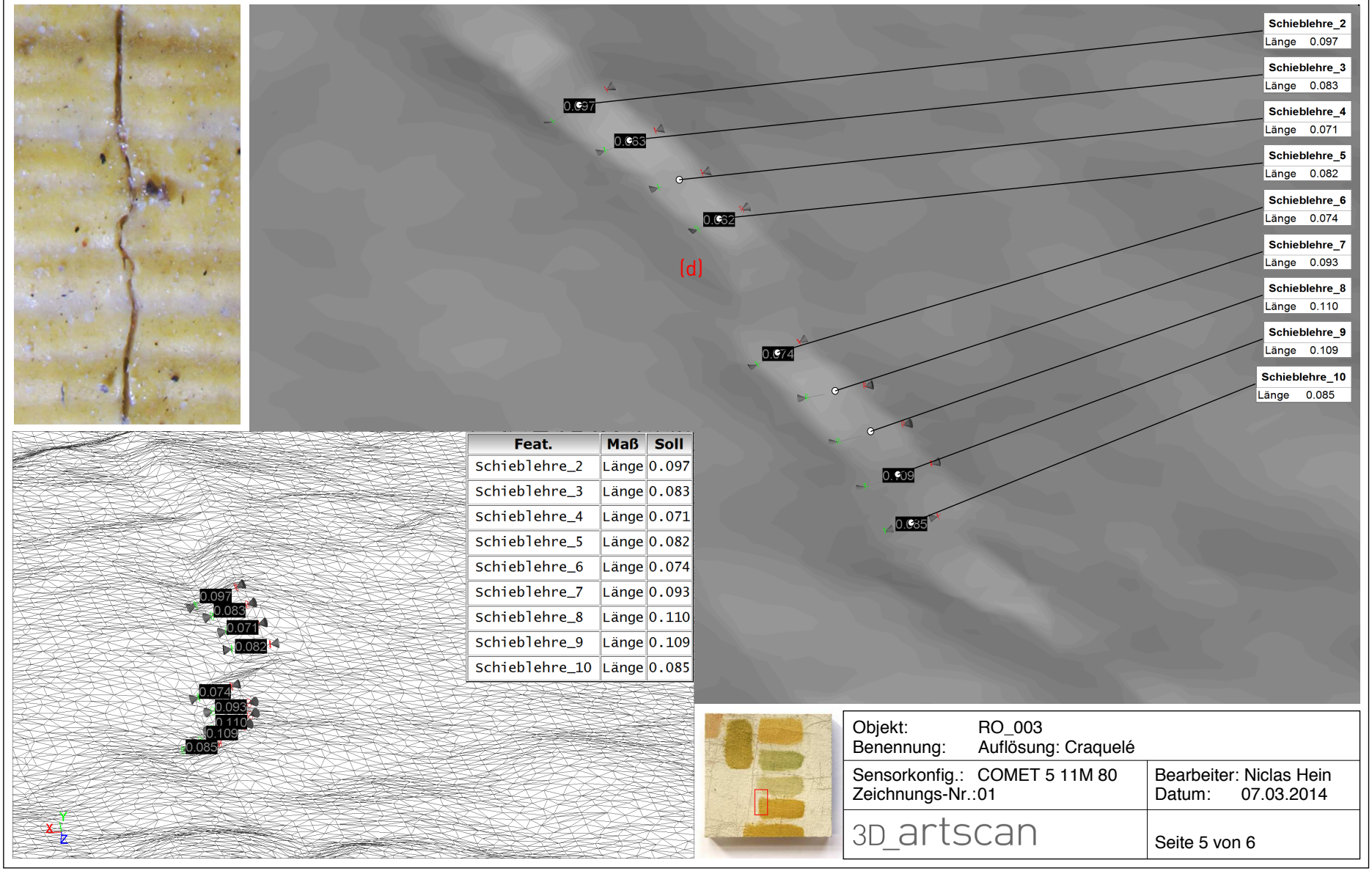






Objekt: RO_003 Benennung: Auflösung: Craquelé		
Sensorkonfig.: COMET 5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01		Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 07.03.2014
3D_artscan		Seite 4 von 6

Abb. 106| Wiedergabe der Protokollseite 4 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

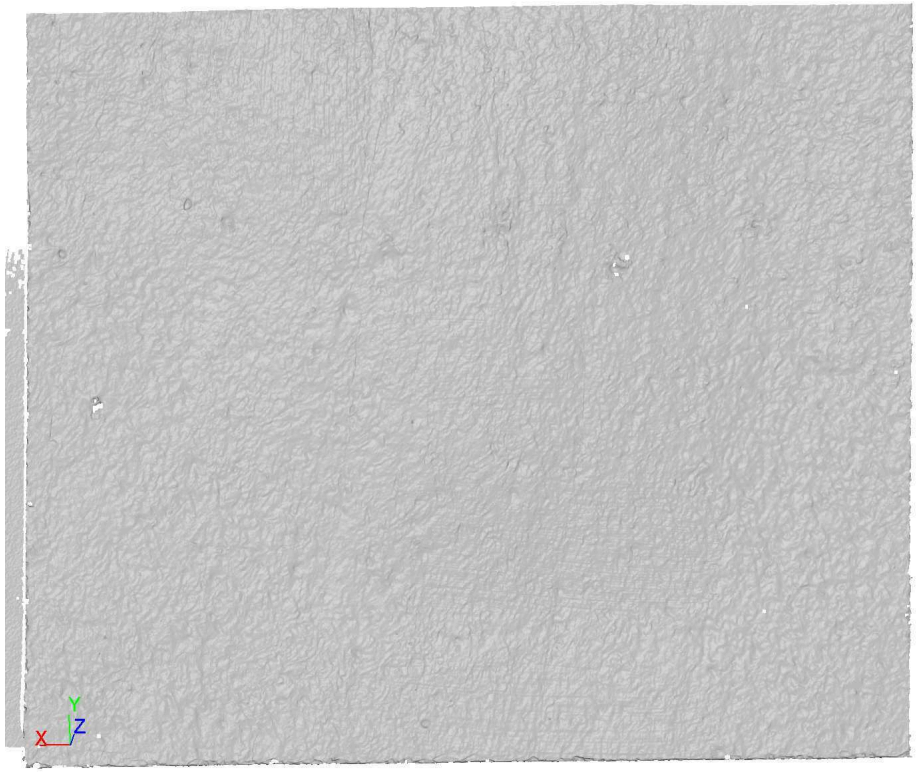


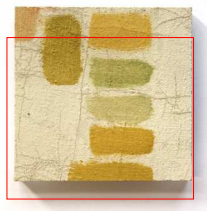
Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_2	Länge	0.097
Schieblehre_3	Länge	0.083
Schieblehre_4	Länge	0.071
Schieblehre_5	Länge	0.082
Schieblehre_6	Länge	0.074
Schieblehre_7	Länge	0.093
Schieblehre_8	Länge	0.110
Schieblehre_9	Länge	0.109
Schieblehre_10	Länge	0.085

Objekt: RO_003 Benennung: Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.: COMET 5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 07.03.2014
3D_artscan	Seite 5 von 6

Abb. 107| Wiedergabe der Protokollseite 5 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

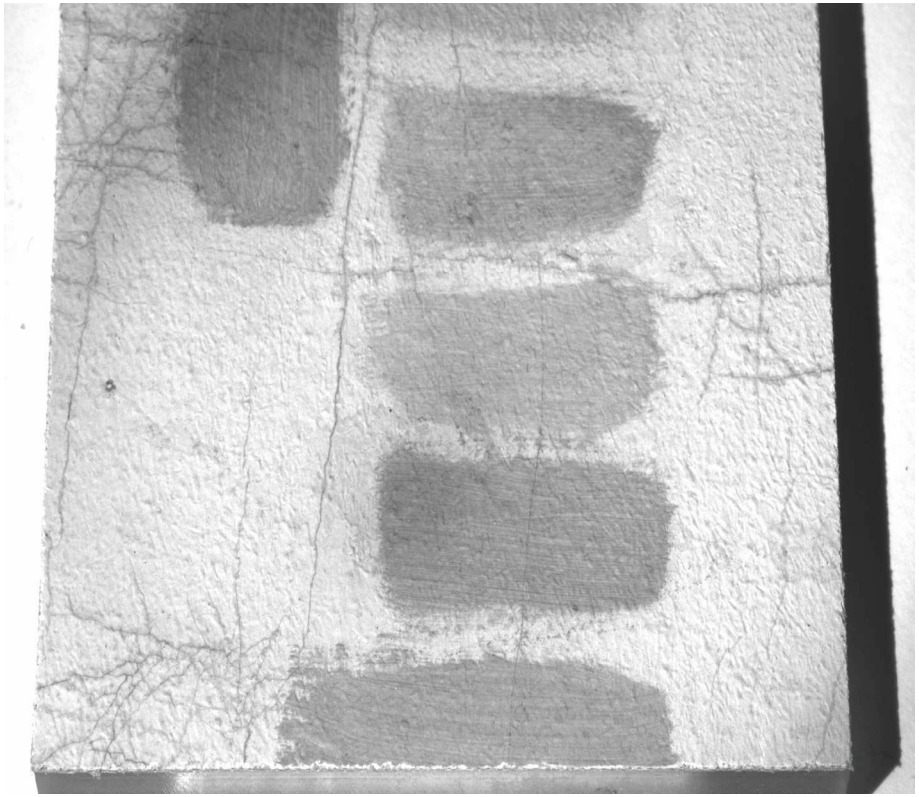
Dreiecksnetzoberfläche





Kamerabild des Sensor ohne projiziertes Streifenmuster.
(Brightimage)

Der Bildausschnitt entspricht exakt dem nebenstehenden virtuellen Modell, lediglich die Darstellung ist aufgrund des Messwinkels sperspektivisch verzerrt.



Objekt:	RO_003	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 07.03.2014
3D_artscan		Seite 6 von 6

Abb. 108| Wiedergabe der Protokollseite 6 von 'RO_003', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'RO_009', Versuch zur Detektion des Craquelé

In einem weiterführenden Experiment wird das Gemäldefragment 'RO_009' untersucht. Auswahlkriterien ergeben sich aufgrund seiner komplexen Objektstruktur. Im Vergleich zum vorherigen Untersuchungsgegenstand kennzeichnet es sich durch einen starken Farbkontrast, einen heterogenen Oberflächenglanz und ein ausgeprägteres Oberflächenrelief. So weist die Probe sowohl sehr glatte, als auch raue Objektbereiche auf. Hinzu kommen authentische Vorschäden: feine und grobe Risse, Fehlstellen, Schichtentrennungen und in Teilen leicht aufstehende Malschichtbereiche. Das Gemäldefragment wurde in der Vergangenheit mit Wachs doubliert. Aufgrund der zu erwartenden Verschattungen im Bereich der Fehlstellen und die aufstehenden Malschichtschollen wird für diesen Versuch sowohl eine einzelne 3D-Aufnahme des Objektes, als auch ein geschlossenes 3D-Modell erstellt. Letzteres besteht aus vier Einzelaufnahme bei zwischenzeitiger Objektrotation um jeweils 90°. Versuchsziel ist eine vollständige Digitalisierung des anspruchsvollen Objektes. Messablauf und Sensoreinstellung folgten dem bisherigen Muster.

Auswertung: 'RO_009', Versuch zur Detektion des Craquelé

Die Auswertung der Daten erfolgt in 'INSPECTplus' wobei die Ergebnisse wie üblich in einem Protokoll dokumentiert sind (►Abb. 109| - Abb. 112|).

Ergebnis: 'RO_009', Versuch zur Detektion des Craquelé

Prinzipiell können sowohl bei der einzelnen 3D-Aufnahme, als auch dem 3D-Modell objektspezifische Strukturen wie ein Craquelé, gröbere Risse, Areale aufstehende Malschicht, sowie im Fehlstellenbereich die Textur des Bildträgers nachgewiesen werden. Der Vergleich der 3D-Aufnahme mit dem 3D-Modell belegt jedoch, dass Erstgenanntes im Gegensatz zu Letztgenanntem entlang des Kantenverlaufes der Fehlstellen Messlücken aufweist. Diese begründen sich in den Verschattungen der Kanten als Folge lediglich eines Messwinkels. Bei besonders zerklüfteten Objekten oder Malschichtoberflächen mit ausgeprägten Pastositäten wird daher die Digitalisierung über mehrere Einzelaufnahmen empfohlen, wobei eine zwischenzeitige Objektrotation erfolgen sollte.

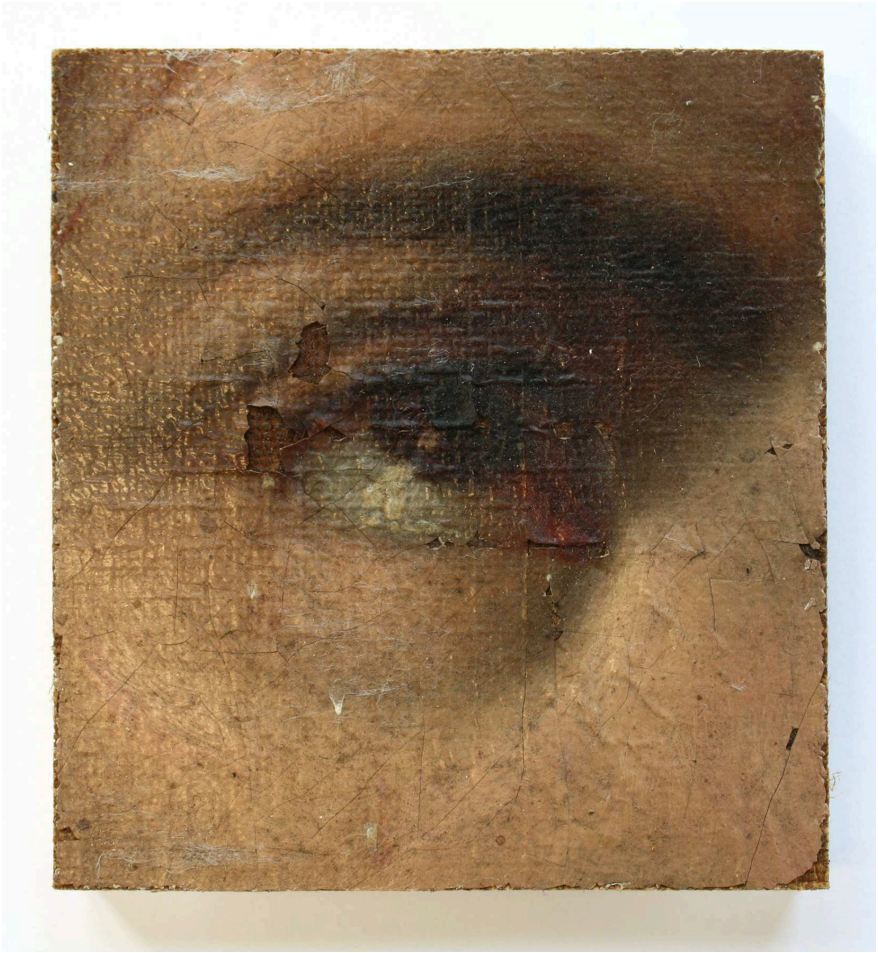
Ein weitaus entscheidenderes Ergebnis dieses Versuches ist jedoch die nachgewiesene Korrelation zwischen der Vollständigkeit des Digitalisates und der Farbigkeit des Objektes. Dunkle Farbtöne formieren sich hier zu Messlücken. So kann die schwarze Pupille der portraitierten Person, sowie der dunkle Augenbrauenbereich nicht digitalisiert werden (►Abb. 112|). Dunkle Farbpartien absorbieren den zur Bildgebung erforderlichen Streifenkontrast. Wie die Metadaten belegen (►Tab. 22|), kann die Belichtungszeit jedoch nicht weiter verlängert werden. Dem Ergebnis nach wird hiermit eine wesentliche Verfahrenseinschränkungen aufgezeigt.

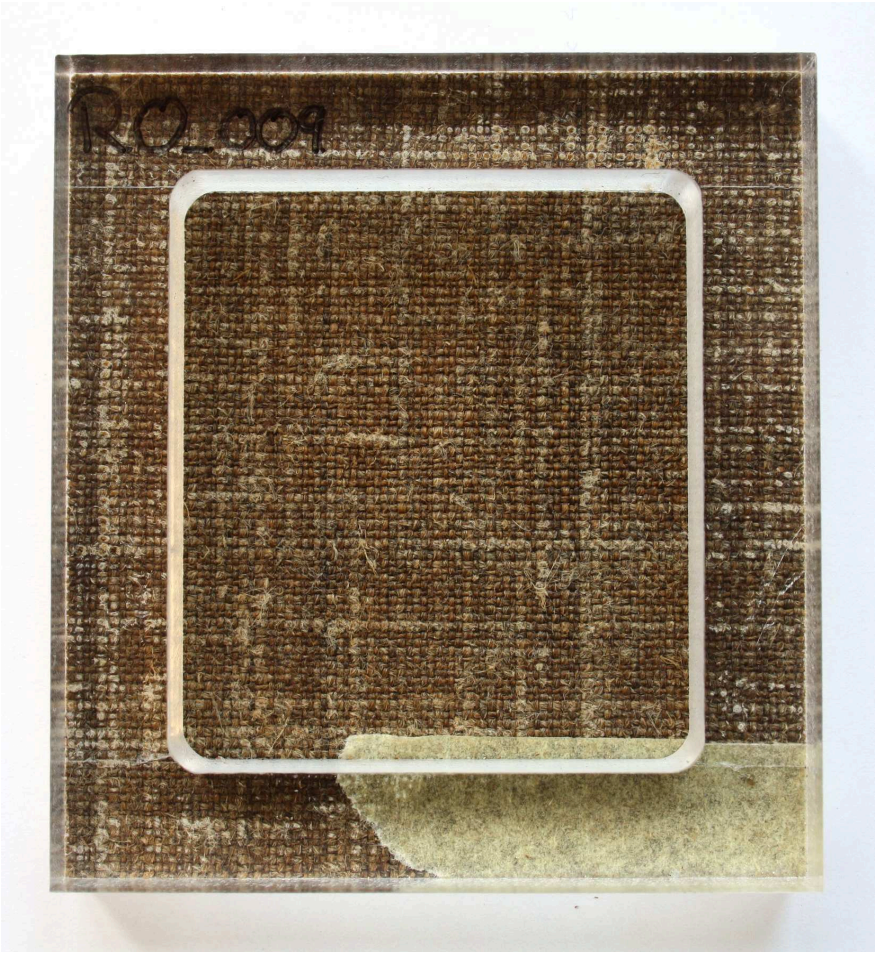
Metadaten und Messparameter

Objekt	RO_009
Benennung	Auflösung_Craquelé
Datum	10.03.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	4/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	1000
	2. Messbild	600
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	3.983.665
	Anzahl Dreiecke	7.856.618
	Oberfläche (mm^2)	4.610.188

Tab. 22| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_009', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

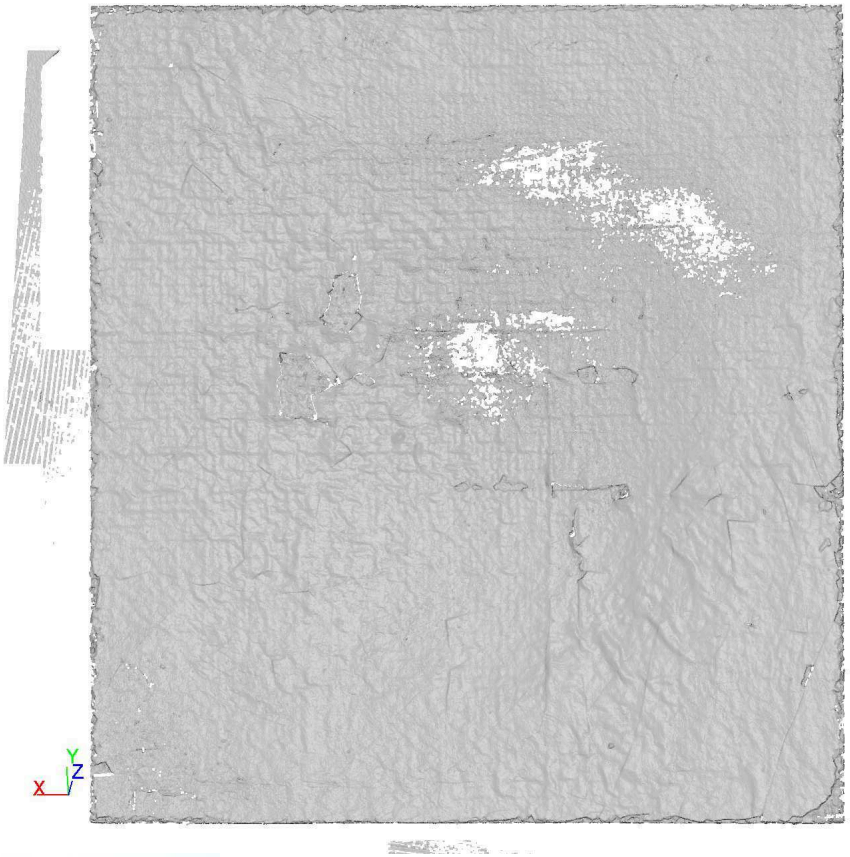


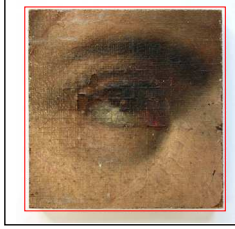


Objekt:	RO_009	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 10.03.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

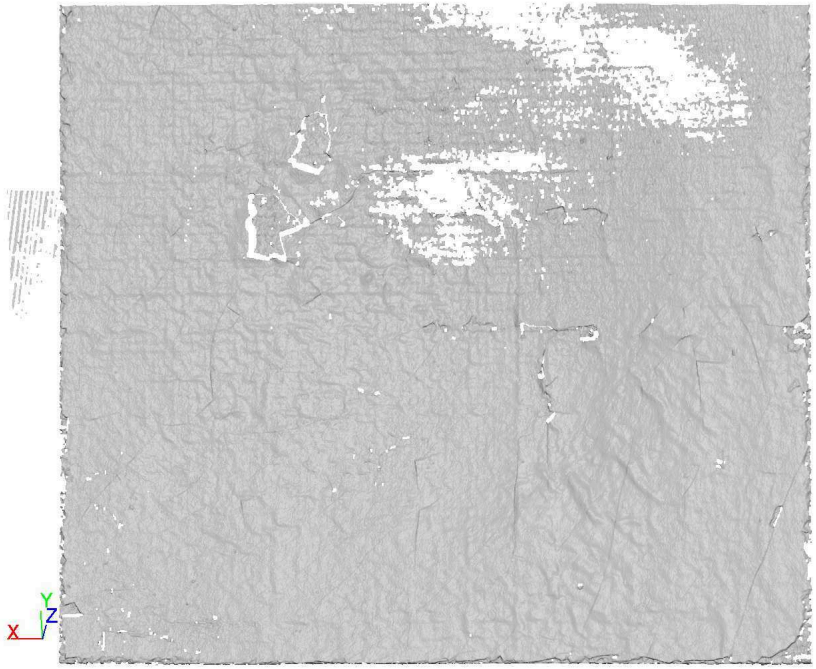
Abb. 109| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_009', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

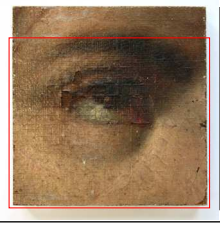
Virtuelles Modell, bestehend aus 4 gematchten Einzelaufnahmen (90°)
Dreiecksnetz





Einzelaufnahme
Punktewolke





Objekt:	RO_009	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 10.03.2014
3D_artscan		Seite 2 von 4

Abb. 110| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'RO_009', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

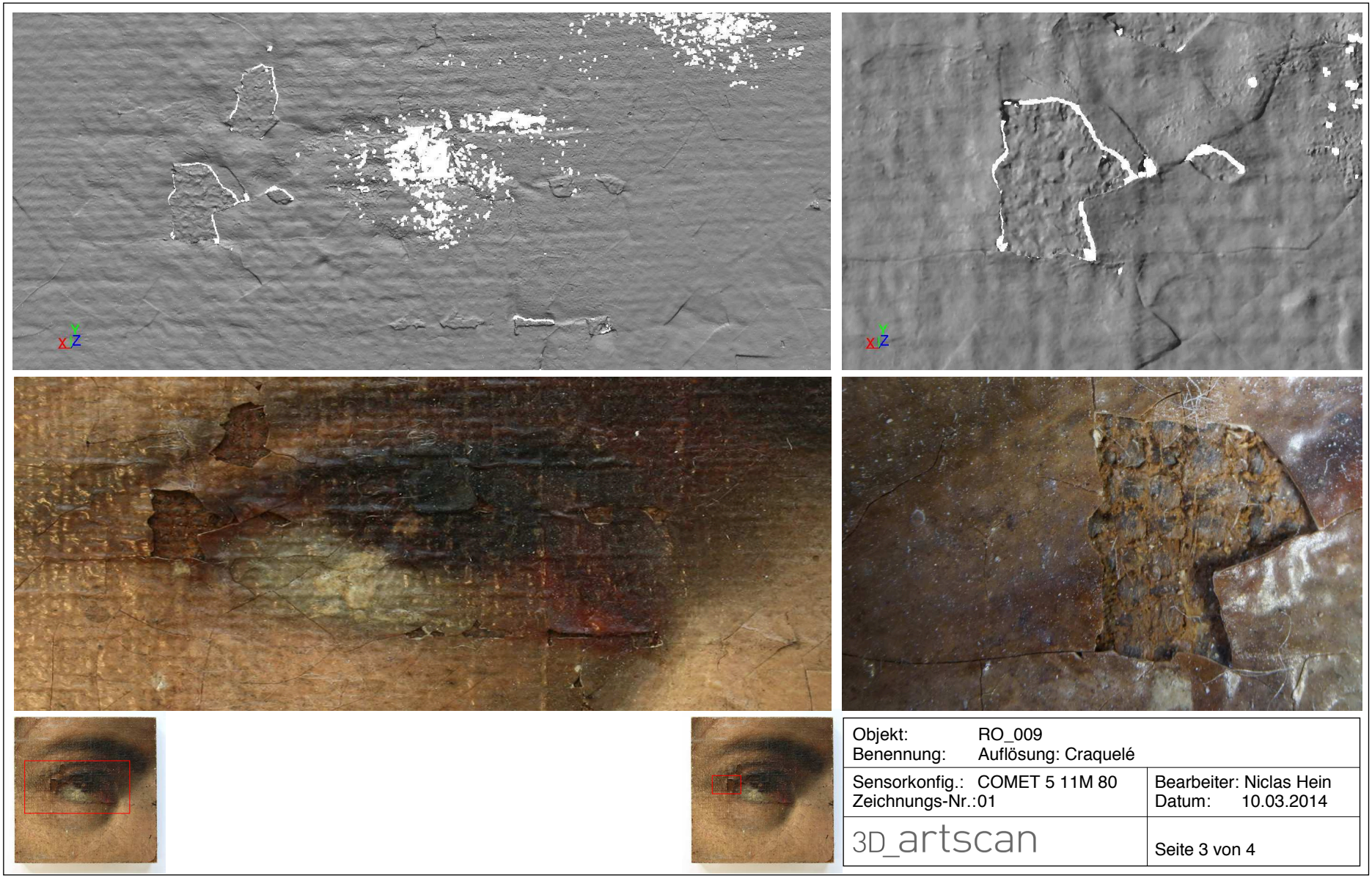
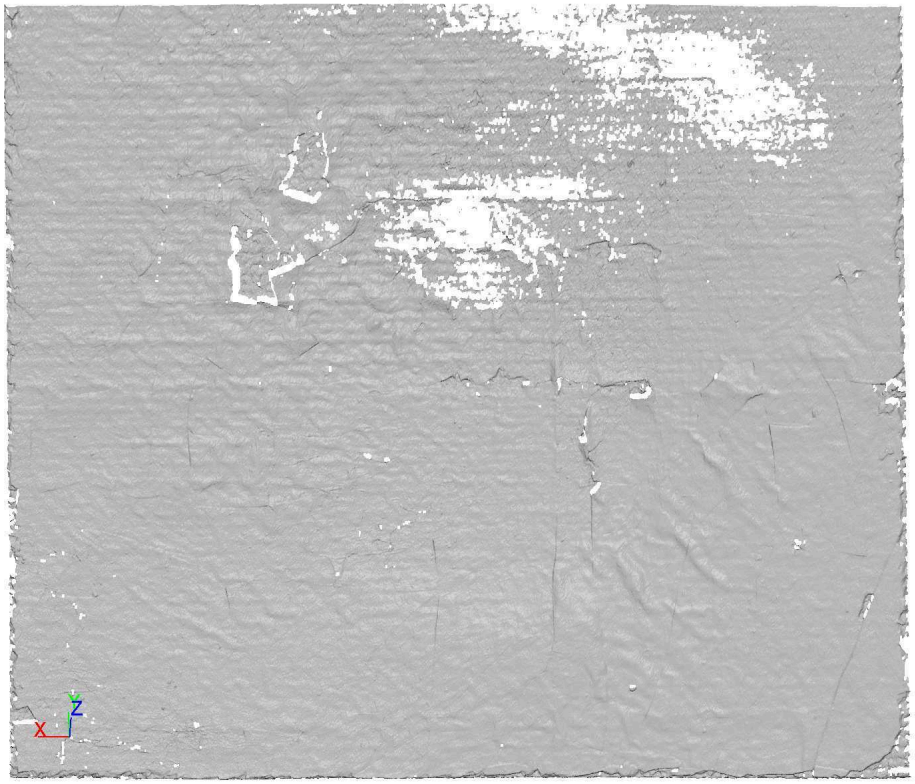


Abb. 111| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'RO_009', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

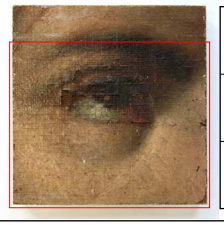
Einzelaufnahme
(Punktewolke)



Kamerabild des Sensor ohne projiziertes Streifenmuster.
(Brightimage)

Der Bildausschnitt entspricht exakt der nebenstehenden Abbildung, lediglich die Darstellung ist aufgrund des Messwinkels sperspektivisch verzerrt.





Objekt:	RO_009	
Benennung:	Auflösung: Craquelé	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 10.03.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4

Abb. 112| Wiedergabe der Protokollseite 4 von 'RO_009', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

15.2 Detektion von glänzenden Oberflächen

Datenerhebung: 'RO_Goldgrund', Versuch zur Detektion reflektierender Oberflächen

Den eigenen Vorarbeiten zufolge besteht ein weiteres Manko bei der Digitalisierung glänzender Oberflächen. Dieses soll bei einem vergoldeten Probestück überprüft werden: 'RO_Goldgrund'. Der maltechnische Aufbau des Untersuchungsgegenstandes entspricht dem einer Ikone. Neben einer mit Punzierungen und Trassierungen versehenen Goldoberfläche befinden sich matte, dunkle Blauausmischungen, sowie matt-weiße Farbaufstriche auf einer Polimentvergoldung. Die Oberfläche kennzeichnet sich folglich durch optisch sehr heterogene Eigenschaften. Im Bereich des stark spiegelnden Goldes werden Messlücken erwartet. Zielsetzung ist eine möglichst vollständige Digitalisierung. Dementsprechend wird eine Vielzahl von Einzelaufnahmen, aus unterschiedlichen Sensorpositionen heraus erzeugt.



Abb. 113| Fragment eines römischen Schuppenpanzers (Brustschließblech). Datiert in das 2./3. Jahrhundert n. Chr..
Quelle: Janet Schramm

Auswertung: 'RO_Goldgrund', Versuch zur Detektion reflektierender Oberflächen

Auch bei diesem Versuch sind die Ergebnisse in einem Protokoll zusammengefasst (►Abb. 115| - Abb. 118|).

Ergebnis: 'RO_Goldgrund', Versuch zur Detektion reflektierender Oberflächen

Die erwartete Unvollständigkeit der Daten muss bestätigt werden. Aufgrund der Reflexionen ist die Digitalisierung vergleichsweise schwierig, was sich bereits bei der Datenerhebung offenbart. Während derselben zeigte sich, dass durch wiederholende Messungen bei veränderten Messwinkeln eine Steigerung der Vollständigkeit erwirkt werden kann. Auf der zweiten Protokollseite belegen die ersichtlichen Messpunkt-Kanten (►Abb. 116| a), von den Grenzen des Messvolumens und verschiedener Sensorpositionen herrührend, dass es günstige und ungünstigere Messwinkel gibt. Letzteres drückt sich in der Dichte vorhandener Messpunkte aus. Abermals ist dieses eine Bestätigung dafür, mehrere Messungen aus unterschiedlichen Blickwinkeln heraus vorzunehmen. Zum Nachweis der Korrelation von Oberflächenglanz und Messlücken wird auf die zweiten Seite des Messprotokolls verwiesen. Der Bereich mit den Punzierungen und Trassierungen ist allerdings beinahe vollständig. Dies überrascht, da erwartet wurde, dass der goldenen Bereich gänzlich nicht digitalisiert werden kann. Damit beweist sich die prinzipielle Eignung der Untersuchungsmethode bei der Erforschung von Werkspuren.[489] Weiter wird anhand der dritten Protokollseite und der dort gezeigten Abbildungen, erneut der Zusammenhang zwischen dunkler Farbe und einhergehenden Messlücken aufgezeigt. Ein dunkelblauer, beinahe schwärzlicher Farbaufstrich ist nicht vollständig zu digitalisieren (►Abb. 117| b).

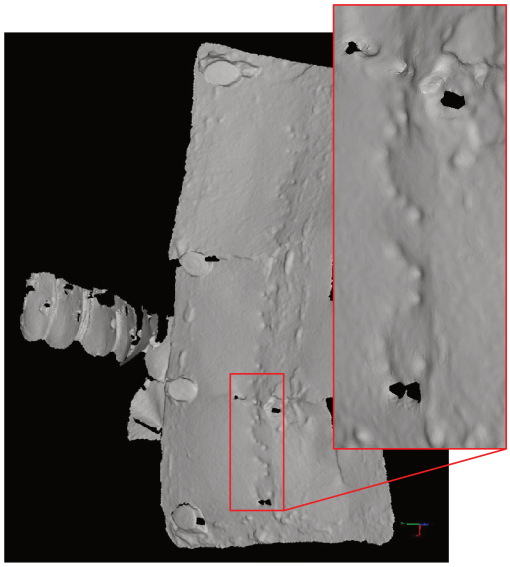


Abb. 114| 3D-Scan des oben gezeigten Objektes zur Visualisierung von Punzierungen.
Quelle: Selbst

[489] Ein exemplarischer Versuch wurde hierzu an einem archäologischem Objekt vorgenommen. Das Grabungsstück, der Teil eines römischen Schuppenpanzers (Brustschließblech) weist eine punzierter Besitzerinschrift auf, die über die 3D-Digitalisierung erfolgreich visualisiert werden konnte. Fundort: Baumgarten an der March, Niederösterreich, Datierung: 2./3. Jahrhundert n. Chr. (►Abb. 113| und Abb. 114|).

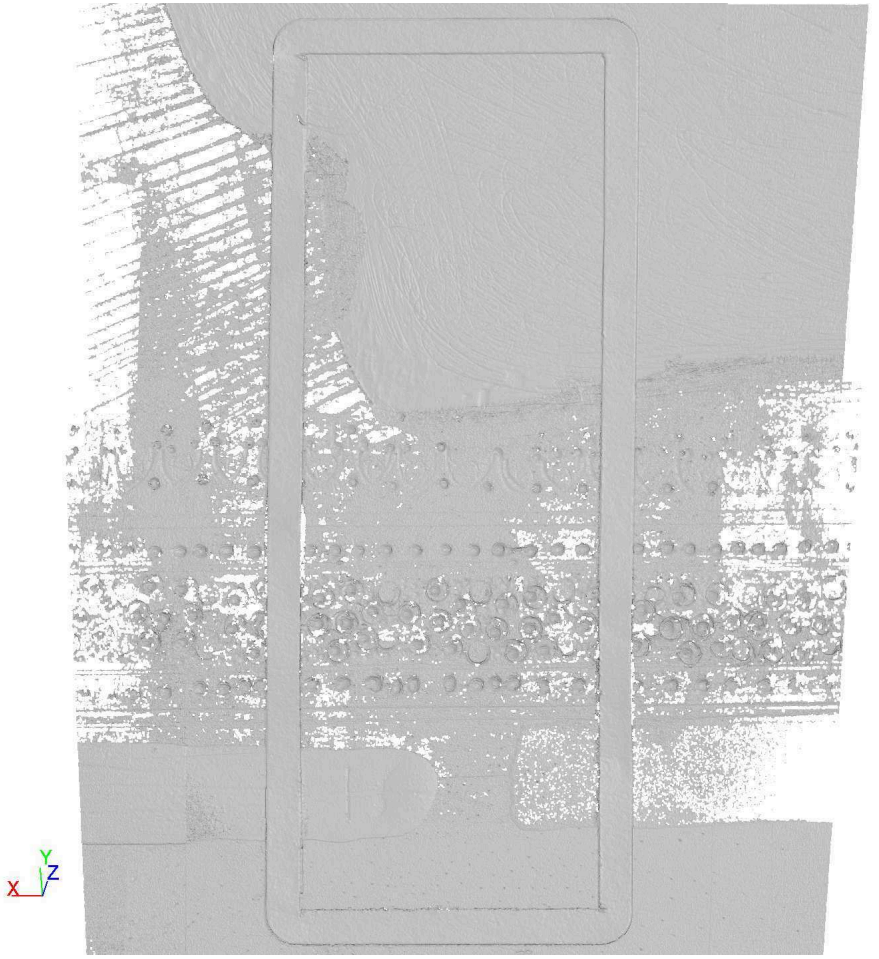
Metadaten und Messparameter

Objekt	RO_Goldgrund
Benennung	Refl. u. Absorp. Oberfläche
Datum	13.03.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	6/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	3 Stufen
	1. Messbild	1000
	2. Messbild	700
	3. Messbild	350
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	6.454.359
	Anzahl Dreiecke	12.560.361
	Oberfläche (mm^2)	6.573.123

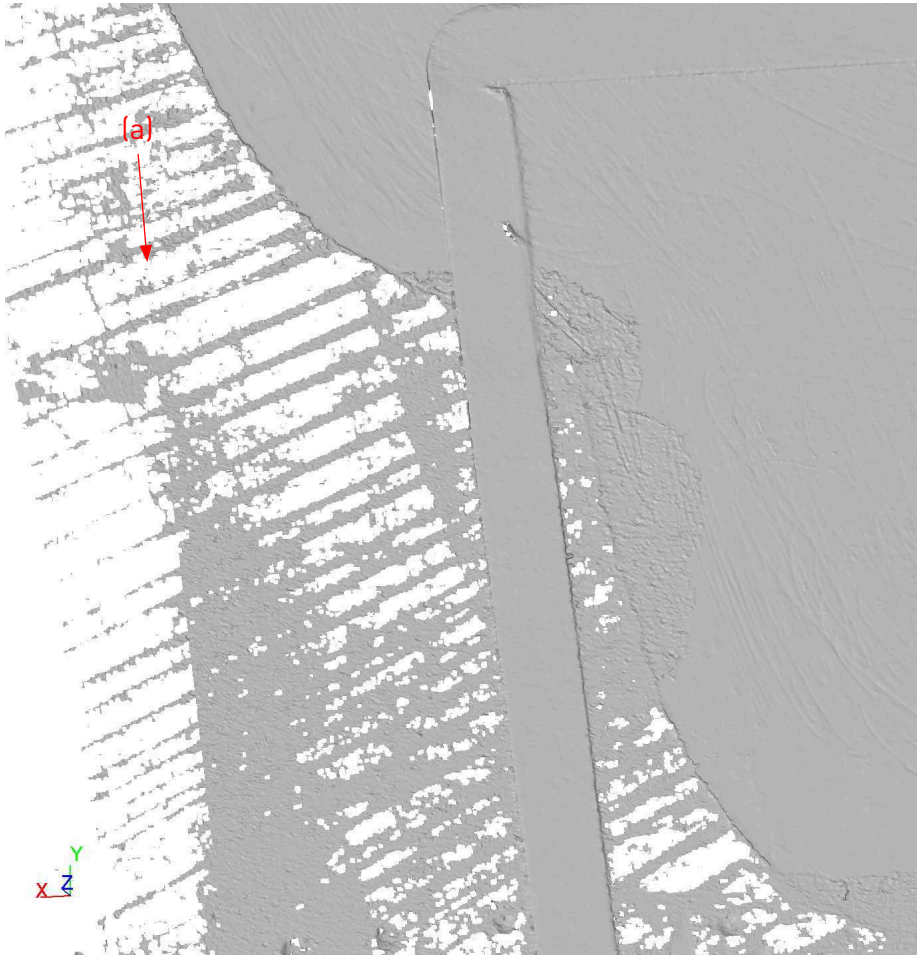
Tab. 23| Metadaten zur Datenerhebung von 'RO_Goldgrund', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

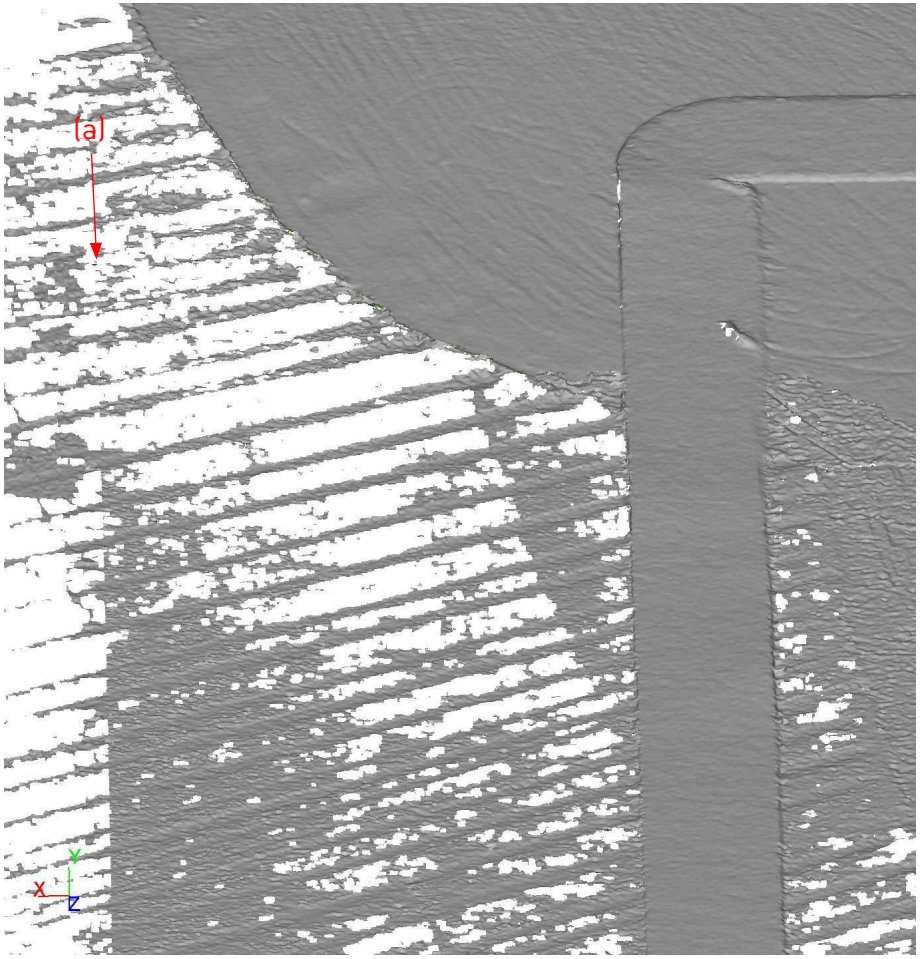


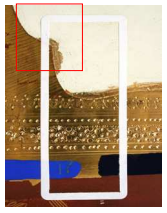


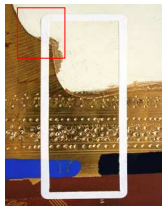
Objekt:	RO_Goldgrund	
Benennung:	Reflexion und Absorption Goldoberfläche	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.03.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

Abb. 115| Wiedergabe der Protokollseite 1 von 'RO_Goldgrund', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst



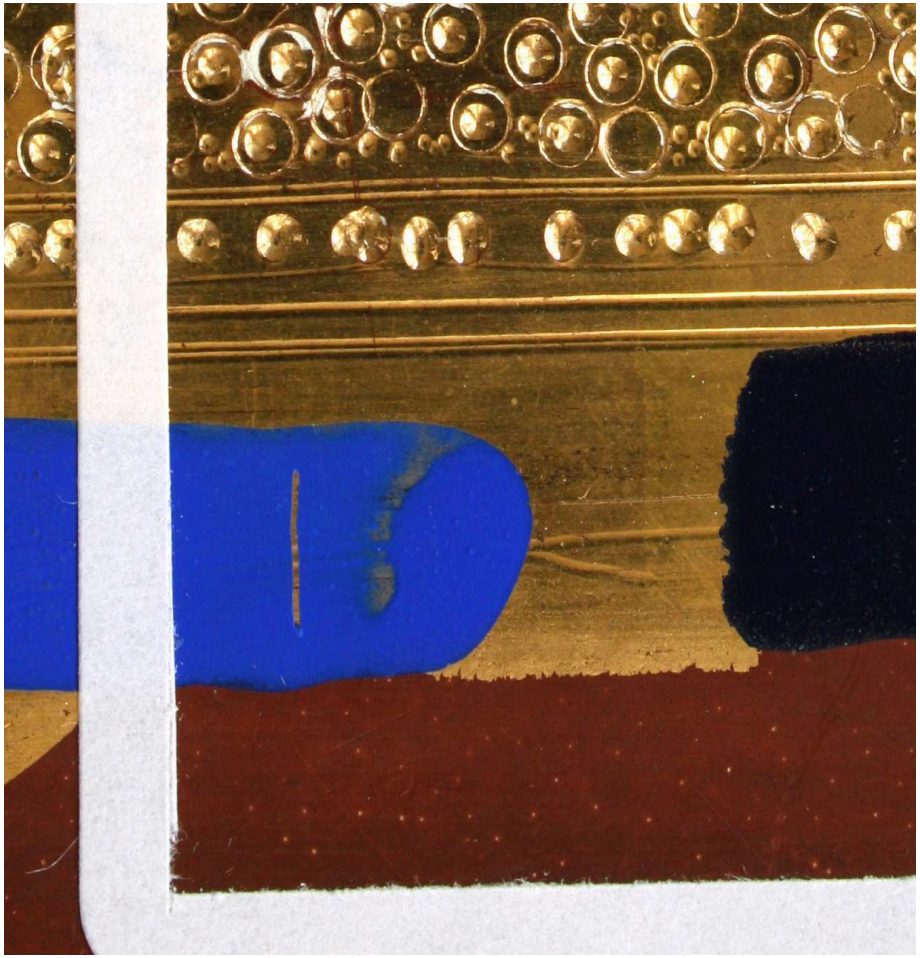


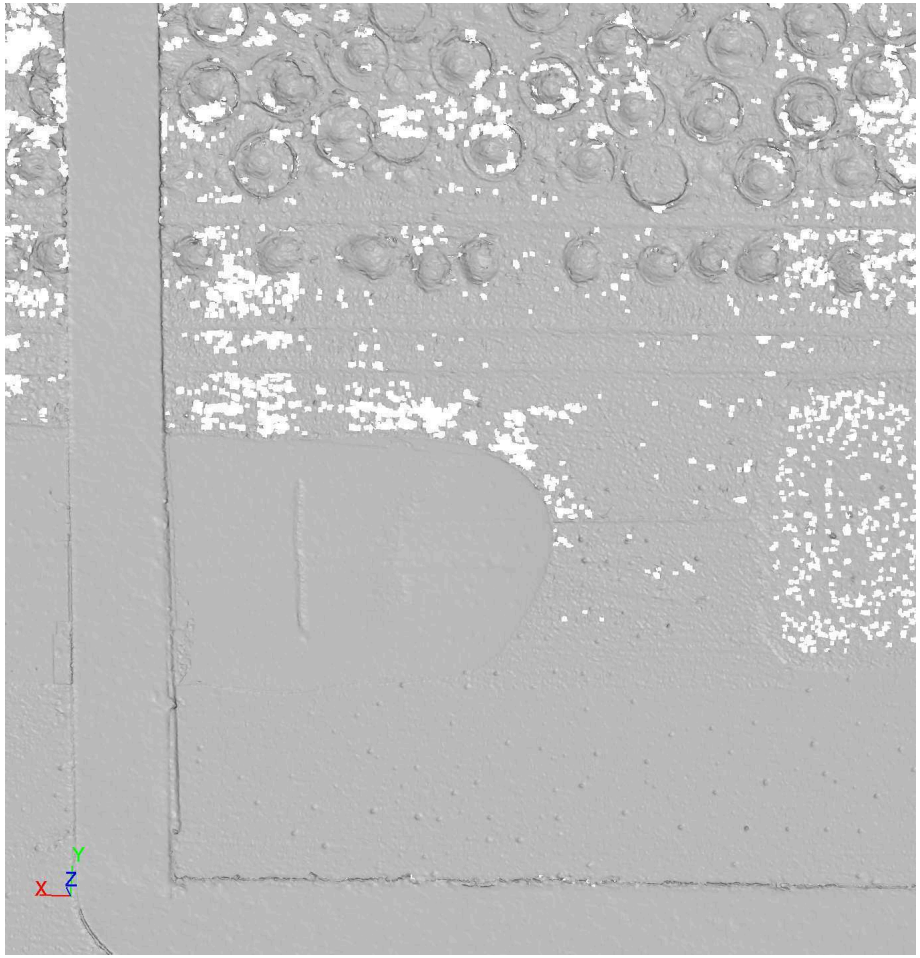


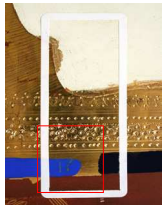


Objekt:	RO_Goldgrund		
Benennung:	Reflexion und Absorption Goldoberfläche		
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	13.03.2014
3D_artscan		Seite 2 von 4	

Abb. 116| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'RO_Goldgrund', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst







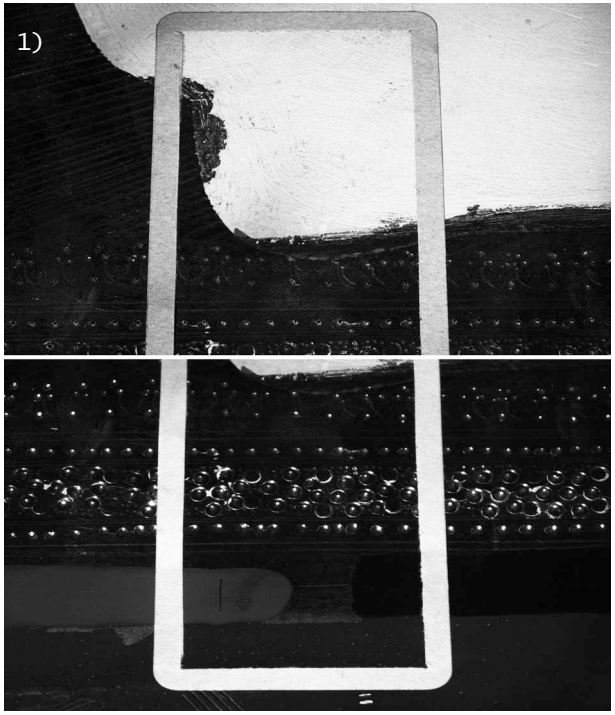
Objekt:	RO_Goldgrund		
Benennung:	Reflexion und Absorption Goldoberfläche		
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	13.03.2014
3D_artscan		Seite 3 von 4	

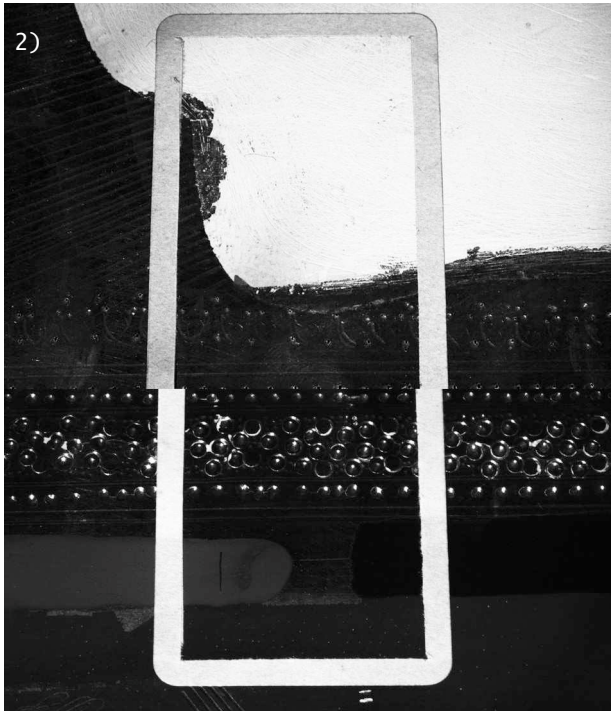
Abb. 117| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'RO_Goldgrund', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

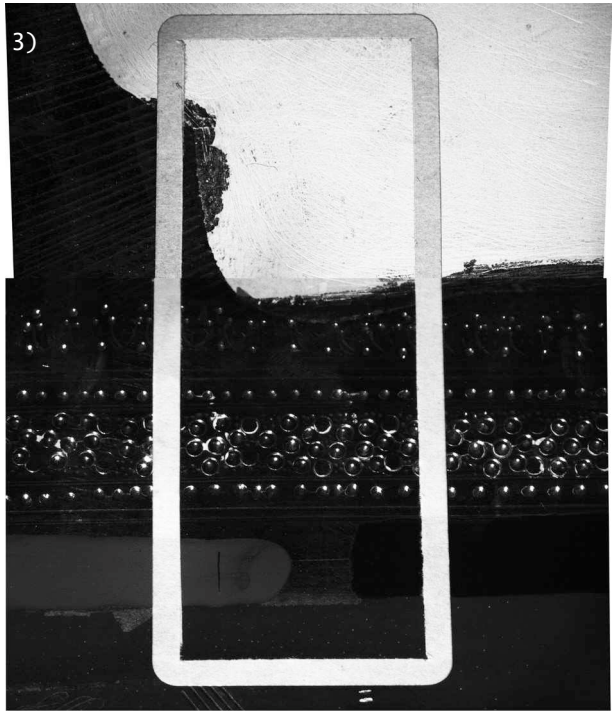
Graustufen-Kamerabilder der zwei Einzelaufnahmen. Der Sensor wurde für die beiden Aufnahmen lediglich mittels des Stativ-Auslegers über das Messobjekt geschoben. Der Messwinkel ist daher bei beiden Aufnahmen der selbe.

Die beiden nebenstehenden Aufnahmen sind in einem Bildbearbeitungsprogram zu einer gemeinsamen Aufnahme verbunden worden, wobei der Versatz aufgrund der perspektivischen Verzerrung weiterhin besteht.

Die beiden Einzelaufnahmen sind in einem Bildbearbeitungprogramm entzerrt und zu einer gemeinsamen Aufnahme transformiertworden.







Objekt:	RO_Goldgrund	
Benennung:	Reflexion und Absorption Goldoberfläche	
Sensorkonfig.:	COMET 5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.03.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4

Abb. 118| Wiedergabe der Protokollseite 4 von 'RO_Goldgrund', 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

15.3 Detektion von dunklen Oberflächen

Datenerhebung: 'Gemälde: Wessenberg', Versuch zur Detektion dunkler Oberflächen

Aus den eben vorgenommenen Versuchen ergibt sich eine bis dato nicht bekannte Verfahrenseinschränkung: Messlücken in Korrelation mit dunklen Farben. Diese Einschränkung wird als gravierend bewertet, da sich hierdurch die Einsatzmöglichkeit des Streifenprojektionsscanners maßgeblich limitiert, bzw. die zur Untersuchung geeignete Objektgruppe. Da es eine Vielzahl dunkler Gemälde gibt, wird zur Abschätzung der Tragweite ein besonders dunkles Gemälde digitalisiert. Es handelt sich um ein männliches Brustportrait des 19. Jahrhunderts, gemalt auf einem textilen Bildträger (►Abb. 119|). Der Untersuchungsgegenstand wird aufgrund seiner sehr dunklen Farbe, dem Format (46,2 x 59,4 cm) und einem ausgeprägten und dennoch feinem Craquelé gewählt. Beide Sensorvarianten sollen an diesem Objekt erprobt werden. Für das hochauflösende Messvolumen wird ein Objektausschnitt gewählt der sowohl das helle Inkarnat, als auch die schwarze Jacke der portraitierten Person repräsentiert. Hiervon werden sechs übereinander liegende Aufnahmen erstellt. Mit 'COMET 5 11M 1000' gelingt die Digitalisierung bereits über eine Aufnahme, wobei zur Überprüfung der Komplettierung drei weitere aus unterschiedlichen Messwinkeln vorgenommen werden.

Auswertung: 'Gemälde: Wessenberg', Versuch zur Detektion dunkler Oberflächen

Die Auswertung der Daten erfolgt rein qualitativ anhand der Bildgebung. Sie sind nach bekanntem Muster zu einem Protokoll zusammengefasst (►Abb. 119| - Abb. 122|).

Ergebnis: 'Gemälde: Wessenberg', Versuch zur Detektion dunkler Oberflächen

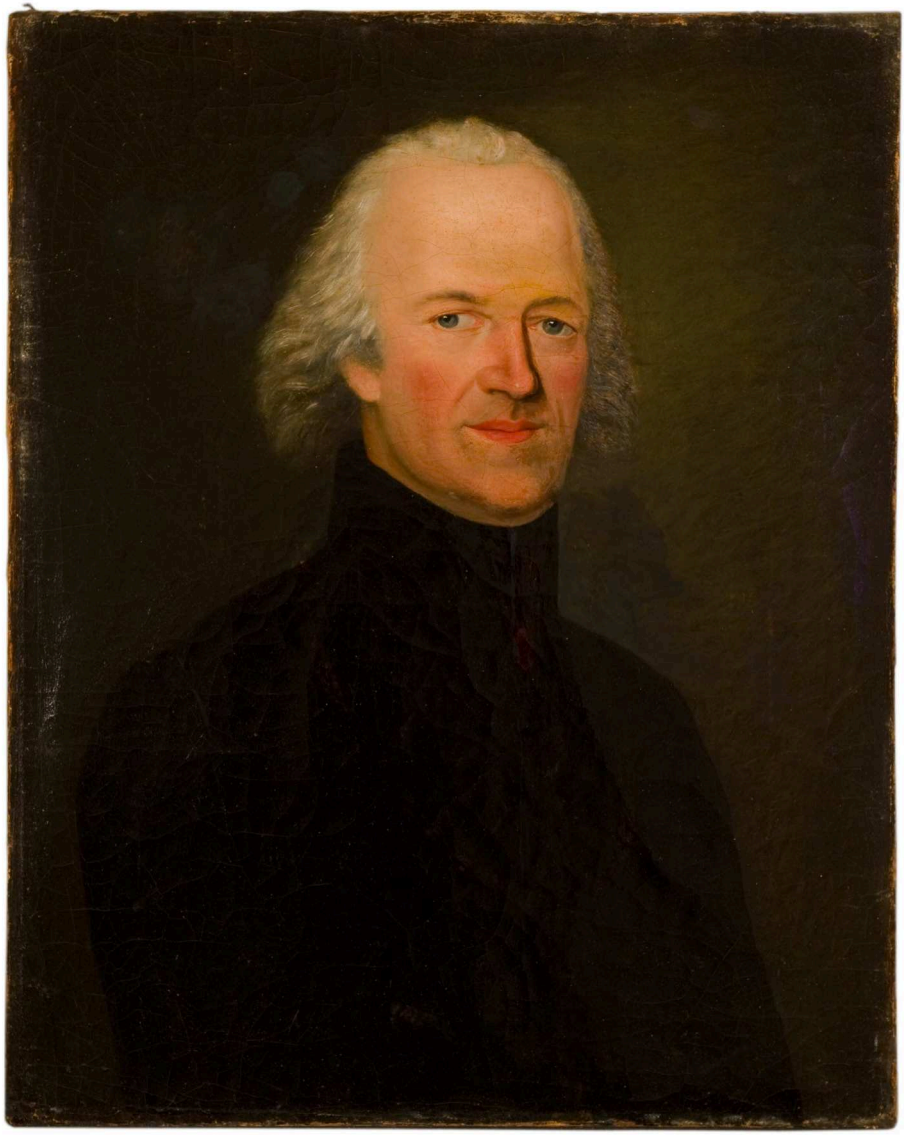
Dem Ergebnis nach weisen beide Digitalisate Messlücken auf. Wie erwartet, korrelieren diese mit der Farbigkeit des Gemäldes. Sehr dunkle Partien werden nicht digitalisiert. Auffällig ist jedoch für 'COMET 5 11M 1000', dass der dunkelgrüne Hintergrund, der vor Versuchsbeginn als verfahrensunkooperativ eingeschätzt wurde, beinahe vollständig digitalisiert wurde. Anders verhält es sich hingegen mit dem schwarzen Gewand des Portraitierten. Auf der dritten Protokollseite werden die Ergebnisse beider Sensorkonfigurationen einander gegenübergestellt. Hier zeigt sich, dass die Digitalisierung von 'COMET 5 11M 1000' vergleichsweise vollständig ist. Hingegen weist das 3D-Modell von 'COMET 5 11M 80' Unvollständigkeiten auf. Dort ist der Übergang vom hellen Inkarnat zum dunklen Kragen durch den Verlauf offenkundiger Messlücken bestimmt (►Abb. 121| a). Der Abgleich der Sensoreinstellungen offenbart für beide Digitalisierungen eine zweistufige 'Belichtungsfusion'. Gemäß der Einstellung für '1. Messbild' – entscheidend für die Detektion dunkler Objektpartien – sind beide Aufnahmen mit der maximalen Belichtungszeit erstellt worden (►Tab. 24|). Eine Verbesserung der Vollständigkeit durch längere Belichtungszeiten ist daher nicht möglich.

Ungeachtet der geschilderten Verfahrenseinschränkungen können jedoch mit beiden Sensorvarianten die Strukturen des Craquelé nach-

gewiesen werden. Aufgrund der hohen Auflösung übertrifft hier das Digitalisat von 'COMET 5 11M 80' jenes von 'COMET 5 11M 1000' an Detailgenauigkeit und Kantenschärfe.

Metadaten und Messparameter		
Objekt	Gemälde: Wessenberg	
Benennung	Kombination der Messfelder	
Datum	28.01.2014	
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000	COMET 5 11M 80
	Anzahl Messungen	4/90°	6/0° (überlappend)
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.	Freies Fl.m.
	Messwinkel	30°	30°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen		
	Messbild		
	Belichtungsfusion	2 Stufen	2 Stufen
	1. Messbild	1000	1000
	2. Messbild	500	350
	3. Messbild	-	-
	Kamerakonfiguration	HiRes	HiRes
	NCS-Mode	on	on
	Experteneinstellungen		
	Qualität	HighQuality	HighQuality
	Streifenqualität	10	10
	Gradient X	70,00	70,00
	Gradient Y	70,00	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)		
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200	0,0018
	Max. Kantenlänge der Dreiecke (mm)	1,0000	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	1.149.273	9.570.478
	Anzahl Dreiecke	2.190.772	18.942.552
	Oberfläche (mm^2)	244.137.393	9.597.149

Tab. 24| Metadaten zur Datenerhebung von 'Gemälde: Wessenberg', 'COMET 5 11M 1000' und 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

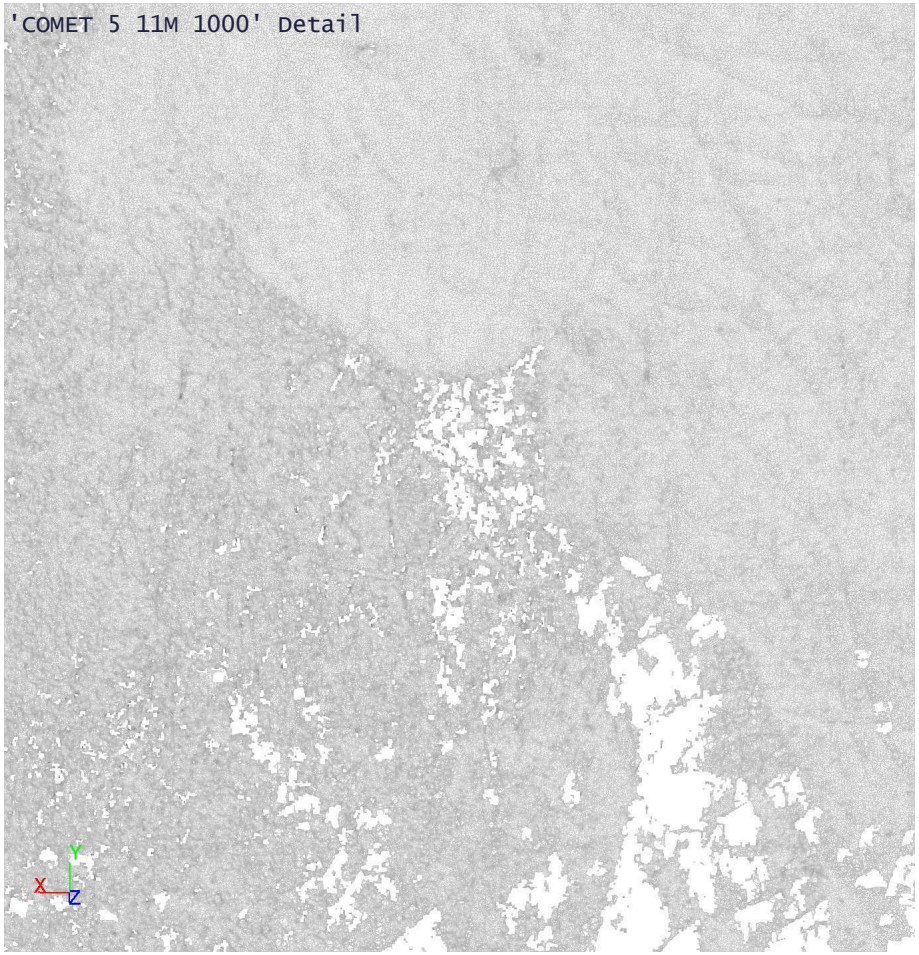


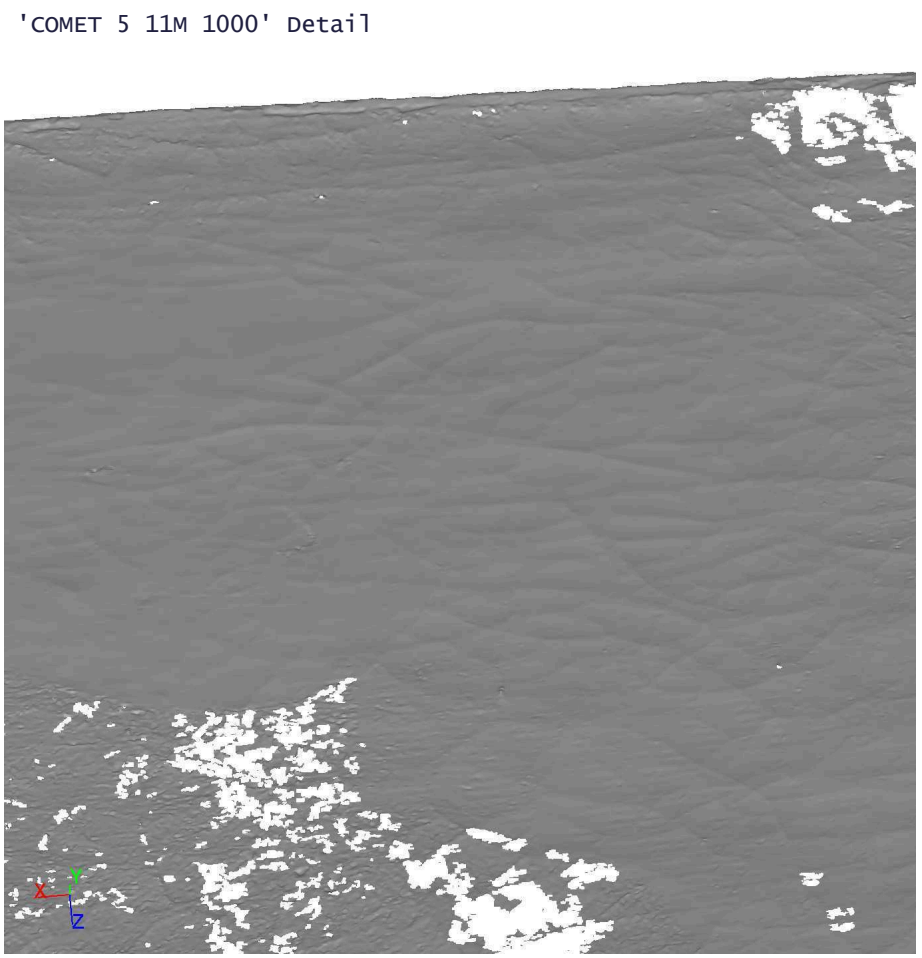
'COMET 5 11M 1000'

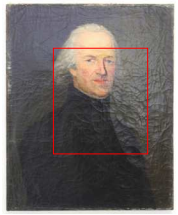


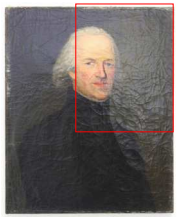
Objekt:	Gemälde: Wessenberg		
Benennung:	Kombination der Messfelder		
Sensorkonfig.:	Beide	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	28.01.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4	

Abb. 119| Wiedergabe der Protokollseite 1 von 'Gemälde: Wessenberg', 'COMET 5 11M 1000' und 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst









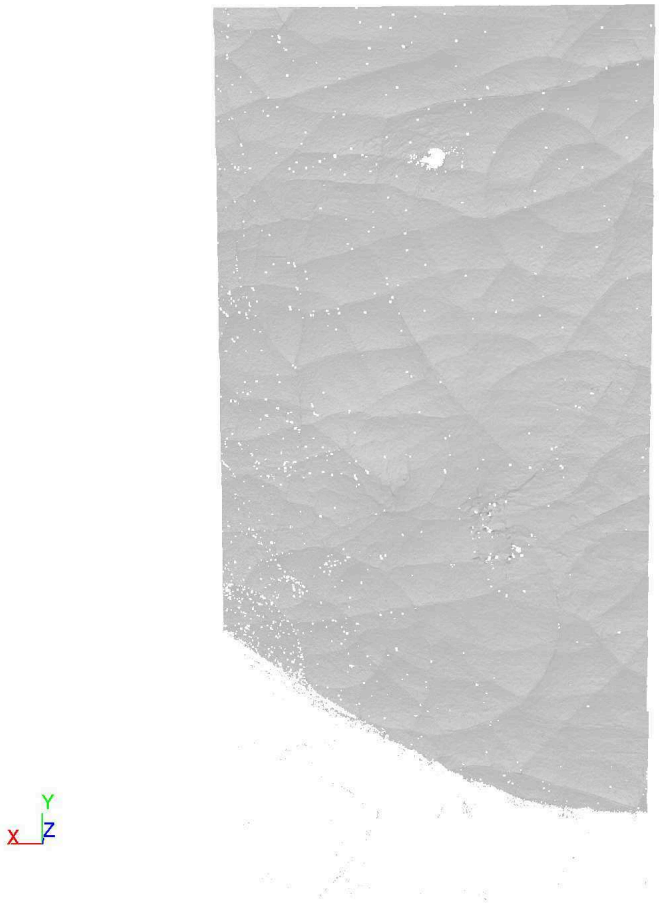
Objekt:	Gemälde: Wessenberg		
Benennung:	Kombination der Messfelder		
Sensorkonfig.:	Beide	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	28.01.2014
3D_artscan		Seite 2 von 4	

Abb. 120| Wiedergabe der Protokollseite 2 von 'Gemälde: Wessenberg', 'COMET 5 11M 1000' und 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

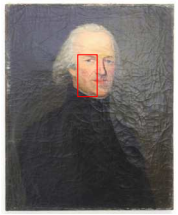
'COMET 5 11M 1000'



'COMET 5 11M 80'







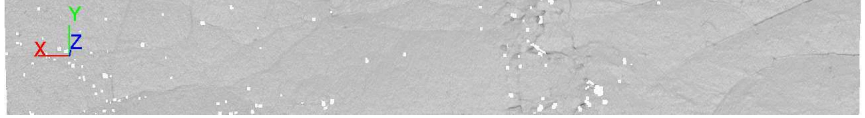
Objekt:	Gemälde: Wessenberg		
Benennung:	Kombination der Messfelder		
Sensorkonfig.:	Beide	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	28.01.2014
3D_artscan		Seite 3 von 4	

Abb. 121| Wiedergabe der Protokollseite 3 von 'Gemälde: Wessenberg', 'COMET 5 11M 1000' und 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

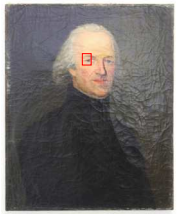
'COMET 5 11M 1000' Detail



'COMET 5 11M 80' Detail. Der Bildausschnitt entspricht dem nebenstehenden.







Objekt:	Gemälde: Wessenberg	
Benennung:	Kombination der Messfelder	
Sensorkonfig.:	Beide	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 28.01.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4

Abb. 122| Wiedergabe der Protokollseite 4 von 'Gemälde: Wessenberg', 'COMET 5 11M 1000' und 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

15.4 Kritische Bewertung zur Digitalisierung von Gemäldestrukturen

In den systematischen Versuchen gelang es, die in den eigenen Vorarbeiten identifizierten Verfahrenseinschränkungen größtenteils auszuräumen. Hervorzuheben ist hier die Bildgebung eines feinen Craquelés mit 'COMET 5 11M 80' – ebenso bedeutsam: die Quantifizierung desselben (Rissbreiten > 0,071 mm). Zugleich ist in diesem Zusammenhang einzuschränken, dass extrem feine Risse vom Sensor nicht aufgelöst werden können. Unter der Vorraussetzung eines deutlichen Kontrastes im Verhältnis von Riss zur umliegenden Malschicht ist ein hochauflösender fotografischer Nachweis überlegen.

Gleichwohl ist hinsichtlich der Auflösung eine signifikante Systemverbesserung der aktuellen Gerätegeneration zu konstatieren – was sich positiv beim Nachweis von Craquelé-Strukturen äußert. Wie gezeigt, wird diese, dem Prinzip nach, vom Auflösungsvermögen der Mikro-Streifenprojektion weitaus übertroffen. Gleichwohl bestehen bei der Mikro-Streifenprojektion Einschränkungen hinsichtlich der Größe des Messvolumens. Folgerichtig ist sie für das geplante Monitoringvorhaben ungeeignet.

Ferner zeigte sich, dass insbesondere bei verschatteten Kanten und unkooperativen Oberflächen die Vollständigkeit der Digitalisierung durch Mehrfachmessungen, bei divergierenden Sensorpositionen, zu steigern ist. Dieses gilt bspw. für Goldoberflächen, die im Unterschied zu den eigenen Vorarbeiten prinzipiell digitalisiert werden können – obgleich weiterhin Messlücken bestehen. Bisher unbekannt, kennzeichnen sich sehr dunkle Gemäldeoberflächen als verfahrensunkooperativ, was als ein eklatanter Nachteil zu bewerten ist (►Kapitel 16|).

16. Methodische Ansätze zur Optimierung des Untersuchungsverfahrens

Aufgrund der benannten Einschränkungen werden verschiedene Lösungsansätze verfolgt, um eine entsprechende Verfahrensverbesserung zu erwirken.

1. Lösungsansatz

In einer ersten Überlegung wird die Verlängerung der Belichtungszeit in Betracht gezogen. In Rücksprache mit dem Gerätehersteller wird diese Variante jedoch kategorisch ausgeschlossen. Schon während der 'Belichtungseinstellung' des Sensors mit dem Maximalwert von einer Sekunde – 'Messbild': 1000 – dauert eine komplette Bildsequenz bereits 45 Sekunden. Während dieser Zeit müssen Objektbewegungen ausgeschlossen sein. Gleichermaßen weist besonders die hochauflösende Sensorvariante eine Anfälligkeit gegenüber Schwankungen der Umgebungshelligkeit auf. Geringste Veränderungen im Labor, bspw. durch Bewegungen, führen bereits zu systeminduzierten Messabbrüchen.

2. Lösungsansatz

Die zweite Variante sieht vor, den Verstärkungsfaktor des Kamerasignals anzuheben und damit ihre Empfindlichkeit zu steigern.[490] Im Zuge dessen wird die messfeldspezifische Initialisierungsdatei durch eine vom Entwickler der Firma 'Steinbichler' modifizierte Datei ersetzt und in das System implementiert.[491] Im Anschluss daran wird die Kalibrierung des Sensors mit erhöhter Verstärkung des Kamerasignals vorgenommen. Als Untersuchungsobjekt dient abermals 'RO_002'. Im zugehörigen Messprotokoll (►Abb. 123| - Abb. 125|) ist eine Aufnahme im Standardmodus (linke Protokollseite) und eine Aufnahme mit erhöhter Kamerasensitivität (rechte Protokollseite) einander gegenüber gestellt. Letztere offenbart jedoch eine signifikante Zunahme des Bildrauschens. So ist die vormals glatte Firnisoberfläche deutlich rauer (a). Auch die Kanten des Craquelé weisen leichte Zacken auf (b). Zudem haben sich bei dem Riss im maskierten Bereich die Details deutlich reduziert (c).[492] Aus genannten Gründen wird dieser Lösungsansatz daher verworfen.

490 Vergleiche: Fasser (Fa. Steinbichler), 2014

491 Die Datei: ‚AC_M655_COMET_5_11Ma_80mm_gain.ini'

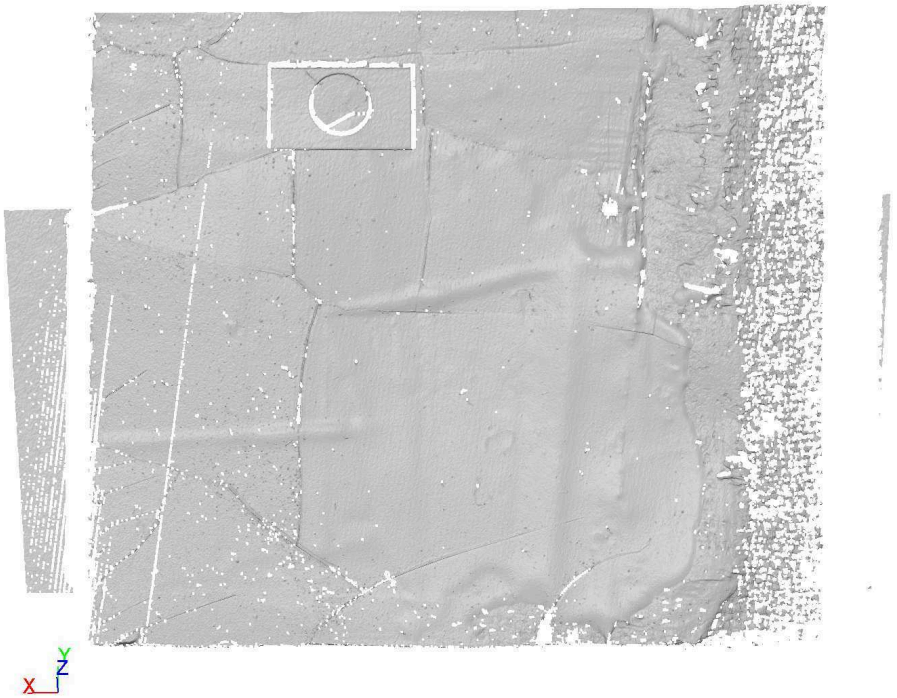
492 Bei den vergleichenden Messungen blieb sowohl die Probenposition unverändert als auch die Beleuchtungsgeometrie sowie die ‚Viewer-Darstellung'. Die Ergebnisse sind somit vergleichbar.

Metadaten und Messparameter		
Objekt	RO_002	
Benennung	Vergleich: Gain_norm	Gain_verstärkt
Datum	16.02.2014	
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80	

	Anzahl Messungen	1	1
	Matchingstrategie	ohne	ohne
	Messwinkel	60°	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen		
	Messbild		
	Belichtungsfusion	2 Stufen	2 Stufen
	1. Messbild	350	350
	2. Messbild	560	560
	3. Messbild	-	-
	Kamerakonfiguration	HiRes	HiRes
	NCS-Mode	off	off
	Experteneinstellungen		
	Qualität	HighQuality	HighQuality
	Streifenqualität	10	10
	Gradient X	70,00	70,00
	Gradient Y	70,00	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)		
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	2.552.241	2.347.607
	Anzahl Dreiecke	4.954.469	4.543.417
	Oberfläche (mm^2)	3.498.882	3.528.770

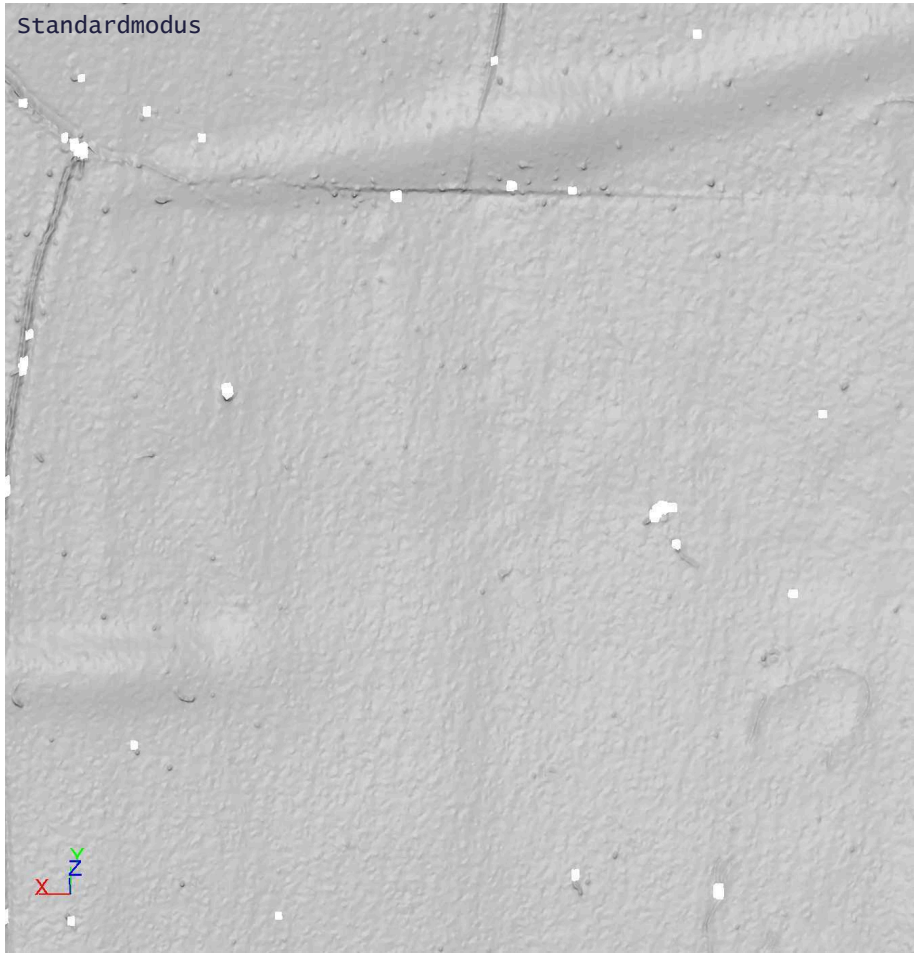
Tab. 25| Metadaten der Messung ohne und mit Verstärkungsfaktor (Gain).
Quelle: Selbst

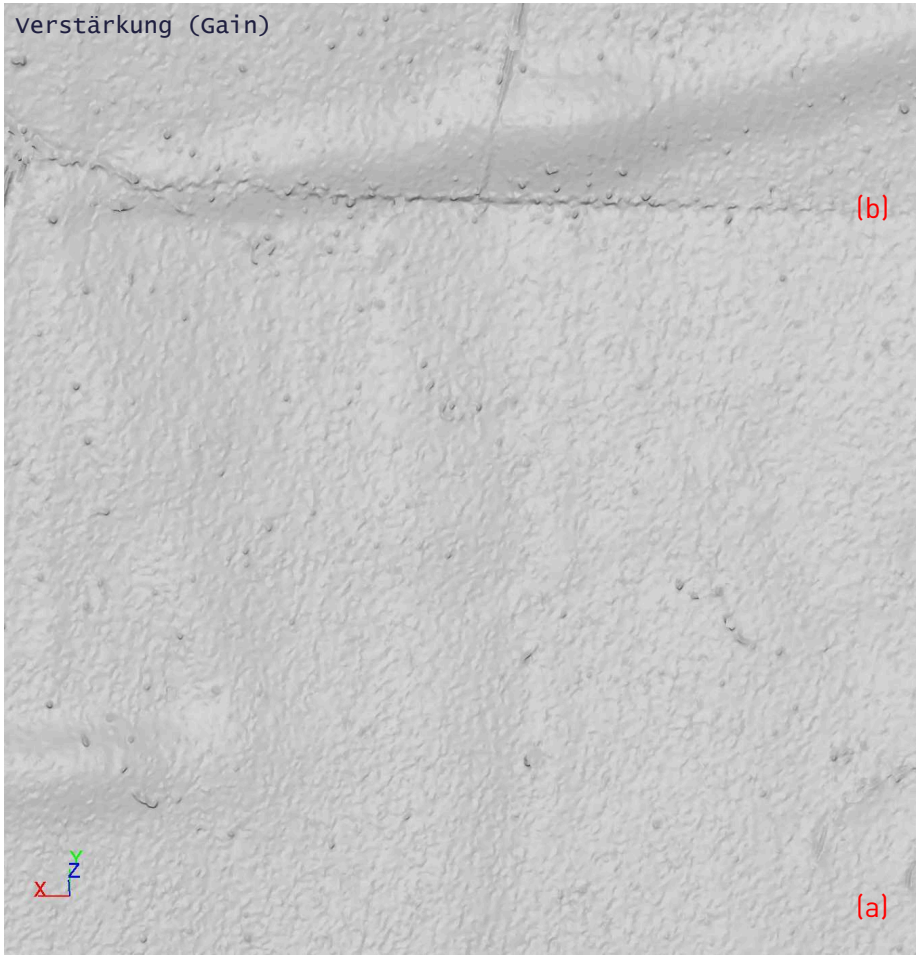


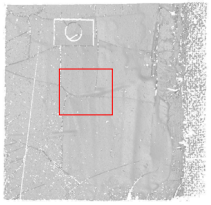


Objekt:	RO_022	
Benennung:	Vergleich: Messbild_norm / Messbild_gain	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 16.02.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

Abb. 123| Wiedergabe der Protokollseite 1 zur Gegenüberstellung der Digitalisierung des Realobjektes 'RO_002' im Standardmodus und mit erhöhter Verstärkung des Kamerasignals.
Quelle: Selbst

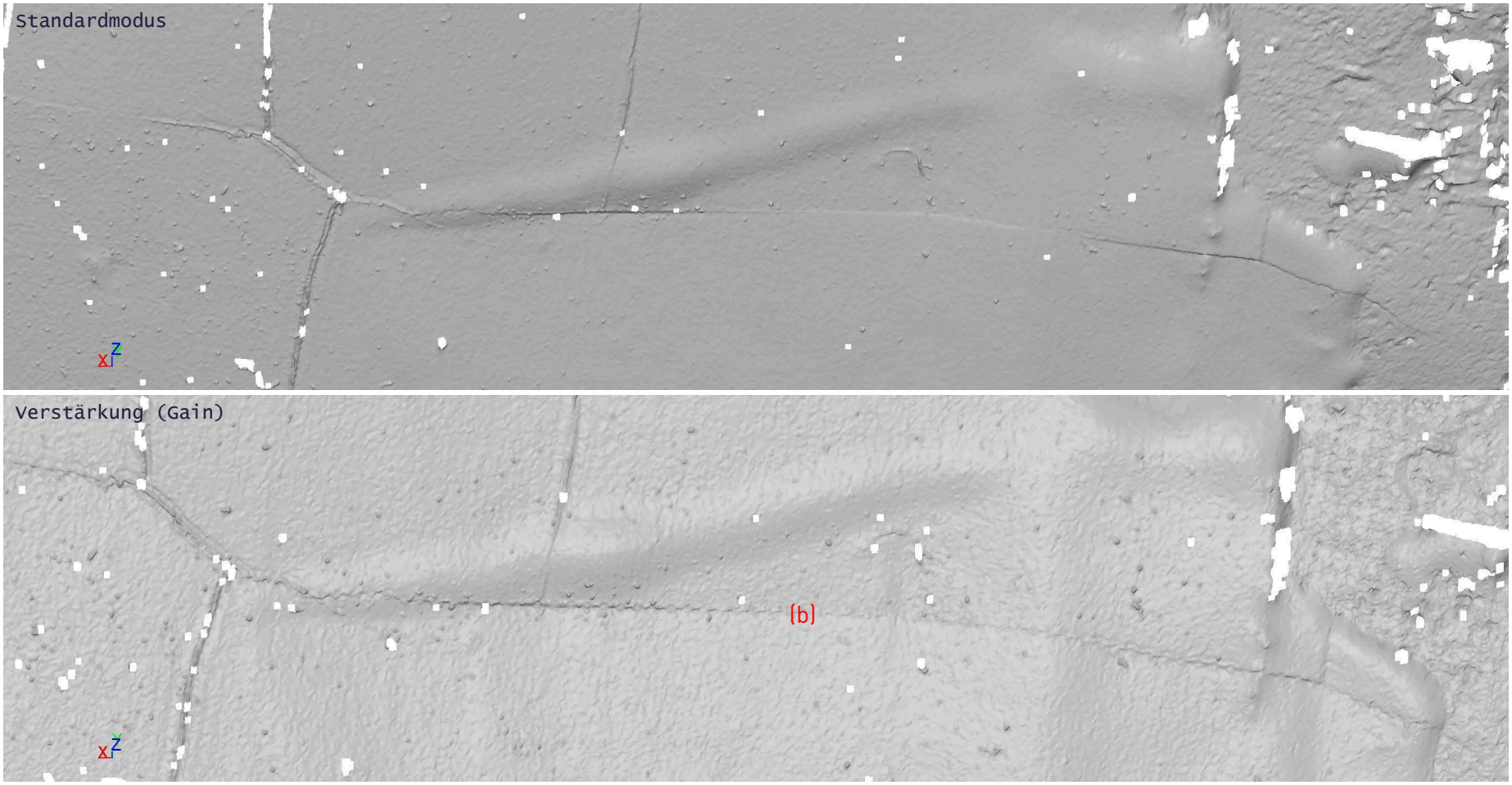


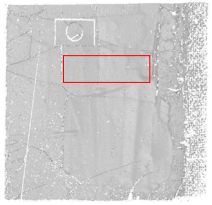




Objekt:	RO_022	
Benennung:	Vergleich: Messbild_norm / Messbild_gain	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 16.02.2014
3D_artscan		Seite 2 von 4

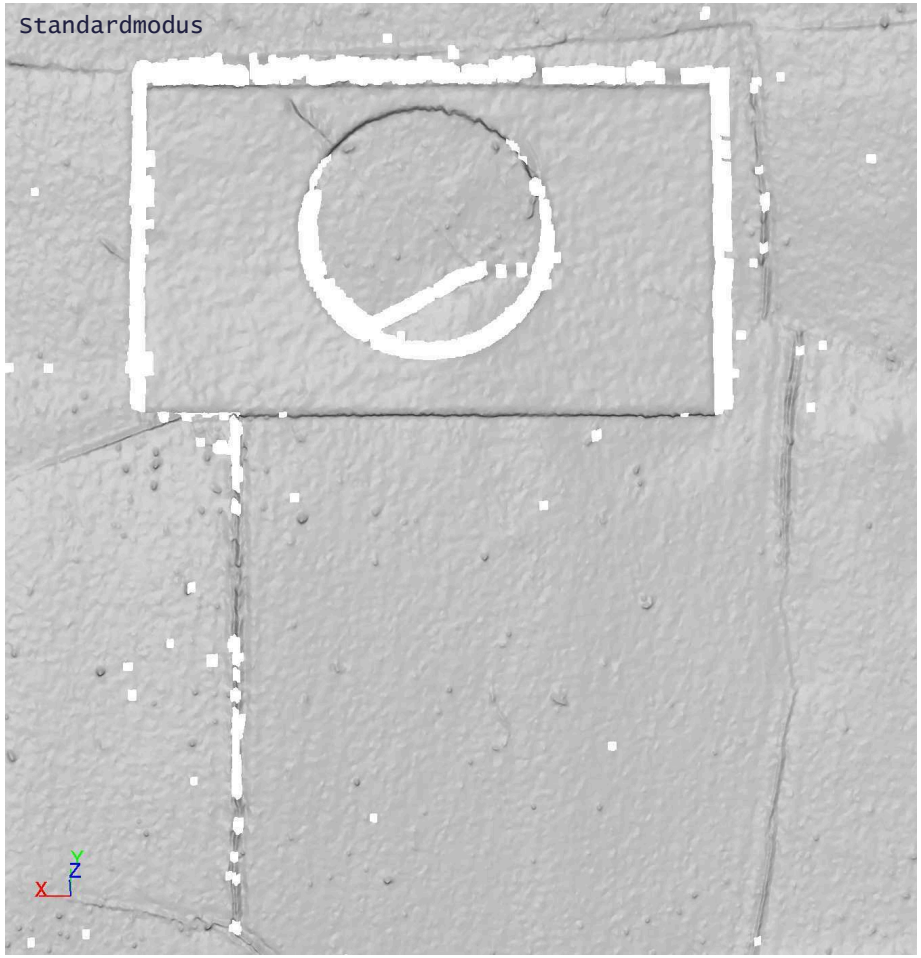
Tab. 26| Wiedergabe der Protokollseite 2 zur Gegenüberstellung der Digitalisierung des Realobjektes 'RO_002' im Standardmodus und mit erhöhter Verstärkung des Kamerasignals.
Quelle: Selbst



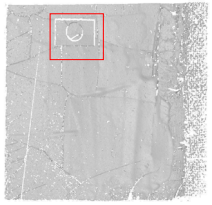


Objekt:	RO_022	
Benennung:	Vergleich: Messbild_norm / Messbild_gain	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 16.02.2014
3D_artscan		Seite 3 von 4

Abb. 124| Wiedergabe der Protokollseite 3 zur Gegenüberstellung der Digitalisierung des Realobjektes 'RO_002' im Standardmodus und mit erhöhter Verstärkung des Kamerasignals.
Quelle: Selbst







Objekt:	RO_022		
Benennung:	Vergleich: Messbild_norm / Messbild_gain		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	16.02.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4	

Abb. 125| Wiedergabe der Protokollseite 4 zur Gegenüberstellung der Digitalisierung des Realobjektes 'RO_002' im Standardmodus und mit erhöhter Verstärkung des Kamerasignals.
Quelle: Selbs

3. Lösungsansatz

Weiter wird ein dritter, vielversprechender Lösungsweg aufgezeigt. Alle bisher durchgeführten Versuche gewähren letztlich den Rückschluss, dass es Objektmerkmale gibt die sich, bei vorhandener Einschränkung der Streifenprojektion, jedoch anschaulich über fotografische Verfahren darstellen lassen. Im Kern zählt hierzu allen voran die Farbigkeit des Untersuchungsgegenstandes, aber auch Strukturmerkmale. Letztere befinden sich dann, wie oben gezeigt, in transparenten Schichten oder sind unterhalb der Auflösungsgrenze des verwendeten Sensors. Zugleich sind die Verfahrensnachteile der Fotografie offenkundig: Der zentralste Verfahrensnachteil ergibt sich durch den ausschließlich zweidimensionalen Informationsgehalt. Demgegenüber steht die Streifenprojektion als hochpräzises, dreidimensionales Nachweisverfahren über Oberflächenstrukturen. Eine Kombination der Vorteile beider Verfahren ist somit naheliegend. So könnten theoretisch Messlücken im 3D-Modell durch kombinierte 2D-Informationen ausgeglichen werden. Das Aufeinanderabbilden von Datenelementen aus zwei verschiedenen Datenmodellen ist, hinsichtlich der eingangs formulierten Bedingung an die Detailgenauigkeit, jedoch nicht trivial. Die Herausforderung besteht hierbei in der exakten Ausrichtung korrespondierender Merkmale beider Aufnahmen, sowie das Texturieren des Oberflächenreliefs. Letzteres bezieht sich auf jegliche Strukturen entlang der Kameraachse. Da diese dreidimensionalen Informationen bei den zweidimensionalen Fotos fehlen ist hierfür eine intelligente Interpolation notwendig. Die Qualität eines strukturerhaltenden Mappings ist von vielen Faktoren abhängig, bspw. dem Aufnahmewinkel.[493] Im Idealfall entsprechen sich diese bei beiden Verfahren – eine Anforderung, die leicht erfüllt werden kann. Denn wie in ►Kapitel 12.2| gezeigt, basiert die Streifenprojektion letztlich auf einer sequentielle Fotografie des projizierten und oberflächenspezifisch verzerrten Streifenmusters. Aus oben dargelegten technischen Gründen wird zur Bestimmung des Kontrastes während eines Scans sowohl ein Einzelbild mit reinem Weißlicht, also ohne Streifenmuster, sowie ein weiteres im komplett unbeleuchteten Zustand aufgenommen. Die erste Weißlichtaufnahme entspricht somit einem herkömmlichen Digitalfoto des Untersuchungsgegenstandes aus der Kamerasicht des Sensors. Allerdings handelt es sich um eine Schwarz-Weiß-Aufnahme, da der verbaute Kamera-Chip nicht farbsensitiv ist.

Die sequentiellen Kamerabilder, mit und ohne projiziertem Streifenmuster, werden zur Berechnung der Punktewolke in einem verborgenen Ordner des Betriebssystems abgelegt. Zur methodischen Optimierung wird in Zusammenarbeit mit 'Steinbichler' eine weitere modifizierte Initialisierungs-Datei erstellt und in das Betriebssystem integriert.[494] Dadurch ist der benutzerseitige Zugriff auf die Einzel-

493 Hinsichtlich einer thematischen Abgrenzung wird auf weitere Aspekte nicht eingegangen. Dem Kern nach fällt eine entsprechende Erörterung in den Bereich der digitalen Bildverarbeitung.

494 Der Urheber ist die Firma ‚Steinbichler Optotechnik GmbH'. Die Aufnahme ist als ‚AcqImg_LCOSPatternXBright0.tif' benannt. Die Datenablage erfolgt im ‚Steinbichler-System-Ordner' unter ‚COMETplus 9.62'.

bilder der Sensorkamera möglich. Aus den oben ausgeführten Gründen bietet sich somit das streifenlose 2D-Weißlichtbild an, um es mit der 3D-Aufnahme zu kombinieren – die Entsprechung ist pixelgenau. Zur Veranschaulichung wird auf einige exemplarische Messprotokollseiten verwiesen. Dort ist jeweils den 3D-Aufnahmen das zugehörige Weißlichtbild der Sensorkamera gegenübergestellt (►Abb. 108|, Abb. 112|, Kapitel Abb. 117|| und Abb. 118|).

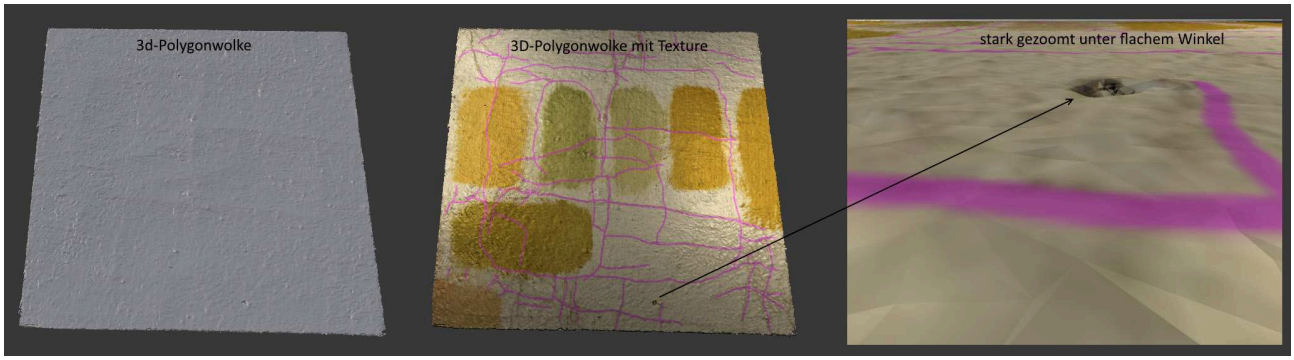


Abb. 126| Kombination eines 3D-Modell ('COMET-System') mit einem zweidimensionalen, farbigen Foto von 'RO_003'.
Quelle: Dominic Buchta, selbst

Der aufgezeigte Lösungsweg zur Kombination der Messbilder kann und wird an dieser Stelle jedoch lediglich skizziert. Die Rechtfertigung ergibt sich aus einer thematischen Abgrenzung sowie der Komplexität des Sachverhaltes. Die technische Realisierung der geschilderten Systemverbesserung des Streifenprojektionsverfahren steht klar aus. Mit dem Ziel einen Ausblick zu geben, wird jedoch auf einen ersten Versuch verwiesen, dessen Ergebnis unter maßgeblicher Mitwirkung des Projektpartners entstanden ist.[495] Im Zuge dessen werden die grundsätzlichen Möglichkeiten veranschaulicht, sowie auf Probleme hingewiesen, die sich aus dieser ersten Erprobung ergeben haben. So zeigen sich Schwierigkeiten, wenn das Objekt aus mehreren Blickwinkeln heraus gescannt wird um Grenzen des Messvolumens zu überwinden, oder um die 3D-Daten zu komplettieren. Die 2D-Weißlichtbilder der Sensorkamera kennzeichnen sich dann durch unterschiedliche Bildgeometrien und müssen zunächst perspektivisch entzerrt werden. Hierfür ist die digitale Bildverarbeitung zu nutzen. Erst im Anschluss an diese Transformation können die Fotografien passgenau aufeinander ausgerichtet werden, um daraus eine globale Aufnahme zu generieren.[496] In einem weiteren Schritt müssen die 2D-Daten zur Texturierung der 3D-Daten analog zur Oberflächentopografie sinnvoll verzerrt werden. Um den geschilderten Lösungs-

495 Vergleiche:Buchta u. a., 2015b
Buchta u. a., 2015b , Seite 213 ff.

496 Ein solcher Ablauf ist exemplarisch bei ►Abb. 118| dargestellt. Auf der letzten Protokollseite sind die Graustufen-Kamerabilder wiedergegeben – links die Einzelaufnahmen und rechts dieselben transformiert, wobei die beiden Aufnahmen hier bereits zu einer gemeinsamen verbunden sind. Dazu wurde die Bildbearbeitungssoftware ‚Adobe Photoshop CS5.1' verwendet. Die trapezförmigen Bildkanten ergeben sich aus der Verzerrung, die wiederum aus dem Messwinkel resultiert. Wäre das Objekt aus einer 0 °-Position heraus gescannt worden, so wären die Bilder verzerrungsfrei und wesentlich leichter zur Deckung zu bringen gewesen – eine Transformation würde entfallen. Dagegen sprechen jedoch die Ergebnisse aus den Vorversuchen zur Systemerkundung. Erfahrungsgemäß können die Strukturen am besten mit einem Messwinkel von 45-60 ° erfasst werden. Dieses galt im Besonderen für die schwierig zu digitalisierende Goldoberfläche dieses Untersuchungsgegenstandes.

weg zu veranschaulichen, wird der bereits bekannte Untersuchungsgegenstand 'RO_003' mit einer handelsüblichen Digitalkamera aus senkrechter Position fotografiert. Dieses Foto wird daraufhin zur Texturierung des zugehörigen 3D-Modells verwendet. Im dargestellten Ergebnis ist für das Mapping die Software 'Blender' verwendet worden (►Abb. 103| und Abb. 126|).[497,498]

497 Vergleiche: Blender (3D-Grafik Software), 2015

498 In Abweichung zu der obigen Schilderung ist zur Veranschaulichung der Möglichkeiten der Verfahrenskombination bewusst ein Farbfoto aus vergleichbarer Aufnahmeperspektive verwendet worden. Dieses wurde aus senkrechter Kameraposition erstellt und für die folgend Texturierung der 3D-Daten verwendet.

17. Zwischenfazit Teil 2

Gemäß der Erwartungen kann mit der Streifenprojektion der Anforderung an ein zerstörungsfreies und berührungsloses Messverfahren entsprochen werden – dieses ermöglicht alleinig eine hochauflösende und zugleich dreidimensionale Bildgebung. Besonders positiv wird die Flexibilität des 'COMET-Systems' bewertet. Diese umfasst maßgeblich die Konfigurationsmöglichkeit des Sensors analog zur Objektbeschaffenheit und zur Messaufgabe. So stehen zwei Sensorvarianten zur Verfügung, die sich durch konträre und zugleich einander ergänzende Eigenschaften auszeichnen. Besonders hervorzuheben ist das hohe Auflösungsvermögen von 'COMET 5 11M 80', was sich damit als besonders geeignet für die Untersuchung von Veränderungsprozessen und en détail den Schadensmerkmalen darstellt. Hingegen erweist sich 'COMET 5 11M 1000' aufgrund der Größe des Messvolumens als eine effiziente und praxistaugliche Sensorvariante, die globale Bezüge erlaubt. Des Weiteren ergibt sich die Systemflexibilität durch die Möglichkeit der Sensor-Adaption an die Objektbeschaffenheit. Nicht zuletzt der Untersuchungsgegenstand Gemälde kann aufgrund seiner Vielschichtigkeit teilweise messtechnisch so anspruchsvoll sein, dass seine Oberfläche als verfahrensunkooperativ zu bewerten ist. Jedoch kann durch die zahlreichen System-, Sensor- und Belichtungseinstellungen dieser Herausforderung adäquat begegnet werden. Diese aufgezeigten Vorteile haben im Umkehrschluss die Konsequenz, dass das System in seiner Anwendung äußerst komplex ist, sodass Möglichkeiten und Grenzen nicht sofort ersichtlich sind. Nicht nur anhand der Darlegung der verfahrenstechnischen Grundlagen, sondern vornehmlich durch die Erkundung expliziter Parameter und deren Auswirkung auf die Messdaten, konnte ein tiefes Verständnis über die Funktionsweise des 'COMET-Systems' erarbeitet werden. Ebenso wurde ein Prozessablauf zugunsten einer effizienten Arbeitsweise und bestmöglicher Messergebnisse entwickelt. Abschließend wird das System jedoch als so komplex eingeschätzt, dass für eine souveräne Bedienung gleichermaßen eine vergleichsweise umfangreiche Einarbeitung notwendig ist.

Anhand der durchgeführten Experimente konnten Limitierungen aufgedeckt werden, die sich auf die Größe der Messvolumen beziehen. Den eigenen Messungen zufolge fallen diese gegenüber den Herstellerangaben für beide Sensorvarianten nicht unerheblich kleiner aus. Ungeachtet dessen konnte die überzeugende Leistungsfähigkeit des 'COMET-Systems' und eine erste, prinzipielle Verfahrenseignung zur Digitalisierung von Gemäldestrukturen belegt werden. So ergaben die Untersuchungen zum Auflösungsvermögen, dass der Scanner so genau misst, dass selbst Craquelé-Strukturen detektieren werden können – was mit einer früheren Gerätegeneration bisher nicht möglich war. Weiter konnte die geschilderte Problematik bei der Digitalisierung stark glänzender Oberflächen ansatzweise affirmiert werden. Jedoch bietet das System hier gleichwohl technische Möglichkeiten diese weitestgehend auszugleichen. So bewies sich die Mehrfachmessung aus unterschiedlichen Positionen als eine geeignete Maßnahme.

Weiter konnten durch die Experimente bisher unbekannte, jedoch als eklatant zu bewertende Einschränkungen bei der Erfassung sehr dunkler Oberflächenpartien aufgezeigt werden. Diese sind auf ein ungenügend kontrastiertes Streifenmuster zurückzuführen. Zugleich konnte jedoch ein vielversprechender Lösungsweg zur Systemverbesserung aufgezeigt werden: Die Verfahrenskombination der Streifenprojektion mit einer ergänzenden fotografischen Abbildung. Bestehende Messlücken des 3D-Modells könnten durch zweidimensionale Bildinformationen ausgeglichen werden. Im Umkehrschluss wäre es denkbar, anhand der kombinierten, hochauflösenden, fotografischen Abbildung Rückschlüsse über strukturelle Merkmale zu ermöglichen, die mitunter bei der Streifenprojektionsaufnahme nicht abzuleiten sind. Ein weiterer, evidenter Vorteil wäre die Wiedergabe von Farbinformationen. Somit ist allein schon aus Gründen der Komplettierung des Informationsgehaltes über die Objekt- und etwaigen Veränderungsmerkmale die Verfahrenskombination zu forcieren.
Als grundsätzlich positiv wird die Leistungsfähigkeit und Praktikabilität der Software bewertet. Auch wenn hierorts dem experimentellen Teil vorweg gegriffen wird: 'COMETplus' als Software zur Datenerhebung und Weiterverarbeitung sowie 'INSPECTplus' als Software zur Auswertung sind konsequent aufeinander abgestimmt und greifen symbiotisch ineinander. Anhand der Protokolle offenbart sich bereits die Effizienz der Software in Form virtueller Auswertungswerkzeuge und kalkulatorischer Bezüge. Die damit ermöglichten, qualitativen und quantitativen Rückschlüsse konturieren sich als entscheidender Verfahrensvorteil.
Der volle Leistungsumfang wird jedoch erst im folgenden dritten Teil systematisch erörtert. Ebenso kann, wie eingangs gefordert, hierorts noch kein Beleg darüber gebracht werden *inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet.*

Teil 03

Anwendung des Streifenprojektionsverfahrens zur Detektion von Veränderungen an Gemäldestrukturen

18. Experimente zum Monitoring von Veränderungen durch das Streifenprojektionsverfahren

Im Folgenden soll untersucht werden, inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet. Die methodische Entwicklung eines geeigneten Monitorings konzentriert sich dabei auf zwei Kernaspekte: Erstens die Detektion struktureller Veränderungen des Materialgefüges. Zweitens die Loslösung von subjektiven Aspekten bei der Bewertung. Wie erörtert, konnte die grundsätzliche Verfahrenseignung bereits belegt werden. Durch das gesteigerte Auflösungsvermögen der aktuellen Gerätegeneration sind detaillierte Messergebnisse zu erwarten. Dabei ist der messtechnische Nachweis jener morphologischer Veränderungen, wie sie im Schadenskatalog ausgeführt sind (►Kapitel 9|), nur indirekt Gegenstand des Forschungsvorhabens. Auch wenn die einzelnen Schadensbilder hinsichtlich ihrer Merkmalsausprägung von graduell feinen Übergängen gekennzeichnet sind, wird als Arbeitshypothese unterstellt, dass dieses generell nachweisbar sind. Ferner wird angenommen, dass klimatische Einwirkungen tendenziell globale und subtile Veränderungen hervorrufen, die nicht immer sogleich als Schaden bewertet werden können. So wurde im ersten Teil hergeleitet, dass neben dem Risiko augenfälliger Ereignisse ein schleichender Wandel der Kunstwerke durch die Addition kleinster Altersprozesse besteht – bspw. hervorgerufen durch den Wechsel klimatischer Bedingungen oder durch Erschütterungen. Ein bildgebender Beleg dieser These steht bislang aus.

Dem kausal-kombinativen Zusammenhang von Klimaschwankung, Objektveränderung und Schadensbildung soll anhand von Experimenten an Probekörpern und Originalen nachgegangen werden. Die Detektion der Untersuchungsgegenstände wird ausschließlich mittels des 'COMET-Systems' durchgeführt. Die darauf basierende Auswertung erfolgt sowohl quantitativ als auch qualitativ. Die Objektbelastung wird dabei über eine zeitkritische Veränderung des Klimas erzielt – wobei der Belastungsfaktor die relative Feuchte ist. Fernerhin soll der Einfluss eines Kunsttransportes untersucht werden, bei dem jegliche Belastung nach Möglichkeit unterbunden werden soll.

Das Grundprinzip der Experimente sieht einen Vergleich des Digitalisates von Vorzustand (entspricht 'Soll') mit dem Digitalisat des Nachzustandes (entspricht 'Ist') vor. Die Experimente gliedern sich dabei in vier Phasen. In der ersten Phase, einer Laborstudie, soll über eine Modellbildung sowohl der Frage nach der messtechnischen Erfassung, als auch nach der Auswertbarkeit der Auswirkungen veränderter Feuchteparameter an Probekörpern nachgegangen werden. Hierzu eignet sich ein direkter Zustandsvergleich eines Probekörpers im Ausgangszustand mit dem selben nach der Einwirkung einer definierten Belastung. Hypothetisch wird hierbei die verstrichene Zeit und der Belastungsfaktor an sich maßgeblich für die Merkmalsausprägung der Veränderungen sein. In den dafür angelegten

Versuchsreihen kommen Probekörper zum Einsatz, deren Malschichtaufbau und verwendete Werkstoffe aufgrund eigener Herstellung bekannt sind. An ihnen sollen mögliche Folgen einer kumulativen klimatischen Belastung eines vormals unbelasteten Malschichtgefüges untersucht werden. Aufgrund der hohen Auflösung bietet sich hier 'COMET 5 11M 80' an.
In der zweiten Phase, ebenfalls eine Laborstudie, soll ein stärkerer Praxisbezug hergestellt werden. Daher werden Untersuchungsgegenstände gewählt, die den Status authentischer, originaler Kunstwerke haben. Im Folgenden werden diese als Realobjekte bezeichnet. Sie weisen Charakteristika von Gemälden auf, haben aber dennoch den Stellenwert von Testobjekten. Es handelt sich um weniger wertvolle aber historische Gemäldefragmente auf textilem Bildträger.[499] Diese können, analog zu den Versuchsanforderungen, bedenkenlos an ihre Grenzen belastet und frei modifiziert werden. Auch hier erfolgte die Belastung über eine Veränderung der relativen Feuchte. Da der Geringfügigkeitsgrenze nachgegangen werden soll, bieten sich analog zum Messvolumen kleindimensionierte Realobjekte an, die daher hochauflösend mit 'COMET 5 11M 80' digitalisiert werden. Diese zweite Phase stellt einen Versuch dar, Ergebnisse an Probeköpern der ersten Phase mit dem Verhalten von Realobjekten zu vergleichen. So sollen etwaige Unterschiede in der Reaktion auf die gleichen Belastungsfaktoren, die sich gegebenenfalls im Materialgefüge oder anderen Parametern begründen, aufgedeckt werden. Trotz einer vorangegangenen Eingrenzung auf den Belastungsfaktor Klimaschwankung sollte für einen Praxisbezug dennoch der grundsätzlichen Detektierbarkeit kleinster lokaler Veränderungen nachgegangen werden. Hierzu werden vereinzelt mechanische Schäden und Verschmutzungen mit sehr kleiner struktureller und raumdimensionaler Merkmalsausprägung am Realobjekt angebracht.
In Abgrenzung zur zweiten Phase ist der Untersuchungsgegenstand der dritten Phase kein Fragment sondern ein vollständiges Gemälde. So sollen die Versuche um globale Aspekte wie Formatvergrößerung und Vollständigkeit des Untersuchungsgegenstandes erweitert werden, die in den vorangegangenen Modellstudien keine Berücksichtigung fanden. Zur Verfahrensanwendung kommt daher sowohl 'COMET 5 11M 80' als auch 'COMET 5 11M 1000'. Weiterhin gilt es, einen möglichen Erkenntnistransfer aus den Modellstudien auf reale Kunstwerke zu überprüfen.
Den Abschluss des experimentellen Teils stellt die vierte Phase dar. In Hinblick einer Systemevaluierung soll durch das Verlassen der Laborumgebung dem Wirklichkeitsanspruch eines Kunsttransportes entsprochen werden. So werden im Rahmen realer Kunsttransporte Experimente an sachgemäß verpackten originalen

499 Bei den Gemäldefragmenten handelt es sich um Materialproben die sich durch ein originales, authentisches und gealtertes Materialgefüge auszeichnen. Die ‚Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart', Fachbereich Restaurierung, besitzt solche Gemäldefragmente zum Zweck der maltechnischen Forschung sowie zur Erprobung von Restaurierungsmaterialien und -techniken. Aus diesem Fundus sind die Probestücke mit freundlicher Genehmigung entnommen.

Gemälden durchgeführt. Diese sollen Aufschluss über die längerfristige Verfahrensimplementierung in den musealen Betrieb geben. Abermals werden hierfür beide Sensorvarianten eingesetzt.

19. Versuchsobjekte: Anforderung und Auswahlkriterien

Analog zur Fragestellung und der eben vorgestellten Gliederung ergeben sich drei Kategorien von Versuchsobjekten: Probekörper (Objektbenennung: 'PK_***'), Realobjekte (Objektbenennung: 'RO_***') und Gemälde (Objektbenennung: 'G_***'). Deren Konzeption sowie das Anforderungsprofil werden im Folgenden dargelegt.

19.1 Probekörper: Konzeption in Anlehnung an den Untersuchungsgegenstand Gemälde – eine maltechnische Definition

Im Rahmen eines laborexperimentellen Aufbaus soll durch die Probekörper der Zusammenhang von Klimaschwankung und Objektveränderung untersucht werden. Die Experimente dienen dazu mit dem 'COMET-System' temporale und laterale Veränderungen an den Proben auszumachen, und/oder konsekutive Relationen im Materialgefüge messtechnisch zu erweisen.

Um reproduzierbare und verifizierbare Ergebnisse gewährleisten zu können, muss die Herstellung der Probekörper nach standardisierten Kriterien erfolgen. Dieser Anspruch kann nur dann erfüllt werden, wenn ein definierter maltechnischer Aufbau mit einer bekannten stofflichen Zusammensetzung vorliegt. Als festgelegtes Charakteristikum der Probekörper wird ein einfaches und zugleich heterogenes Materialgefüge mit unterschiedlich ausgeprägten hygroskopischen Eigenschaften definiert. Die Probekörper sollen repräsentativ für die Objektgruppe Gemälde sein, um später einen Erkenntnistransfer aus den Laborexperiementen auf Realobjekte gewährleisten zu können.[500] Deren Vergleichbarkeit ist eine Grundvorraussetzung. Zudem eignen sich einfach aufgebaute Probekörper für die Analyse von Objektveränderungen weitaus besser als komplexere, da hier Rückschlüsse und die Modellbildung leichter sind. Dieser Thesenführung unterliegt die Annahme, dass sich mit einem zunehmend heterogenen Werkstoffgefüge mögliche Wechselwirkungen zwischen den Materialien potenzieren und gegenseitig beeinflussen können. Prinzipiell besteht jedoch ein dialektischer Konflikt zwischen dem Anspruch einer Wirklichkeitsnachbildung und dem nach einem einfachen Aufbau der Probekörper.

Zur weiteren Schärfung eines Anforderungsprofils der Prüfkörper ist zunächst eine begrifflich-deskriptive Darstellung des Untersuchungsgegenstandes Gemälde sowie seiner charakteristischen Merkmale notwendig. Allgemein verstehen sich unter dieser Objektgruppe Kunstwerke von tendenziell ebener Gestalt, welche die Anforderung an Mobilität erfüllen.[501] Sie bestehen in der Regel aus einem Bildträger, einer Grundierung, einer Malschicht und einem Firnis.[502]

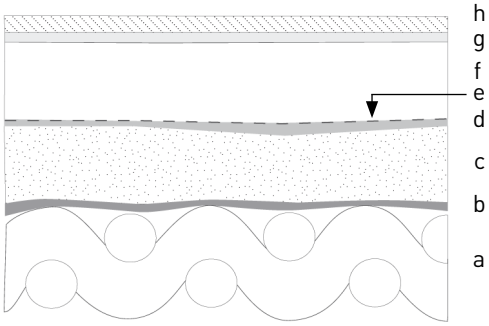


Abb. 127| Exemplarischer Schichtenaufbau eines Gemäldes auf textilem Bildträger.
a) Bildträger Textil
b) Vorleimung
c) Grundierung
d) Imprimitur
e) Vorzeichnung
f) Malschicht 1
g) Malschicht 2
h) Firnis
Quelle: Selbst, nach Kühn, 2001, Seite 11 und Mairinger, 2003, Seite 11

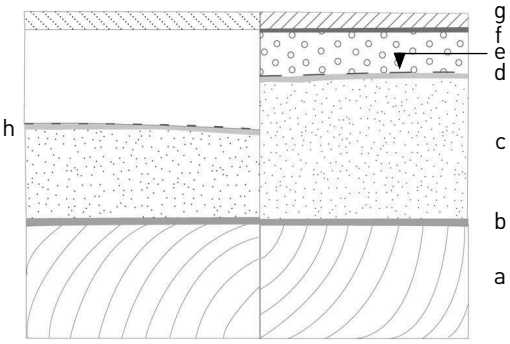


Abb. 128| Exemplarischer Schichtenaufbau eines Gemäldes auf hölzernem Bildträger, wobei in Ergänzung im rechten Teil der Abbildung der maltechnische Aufbau gezeigt wird, wie er bei einer Ikone auftreten kann. Generell kann die Kombination und Schichtenfolge bei den Objekten sehr unterschiedlich sein.
a) Bildträger Holz
b) Vorleimung
c) Grundierung
d) Imprimitur
e) Vorzeichnung
f) Malschicht 1
g) Malschicht 2
h) Firnis
Quelle: Selbst, nach Kühn, 2001, Seite 11 und Mairinger, 2003, Seite 11

[500] Die Varianten der Bildträger wurden auf Holz und Textil begrenzt, da diese nach empirischen Erfahrungen am häufigsten vertreten sind.

[501] Vergleiche: Olbrich & Strauss, 1994, Seite 2; Stadler, 1990, Seite 130; Jahn, 1975, Seite 658

[502] Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 11

Weitere Schichten wie eine Vorleimung, eine Unterzeichnung, eine Imprimitur, eine mögliche Blattmetallauflage und zusätzliche Malschichten in unterschiedlicher Ausführung – pastos oder als Lasur aufgetragen – können den maltechnischen Aufbau ergänzen.[503] Entsprechend einer künstlerisch freien Ausführung sind weitere Schichten und andere Kombinationsmöglichkeiten denkbar (►Abb. 127| und Abb. 128|).

Ebenso heterogen wie der maltechnische Aufbau ist bei Gemälden das Künstlermaterial selbst. Die stoffliche Zusammensetzung ist eine Mischung unterschiedlicher chemischer Stoffe. Weitere verallgemeinernde Aussagen zum Künstlermaterial oder zum maltechnischen Aufbau sind daher nicht möglich.[504] Naturgemäß weisen Gemälde einen Unikatscharakter auf. Sie sind Ausdruck einer individuellen und einzigartigen künstlerischen Leistung. Hinzukommend handelt es sich bei Gemälden oftmals um historische Objekte verschiedener Zeitepochen. Eine kulturhistorische Prägung und ein mehr oder weniger gealtertes Materialgefüge ist die Folge. Neben dem Standort, der Lagerung und den Zeitläufen sind chemische Zersetzungsprozesse der verwendeten Werkstoffe für den Erhaltungszustand ausschlaggebend. Die Gesamtheit der Charakteristika, die sich aus der Materialität, aus dem künstlerischen Schaffensprozess und dem zeitlichen ‘Geworden-sein’ ergeben, stellen die Authentizität des Kunstwerkes dar.[505] Sowohl die maltechnische Diversität, als auch die mannigfaltige Stofflichkeit des Künstlermaterials, kann unmöglich von einem, oder auch mehreren, Probekörpern repräsentativ abgebildet werden. Das Kunstwerk als Unikum steht hier dem Probekörper und dem Anspruch nach verallgemeinernden Eigenschaften diametral gegenüber. Trotz der Anforderung an die zu konzipierenden Probekörper, die oben beschriebene Objektgruppe zu repräsentieren, können sie diese ausschließlich als simplifizierendes Modell wiedergeben.

In der Restaurierung ist die Arbeit mit Probekörpern ein gängiges Verfahren um Werkstoffe, Verarbeitungstechniken und Untersuchungsmethoden zu prüfen und/oder zu entwickeln. Mit dem Anspruch der Wirklichkeitsnachbildung über die zu konzipierenden Probekörper sind daher Strategien und Konzepte anderer Autoren dieser Wissenschaftsdisziplin untersucht worden. Die Annahme, dass hierbei etwaige Konzepte ausgemacht werden können, stellte sich als rein hypothetisch heraus. Insbesondere die oben formulierten Anforderungen an die Eigenschaften der Probekörper führten dazu, dass sich keine adäquaten Modelle und vergleichende Methoden zu

503 Vergleiche: Mairinger, 2003, Seite 11

504 Zum Thema Maltechnik und den verwendeten Künstlermaterialien gibt es eine Vielzahl von Literatur. Als Standardwerk ist Wehlte & Wehlte, 1992 und Doerner & Hoppe, 2001 aufzuführen. Erstmals 1921 veröffentlicht, gibt letzterer einen systematischen Überblick über die Maltechnik und die verwendeten Werkstoffe. Zudem werden dort wesentliche, historische Beiträge aufgeführt. Ergänzend sind die Beiträge von Kühn, 1997, Straub, 1997 und Koller, 1997 zu nennen, welche nicht minder bedeutend sind. Für den Bereich moderner Werkstoffe wird stellvertretend auf Wagner u. a., 2002 hingewiesen.

505 Vergleiche zum Begriff der Authentizität von Kunstwerken ICCOMOS (NARA Document on Authenticity), 2013, Seite 2, sowie Falser, 2011. Letzterer gibt in seinem Aufsatz eine Abhandlung zur Begriffsbildung, obgleich neben allgemeinen Ausführungen ein Schwerpunkt bei der Denkmalpflege besteht. Vergleiche zudem die Ausführungen von Janis, 2005, Seite 130-136

ihrer Herstellung finden ließen. Zusätzlich sind die Angaben zur Herstellung oftmals nicht präzise genug, da sie zum Zeitpunkt ihrer Publikation einem anderen Wissenschaftsverständnis unterlagen. So sind die Probekörper und damit auch die Ergebnisse unter dem heutigen Blickwinkel einer wissenschaftlichen Arbeitsweise bspw. nicht reproduzierbar.[506] Weiter erfolgt ihre Konzeption nachweislich nach sehr individuellen und nicht übertragbaren Gesichtspunkten. Oftmals favorisieren die Autoren eine starke Vereinfachung des Prüfkörpers, sodass diese das Materialgefüge komplexer Kunstwerke nur noch eingeschränkt repräsentieren. In den betreffenden Fällen sind die Fragestellungen dann allerdings so dezidiert, dass dieses Vorgehen stringent ist.[507,508] Zugleich können diese für die vorliegende Arbeit nicht adaptiert werden. Ebenso muss die Suche nach übertragbaren Konzepten zur Probekörperherstellung aus anderen Fachbereichen als erfolglos bewertet werden. In den entsprechenden Normschriften der Industrie, die den Bereich der Probekörper- und Musterherstellung zur Qualitätssicherung, zur Kompatibilität und zur Austauschbarkeit von Fertigungsprozessen regelt, findet sich kein Äquivalent, welches dem komplexen Materialgefüge von Gemälden gerecht wird und damit als Prototyp fungieren könnte.[509]

506 Vergleiche: Zehnder, 1997, Seite 304; Schießl, 1989, 293 f.

507 Vergleiche: Soppa, 2007, Seite 43; Schießl, 1989 Seite 293 f., 300 f.; Pataki, 2006, Seite 49

508 Diese These konnte anhand der Durchsicht relevanter Fachzeitschriften des letzten Dezenniums belegt werden. Hierzu wurden die Zeitschriften gesichtet welche aufgrund ihres Publikationsschwerpunktes erwarten ließen, dass die Autoren ihre Forschungsergebnisse über eine experimentelle Beweisführung generiert haben, zum Beispiel: ‚Studies in Conservation', ‚Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung', ‚Weiße Reihe am Institut für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart', ‚Weiße Reihe aus dem Institut für Baugeschichte, Kunstgeschichte, Restaurierung mit Architekturmuseum / Technische Universität München, Fakultät für Architektur: Restaurierung', ‚Restauratorenblätter, Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut', ‚Restauro – Die Zeitschrift für Restauratoren, Konservatoren & Denkmalpfleger'.

509 Aufgrund des Umfangs nationaler und internationaler (ISO/EN) Normschriften wurden lediglich die DIN-Normen eingesehen. Hier ist das ‚DIN-Taschenbuch 49, Farbmittel 1 - Pigmente, Füllstoffe, Farbstoffe – DIN-Normen' relevant. Vergleiche: Ohne Verf. (DIN-Norm Farbmittel 1), 2000. Bis zum Zeitpunkt der Recherche wurde angenommen, dass sich repräsentative und reproduzierbare Prüfkörper mit einem fest definierten Materialaufbau herstellen ließen, indem sich an Vorgaben entsprechender DIN-Normen orientiert wird. Dieses erwies sich insofern als Irrtum, da es keine übertragbaren Beispiele gibt, welche die Komplexität des maltechnischen Aufbaus des Untersuchungsgegenstandes Gemälde berücksichtigen. Im Bereich der Prüfung und Bemusterung von Farbmitteln wird zwar auf selbige eingegangen, ebenso auf Beschichtungsstoffe, Füllstoffe und Farbmischungen in unterschiedlichen Bindemittelsystemen, jedoch respektieren entsprechende Muster nicht die oben gemachte Anforderung eines mehrschichtigen Aufbaus. Bei anderen in Betracht kommenden DIN-Normen wird allgemein weniger die Herstellung von Probekörpern an sich beschrieben, als vielmehr auf die Analyse- und Auswertungsmethoden Bezug genommen. Weiter lassen sich dort keine übertragbaren Beispiele finden, da sie alle dem Grundgedanken der Simplifizierung unterliegen und kein Bezug zur oben genannten Objektgruppe besteht. Exemplarisch angeführt beschreibt die DIN 53 773 die Prüfung von Farbmitteln in Polyvinylchlorid-Pasten. Dabei impliziert sie gleichzeitig die Herstellung von Probekörpern auf nicht saugenden Trägern wie Glas, Metall oder Trennpapier. Die Auswertung erfolgt durch die Separierung des Probekörpers in Trägermedium und Farbschicht. Vergleiche: Ohne Verf. (DIN-Norm Farbmittel 1), 2000, Seite 249. Diese oder ähnliche Normen eignen sich daher nicht als Vorgabe.

Zudem führt LEDWOCH in seinen Ausführungen zu den maltechnischen Grundbegriffen und ihrer Nomenklatur aus, dass in den DIN-Normen selbst die Terminologie des Beschichtungsstoff als Oberbegriff für Lacke, Farben und Beschichtungen auf einem Untergrund / einem Werkstück nicht eindeutig definiert ist. Hierzu erörtert der genannte Autor bestehende Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Normen (DIN EN 971-1, DIN 55943, DIN 55944, DIN 55945) und verweist auf die uneinheitliche Terminologie. Vergleiche: Ledwoch, 2001, Seite 55-62

Aus den genannten Gründen wird der maltechnische Aufbau und die Materialwahl der Probekörper für die Laborexperimente durch den Autor selbst festgelegt, wobei hier die Kriterien Standardisierung und Reproduzierbarkeit ausschlaggebend sind. Neben diesen sollten sich die Probekörper in Bezug auf das Messverfahren durch kooperative Eigenschaften charakterisieren – eine Vorraussetzung für bestmögliche Daten.[510] Damit ist die Oberflächenstruktur, Farbe und Glanz, aber auch ihre Abmessungen gemeint. Anvisiert wird die Digitalisierung mit maximaler Auflösung, was auf 'COMET 5 11M 80' abzielt. Um von vornherein einen effizienten Ablauf der Laborversuche zu gewährleisten, sollte der Messaufwand nach Möglichkeit gering sein, sodass sich die Probengröße am kleinen Messvolumen orientiert. Im besten Fall kann die Probenoberfläche bereits mit einer Messung vollständig digitalisiert werden. In Anbetracht des Messvolumens der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' wären die Proben dann jedoch verhältnismäßig klein.[511] Da die zu detektierenden Objektmerkmale hypothetisch eine gewisse räumliche Ausdehnung aufweisen, dürfen die Proben zugunsten repräsentativer Messergebnisse eine gewisse Größe nicht unterschreiten.[512] Besteht neben der Digitalisierung der Probenoberfläche die Anforderung einer Rundumerfassung, so müssen in jedem Fall mehrere Einzelaufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen werden. Dieses gilt gleichermaßen für den Fall, dass die Stirnflächen der Proben digitalisiert werden sollen, um Dimensionsänderungen zu untersuchen. In diesen Fällen muss für ein erfolgreiches 'Flächenmatching' der Einzelaufnahmen ein Überlappbereich von ca. 20% gewährleistet werden.[513] Aus den genannten Gründen können die Proben daher größer sein als das kleinste Messvolumen des Sensors, wobei die kürzeste Seite der Probekörper so konzipiert wurde, dass sie gerade mit einer Aufnahme erfasst werden kann. Als Form wird ein Quader mit der Abmessungen 70 x 65 x 6 mm festgelegt.[514] Einerseits ist die Probe damit ausreichend dimensioniert, andererseits kann ihre Malschicht immer noch mit zwei, sich geringfügig überlappenden Einzelaufnahmen

510 Dabei handelt es sich um keinen allgemeingültigen Grundsatz der laborexperimentellen Arbeit, da dieser der Erkundung der Systemgrenzen entgegen stehen würde. Im zuletzt geschilderten Zusammenhang wird jedoch auf die Vorarbeiten im zweiten Teil verwiesen.

511 Bei der senkrechten Projektion auf eine ebene Fläche ist das Messfeld rechteckig und weist hier eine Kantenlänge von 44,5 x 67,0 mm auf, wobei sich das Messvolumen durch die Höhe von 46,0 mm definiert.

512 Darüber hinaus ist die Herstellung kleinerer Proben manuell aufwendiger. Ebenso sind Fertigungstoleranzen schwieriger einzuhalten.

513 Dieser Wert beruht auf empirischen Erfahrungen aus den Vorversuchen zur Systemerkundung. Verallgemeinerungen sind nicht zulässig da der Oberflächenform und der -struktur eine maßgebliche Rolle beigemessen werden muss.

514 Neben den Abmessungen der Messvolumina sind weitere praktische Gründe ausschlaggebend für diese Festlegung. Zu nennen sind die Abmessungen des Messraums der Klimakammer und der Befeuchtungsboxen die zur Konditionierung der Probekörper verwendet wurden. Letztere haben ein Innenmaß von 22,5 x 15,5 x 6,5 cm, sodass mit der gewählten Probekörperabmessung hypothetisch sechs zugleich konditioniert werden können.

Die Quaderform besitzt den Vorteil, dass sich bei der späteren Arbeit mit der Sensorsoftware leichter am virtuellen 3D-Modell orientiert werden kann. Da die virtuellen Modelle dort ohne Farbwerte angezeigt werden, sind offensichtliche Anhaltspunkte, insbesondere bei sehr gleichförmigen Objekten, hilfreich. Ebenso steigt damit die Erfolgsaussicht bei der Automatikfunktion des ‚Matching'.

digitalisiert werden, sodass ebenso pragmatische Gesichtspunkte erfüllt sind.
Unter Berücksichtigung oben genannter Aspekte sind mehrere Chargen von Probekörpern hergestellt worden.[515] Ihr maltechnischer Aufbau ist auf die wesentlichen Bestandteile: Bildträger, Vorleimung, Grundierung, eine Malschicht und einen abschließenden Firnis eingeschränkt. Um repräsentativ für eine möglichst große Gruppe von Gemälden zu sein, sind neben den beiden Bildträgertypen Holz und Textil verschiedene Probekörper-Chargen mit vier unterschiedlichen Bindemittelsystemen hergestellt worden. Details zu den verwendeten Werkstoffen sind der folgenden Tabelle (►Tab. 27|) zu entnehmen.

Herstellung Probekörper Holz

Zur Herstellung der Holzprobekörper wurde handelsübliches Eichenholz verwendet, welches auf die Abmessungen 70 x 65 x 6 mm zugeschnitten und abschließend leicht poliert wurde.[516] In Anlehnung an die eigenen Vorarbeiten sind die Proben so gesägt, dass die malschichtseitigen Probenoberflächen dem Tangentialschnitt entsprechen.[517] Die stehenden Jahrringe befinden sich demnach an der Stirnseite der kürzeren Kantenlänge (►Abb. 129|). Durch die genannte Herstellungsweise können anisotrope und hygroskopische Abhängigkeiten untersucht werden.[518]
Vor dem Grundierungsauftrag wurde mit einem Pinsel zunächst eine dünne Vorleimung aufgetragen (Gelatine 3,5 % gelöst in demineralisiertem Wasser; Trocknungszeit ein Tag). Als Kreidegrundmasse wurde eine Mischung aus Champagner und Bologneser Kreide (im Mischungsverhältnis 1:1) sowie Gelatine als Bindemittel (in 7 % Lösung in demineralisiertem Wasser) angesetzt. Nach dem Einsumpfen der Kreide in die warme Gelatinelösung konnte ein Gewichtsverhältnis von Gelatinelösung zu Kreide von 2:3 bestimmt werden. Mit Hilfe einer Wärmeplatte wurde der Kreidegrund stets auf ca. 65 °C temperiert, sowie zur gleichmäßigen Vermischung zweimal durch ein Sieb gegeben. Die Grundierung sollte aus Gründen der Reproduzierbarkeit eine gleichmäßige, ebene und bekannte Schichtstärke aufweisen. Hierzu wurde ein bündig abschließender, selbstklebender und kantenparallel umlaufender Folienrahmen mit einer Breite von 3 mm auf

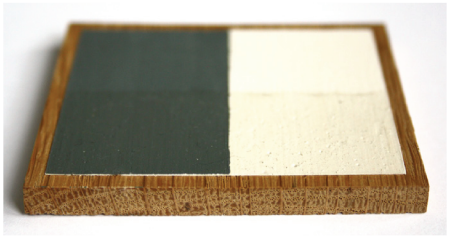


Abb. 129| Foto zur Veranschaulichung des Probenaufbaus mit Blick auf die kürzere Stirnkante des Probekörpers (stehende Jahrringe). Quelle: Selbst

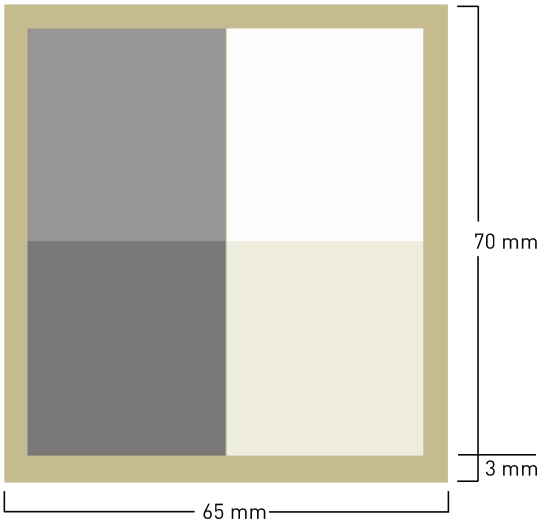


Abb. 130| Grafik zum maltechnischen Aufbau der Probekörper 'PK_037' – 048.
Quelle: Selbst

Eichenholz
Eichenholz, Grundierung
Eichenholz, Grundierung, Malschicht
Eichenholz, Grundierung, Malschicht, Firnis
Eichenholz, Grundierung, Firnis

515 Die Probekörper-Chargen wurden sowohl für die Laborexperimente des vorliegenden Projektes, als auch für die des Partnerprojektes verwendet. In diesem Zusammenhang ist auf Heinemann u. a., 2014 verwiesen, wobei in der dort zugrundeliegenden Diplomarbeit bereits die Herstellung der Probekörper en détail beschrieben wird. Vergleiche: Heinemann, 2013, Seite 129. Zudem begründet sich hieraus auch die Nummerierung der Probekörper für diese Arbeit. Diese schließen unmittelbar an die Charge an, die für die shearografischen Versuche verwendet wurden. Die hiesige Nummerierung beginnt mit: PK_037. Die Herstellung der Probekörper erfolgte in Zusammenarbeit mit Frau Carolin Heinemann und Frau Elisabeth George (Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart).

516 Diese Holzart wurde aufgrund ihrer weiten Verbreitung in der nordeuropäischen Holztafelmalerei gewählt. Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 12. Außerdem kennzeichnet sich diese Holzart durch ein vergleichsweise ausgeprägtes anisotropisches Verhalten. Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 424; Nutsch, 1995, Seite 58

517 Durch diese Konstruktion besteht zudem die Vorraussetzung zur Vergleichbarkeit der eigenen Ergebnisse mit der Forschungsarbeit anderer Autoren. Zu nennen ist hier die Arbeit von Rachwal u. a., 2012.

518 Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 424; Nutsch, 1995, Seite 58

der Malschichtseite der Probenoberfläche aufkaschiert – die Stärke des Folienrahmens entspricht 0,4 mm. Dieser aufgeklebte Rahmen diente beim folgenden Grundierungsauftrag als Auflagepunkt für eine Rakel. Zur Herstellung der Grundierung wurde im Inneren des Folienrahmens flüssige Kreidegrundmasse aufgetropft und verteilt. Zur Einebnung der Oberfläche wurde die Grundiermasse daraufhin mit einer Rakel abgezogen, sodass beim darüber hinweg streichen überschüssiger Kreidegrund entfernt wurde. Zurück blieb eine gleichmäßige Kreidegrundschicht, analog zur Höhe des Folienrahmens. Nach der Trocknung der Kreidegrundmasse zur Grundierung wies diese eine gleichmäßige und aufgrund der Herstellungsweise, eine reproduzierbare Schichtstärke auf. Letztere war jedoch wegen des trocknungsbedingten Volumensschwundes etwas niedriger als der umlaufende Folienrahmen.[519] Als Malschicht wurden neutralgraue Farben verwendet, sodass die Probekörper kooperativ zum Untersuchungsverfahren sind. Der Auftrag von Gouache-, Acryl- oder Ölfarben erfolgte unverdünnt mit einem Pinsel, wobei das Kriterium des Farbauftrages eine dünne, aber gleichmäßig deckende Schicht war. Die grundierten Oberflächen der Probekörper wurden hierzu lediglich zur Hälfte bemalt, um möglichst vielfältige Oberflächen zu erhalten (►Abb. 129| und ►Abb. 131|. Aufgrund der langsamen Öltrocknung wurde bis zum folgenden Firnisauftrag acht Wochen gewartet.

Nach der Trocknung folgte der partielle Auftrag einer dünn aufgestrichenen Firnisschicht – Dammar gelöst in Balsamterpentin (im Mischungsverhältnis von 1:5). Auch diese abschließenden Firnisschichten bedeckten die Oberflächen der Probekörper nur zur Hälfte, wobei der Aufstrich wiederum nur eine Hälfte der Malschicht und eine Hälfte der Grundierung bedeckte. Entsprechend kennzeichnet sich jeder Probeköper durch vier verschiedene Oberflächenarten (Eichenholz, Grundierung, Malschicht, Firnis). Eine grafische Darstellung des Malschichtaufbaus der Proben zeigt ►Abb. 130|, wobei ►Abb. 131| die Auswahl der fertiggestellten Probekörper darstellt.[520] Die Auswahl für die durchgeführten Versuche umfasst drei Probekörper: 'PK_037' (Malschicht Gouache), 'PK_042' (Malschicht Acryl), 'PK_047' (Malschicht Öl).

519 Mit Hilfe des hochauflösenden Sensors wurde eine Messung zur Quantifizierung vorgenommen. Hier konnte nach dem Trocknen eine gemittelte Schichtstärke von 0,138 mm bestimmt werden, wobei die Extremwerte bei 0,158 mm und 0,125 mm liegen.

520 Datum der Fertigstellung der ersten Charge der hier verwendeten Holztafelprobekörper mit der Laufnummer ‚PK_037' – PK_048 war der 29.01.2014.

Trotz der Auswahl wurden je Malschicht zwei weitere Probekörper in den Versuchsreihen konditioniert und digitalisiert, um als Absicherung im Bedarfsfall auf diese zurückgreifen und die Messreihe fortführen zu können.

Probekörper	Material	Bezeichnung	Hersteller	Vertrieb
PK_041 – 044, PK_051, PK_052	Acrylfarbe	Künstler Acrylfarbe, Neutralgrau Mittel, Nr.: 978	Lascaux Colours & Restauro, Barbara Diethelm AG Zürichstrasse 42, CH-8306 Brüttisellen	Deffner & Johann GmbH Mühläcker Straße 13, 97520 Röthlein
PK_049 – 054	Acrylglas	PLEXIGLAS®	Röhm GmbH & CO. KG heute verm. Evonik Industries AG Rellinghauser Straße 1—11, 45128 Essen	Ernst Kienzle GmbH & CO. KG Mercedesstraße 9 70372 Stuttgart
PK_049 – 054	BEVA®-Folie	BEVA®, Film, dünn 25 µm, Nr.: 87050.91100.522	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten
PK_037 – 048	Bologneser Kreide	Kreide von Bologna, leicht Nr.: 58150	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten
PK_037 – 048	Champagner Kreide	Calciumcarbonat, natürlich, Nr.: 5800	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten	Kremer Pigmente GmbH & Co. KG Hauptstr. 41 – 47, 88317 Aichstetten
PK_037 – 048	Eichenholz	Eichenholz	k.A.	Schreinerei Höpfler Weißenburgstr. 35, 70180 Stuttgart
PK_037 – 048	Ethanol	Ethanol vergällt ≥99,8 %, Nr.: K928.5	Carl Roth GmbH & Co. KG Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe	Carl Roth GmbH & Co. KG Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe
PK_037 – 048	Gelatine	Gelatine, Gold, reinst, 180-Bloom, Nr.: 4274.3	Carl Roth GmbH & Co. KG Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe	Carl Roth GmbH & Co. KG Schoemperlenstr. 3-5, 76185 Karlsruhe
PK_037 – 040, PK_049, PK_050	Gouachefarbe	Gouache Extra-Fine, Kaltgrau, Nr.: 8195	Lukas-Nerchau GmbH Harffstr. 40, 40591 Düsseldorf	Deffner & Johann GmbH Mühläcker Straße 13, 97520 Röthlein
PK_049 – 054	Leinwand	Belgisches Leinen roh 190 g/m2, Faden 25x25/cm2, Nr.: 2820000	Lukas-Nerchau GmbH Harffstr. 40, 40591 Düsseldorf	Deffner & Johann GmbH Mühläcker Straße 13, 97520 Röthlein
PK_045 – 048, PK_053, PK_054	Öllfarbe	Künstler Ölfarbe, Norma, Kaltgrau	H. Schmincke & Co. GmbH & Co. KG Otto-Hahn-Str. 2, 40699 Erkrath	Deffner & Johann GmbH Mühläcker Straße 13, 97520 Röthlein
PK_037 – 048	PVC-Folie	Oracal 2620 Folienstärke: 0,2 mm	ORAFOL Europe GmbH Orafolstraße 2, 16515 Oranienburg	Karl Gröner GmbH Dekosysteme Riedweg 27, 89081 Ulm

Tab. 27| Tabellarische Übersicht über die zur Herstellung der Probekörper verwendeten Materialien, sowie die zugehörigen Hersteller- und Vertriebsangaben. Quelle: Selbst

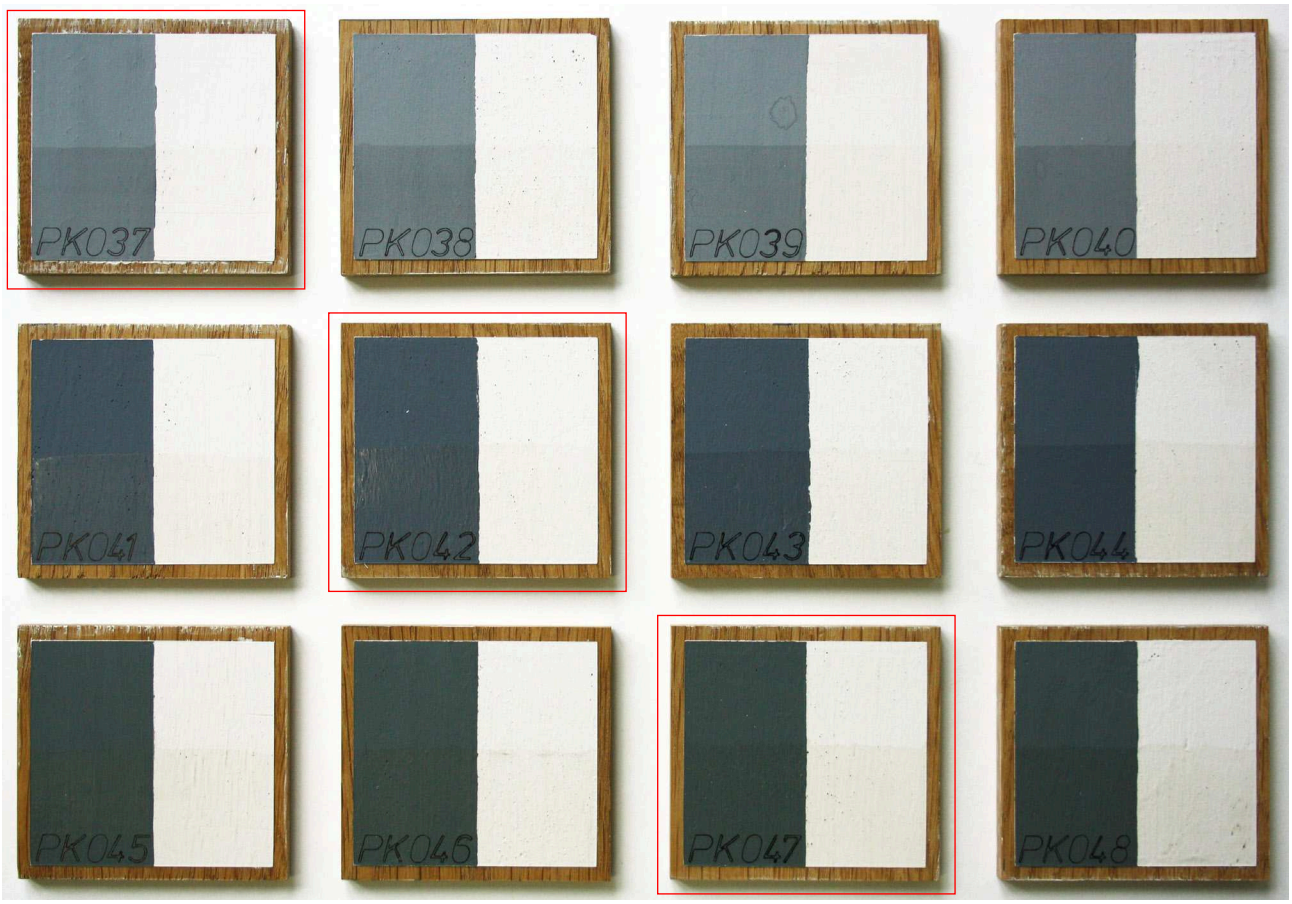


Abb. 131| Foto der Charge Probekörper welche für die Gruppe der Holztafelgemälde repräsentativ ist. Die oberste Reihe der abgebildeten Probekörper ist zur Hälfte mit einer Gouache-Farbschicht versehen, die darunterliegende Reihe ist Acrylgebunden, die unterste Ölgebunden – allesamt in Neutralgrau.
Aufgrund zeitlicher Gesichtspunkte wurde bei der Auswertung eine zusätzliche Einschränkung in Bezug auf die Auswahl einzelner Probekörper vorgenommen. Auswahlkriterium war hierbei, dass aus einer Charge Probekörper jeweils ein Probekörper je Malschichtart gewählt wurde. Ansonsten oblag die Auswahl dem Zufall, bzw. dem oben rot umrandeten geometrischen Muster.
Quelle: Selbst

Herstellung Probekörper Textil

In Anlehnung an das oben beschriebene Muster wurden im selben Verfahren Probekörper auf textilem Bildträger hergestellt. Als Bildträger dieser Charge diente eine Leinwand, die fadengerade auf Acrylglas-Rahmen geklebt wurde. Die Abmessungen der Rahmen betragen 70 x 65 x 6 mm. Die Verklebung von Textil und Rahmen erfolgte über 'BEVA-Folie'. Die Materialzusammensetzung und Herstellungsweise der Grundierung, die Malschicht als auch der Firnis entsprechen jener auf hölzernem Bildträger. Die Auswahl für die Versuchsdurchführung umfasst drei Probekörper: 'PK_049' (Malschicht Gouache), 'PK_051' (Malschicht Acryl), 'PK_053' (Malschicht Öl) (►Abb. 132|).



Abb. 132| Foto der ausgewählten Probekörper, die für die Gruppe der Gemälde auf textilem Bildträger repräsentativ sind. Der oberste Probekörper ist zur Hälfte mit einer Gouache-Malschicht bedeckt, der mittlere mit einer Acryl-Malschicht und der unterste mit einer Öl-Malschicht.
Quelle: Selbst

19.2 Realobjekte

Als Realobjekte wurden, wie bereits einleitend erwähnt, Fragmente von Gemälden auf textilem Bildträger unterschiedlicher Provenienz und Alter zu Realobjekten verarbeitet. Bei der Herstellung dieser Untersuchungsgegenstände wurde grundsätzlich dem bisherigen Muster gefolgt. Auch hier wurden entsprechende Fragmente auf die Abmessungen 70 x 65 mm zugeschnitten und mittels 'BEVA-Folie' fadengerade auf die 6 mm hohen Acrylglasrahmen geklebt. Für eine aussagekräftige und umfassende Systemerprobung sollte die Auswahl der Versuchsobjekte möglichst heterogen sein:

R_001 (►Abb. 133|):[521] Das Realobjekt kennzeichnet sich durch eine seidenmatt-glänzende, monochrom-weiße Färbung. Die Oberfläche ist vergleichsweise glatt, wobei im Streiflicht leichte Pastositäten erkennbar sind. Durch den gesamten Schichtenverbund verläuft ein Schnitt sowie zwei Löcher. Im Randbereich der genannten Schadensbilder sind im Bildschichtengefüge kleinere Fehlstellen, aufstehende Schollen sowie zahlreiche Riss-/Bruch-Kombinationen festzustellen. Von den genannten Imperfektionen geht vereinzelt ein Craquelé aus – ansonsten ist das Realobjekt frei von einem solchen. Des Weiteren fransen im Bereich des beschädigten Schichtenverbunds die Fäden des Bildträgers aus. Quer zum Schnitt verläuft auf der Objektoberfläche ein Bleistiftstrich.

R_009 (►Abb. 134|): Die Malschicht des Realobjekts ist inkarnatfarbend und von einem seidenmatten Oberflächenglanz bestimmt. Abgebildet ist ein menschliches Auge. Die tendenziell globale helle Färbung wird von einer dunklen Augenbraue, einer braunen Iris und der schwarzen Pupille unterbrochen. Das hier verwendete Gemäldefragment stammt von einem Wachs-/Harz-doublierten Gemälde. Nach optischen Gesichtspunkten ist das Materialgefüge gealtert. Die Oberfläche weist ein feines Craquelé auf. Dieses zeichnet sich teilweise dunkel ab, wobei die feinen Risse mit Wachs gefüllt sind. Aufgrund der zwei Leinwände ist der Schichtenaufbau vergleichsweise starr. Vereinzelt finden sich

521 Zur Wiedergabe der Realobjekte wird im Folgenden auf Seiten der Messprotokollte verwiesen, auf denen Vorder- und Rückseite der Untersuchungsgegenstände abgebildet sind.

Fehlstellen der Mal- und Grundierschicht. Diese geben den Blick auf eine dunkelbraun oxidierte Leinwand frei.

R_032 (►Abb. 135|): Die Malschicht dieses Realobjektes wird durch eine matte, dunkle und tendenziell homogene Färbung bestimmt. Das Objekt kennzeichnet sich durch ein ausgeprägtes Craquelé mit teilweise breiten Rissen. Einhergehend dazu ist eine ausgeprägt zerklüftete Oberfläche in Form einer Schüsselbildung festzustellen. Vereinzelt haben sich Schollen gelöst, sodass Fehlstellen im Bildschichtengefüge auszumachen sind. Bei der Herstellung des Realobjektes – beim umlaufenden Beschnitt des aufgeklebten Bildschichtengefüges – haben sich, aufgrund des spröden Materialgefüges, entlang der Stirnseiten des Acrylglas-Rahmens Schollen gelöst. In diesen Fehlstellen ist der textile Bildträger zu sehen.

R_033 (►Abb. 136|): Dieses tendenziell jüngere Realobjekt besteht aus einer matten, monochrom-weißen Malschicht. Die Malschicht ist stark unterbunden und größtenteils am Pudern. So sind mehrfach Fehlstellen im Bildschichtengefüge zu attestieren, die einen Blick auf den textilen Bildträger gewähren. Zudem befinden sich feine Spritzer von rostroter Farbe auf der Malschicht.

R_038 (►Abb. 137|): Dieses Realobjekt kennzeichnet sich durch eine sehr vielseitige Oberfläche. So ist bei Aufsicht im linken Randbereich der textile Bildträger in heller Farbe zu sehen. Oben befindet sich auf dem Textil zusätzlich ein feiner, semi-transparenter Aufstrich in Form einer hellen Isolierung. Auch sind zwei verrostete Nagelköpfe von schwärzlich-roter Färbung sowie eine metallisch glänzende Tackerkrampe zu erkennen. Darüber hinaus befindet sich eine stark reliefierte, matte, rote Malschicht und in Teilen ein dicker, transparenter, stark glänzender Lack auf der Objektoberfläche. Durch das Bildschichtengefüge verläuft ein teils ausgeprägtes, gröber gegliedertes Craquelé. Die Risse in der Firnisschicht kennzeichnen sich mancherorts durch breite Spalten – wiederum werden in anderen Bereichen diese immer schmaler und verlieren sich teilweise gänzlich.

R_046 (►Abb. 138|): Dieses Realobjekt weist eine seidenmatt-glänzende Oberfläche mit mehreren, tendenziell dunkleren Blaufarbtönen auf. Die Malschicht ist vergleichsweise plan, jedoch durch ein feineres Craquelé gegliedert. An manchen Stellen ist der Beginn des Schadensbildes ‘Dachförmig aufstehende Malschicht’ auszumachen. Vereinzelt finden sich durch ein Craquelé vorgegebene Fehlstellen der Malschicht. In diesen Fällen ist die darunterliegende weiße Grundierung zu sehen.

Versuch: V_117
RO_001 bei 55,3 %RH (M_571)/ 58,9 %RH (M_572)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 3,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid



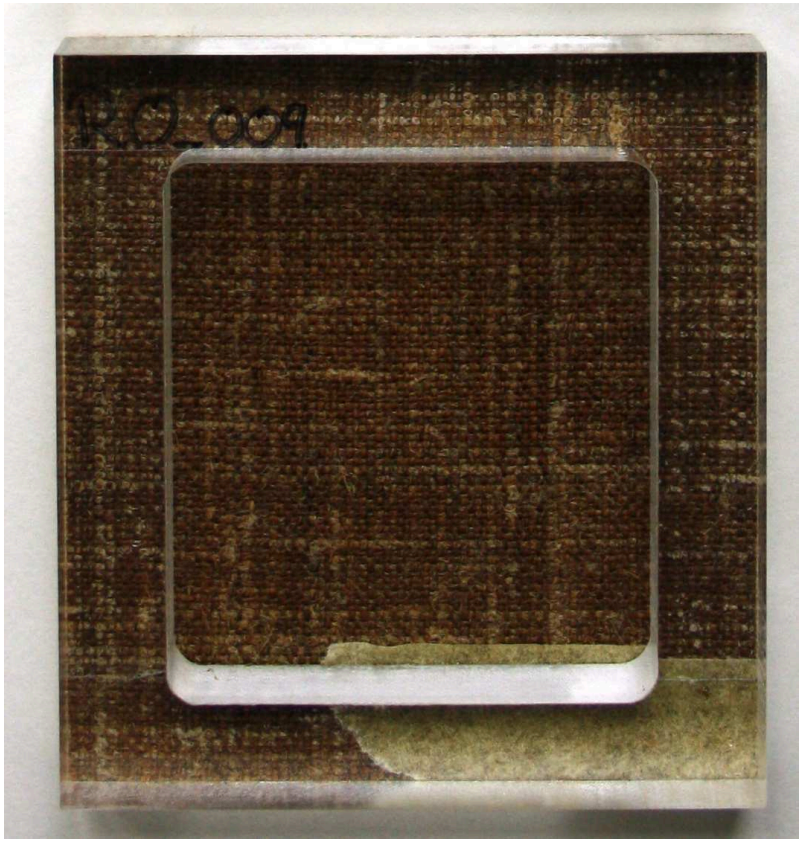


Objekt: RO_001 Benennung: Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 13.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 4

Abb. 133| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_001'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 117.
Quelle: Selbst

Versuch: V_120
RO_009 bei 55,3 %RH (M_575)/ 58,9 %RH (M_576)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 3,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid



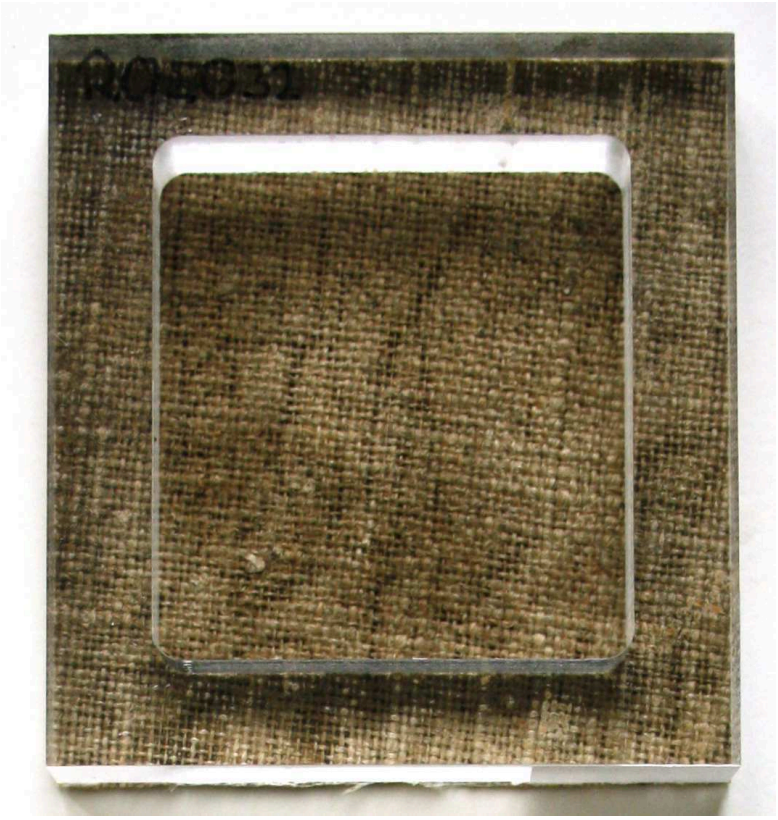


Objekt: RO_009 Benennung: Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 13.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 3

Abb. 134| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_009'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 120.
Quelle: Selbst

Versuch: V_123
RO_032 bei 55,3 %RH (M_579)/ 58,9 %RH (M_580)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 3,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid



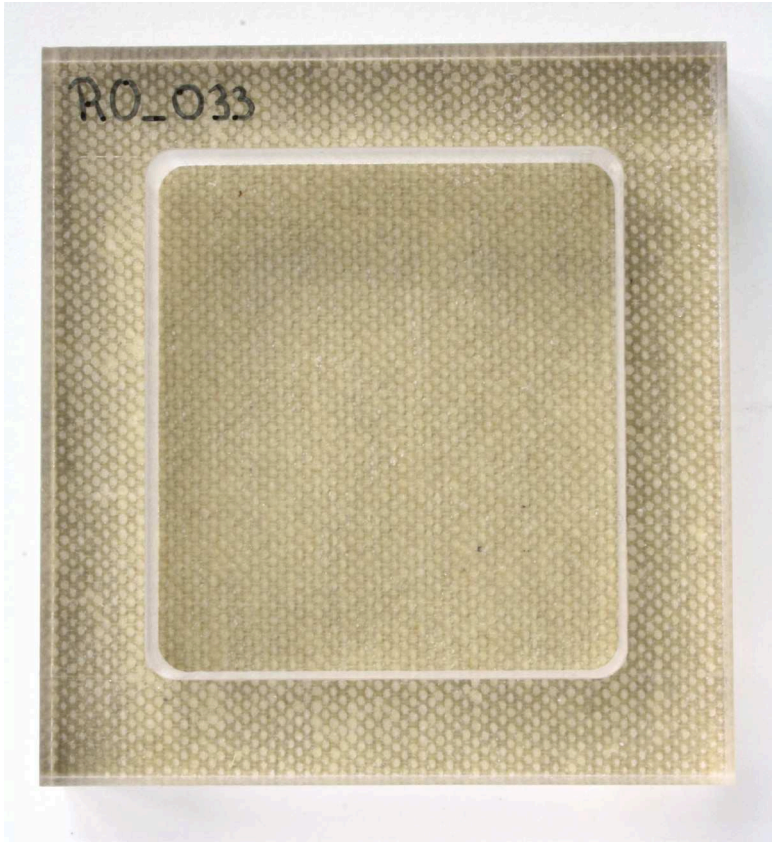


Objekt:	RO_032	
Benennung:	Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 3

Abb. 135| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_032'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 123.
Quelle: Selbst

Versuch: V_126
RO_033 bei 54,5 %RH (M_583) / 59,5 %RH (M_584)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 5,0 %RH (mit induzierter Verschmutzung)
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid





RO_033 bei 54,5 %RH (Soll-Daten)

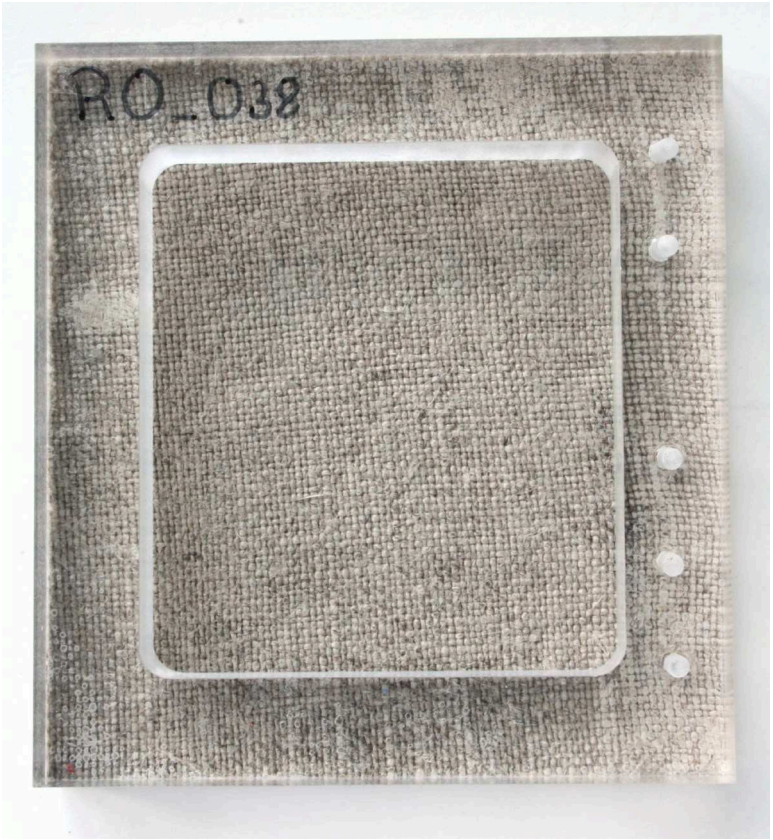
RO_033 bei 59,5 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	RO_033	
Benennung:	Hygroskopizität: 54,5 %RH - 59,5 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 15.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 136| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_033'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 126.
Quelle: Selbst

Versuch: V_129
RO_038 bei 54,5 %RH (M_587) / 59,5 %RH (M_588)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 5,0 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid



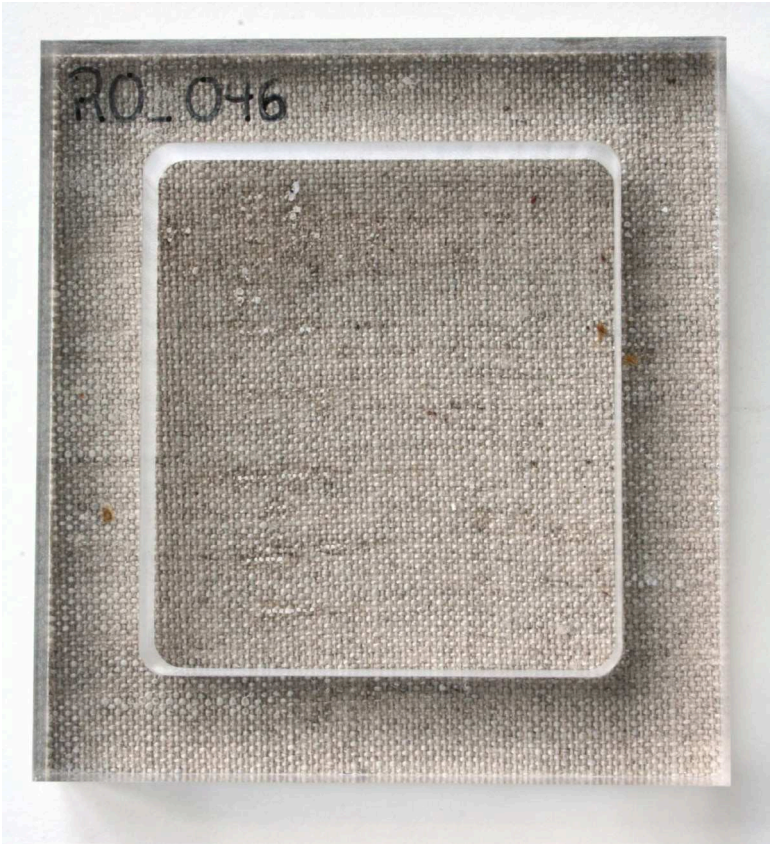


Objekt: RO_038 Benennung: Hygroskopizität: 54,5 %RH - 59,5 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 15.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 2

Abb. 137| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_038'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 129.
Quelle: Selbst

Versuch: V_132
RO_046 bei 54,5 %RH (M_591) / 59,5 %RH (M_592)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 5,0 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid





Objekt: RO_046 Benennung: Hygroskopizität: 54,5 %RH - 59,5 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 15.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 3

Abb. 138| Foto der Vorder- und Rückseite von 'RO_046'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 132.
Quelle: Selbst

19.3 Gemälde

Bei den verwendeten Gemälden handelt es sich um authentische, aber kulturhistorisch unbedeutende Objekte. Sie wurden aufgrund ihres Formates und ihrer generellen Verfügbarkeit gewählt. In der dritten Phase sollten Gemälde verwendet werden, die aufgrund ihres Alters und struktureller Merkmale, wie bspw. einer besonders pastosen Malschicht, einer ausgeprägten Schüsselbildung und eines empfindlichen Bildträgers ein höheres Veränderungspotenzial vermuten lassen. Nach restauratorischer Einschätzung ist diese Objektgruppe nicht transportfähig (G_001, G_002). Für die Phase vier hingegen wurden authentische Originale ausgewählt, die sich nach augenscheinlichen Kriterien durch ein stabiles Materialgefüge auszeichneten (eines auf textilem Bildträger (G_003) und ein weiteres auf Holzbildträger (G_004)). Aus restauratorischer Sicht werden sie als uneingeschränkt transportfähig eingestuft.

'G_001' (►Abb. 207|) Das Gemälde auf textilem Bildträger hat ein Format von 590 x 455 mm. Es handelt sich um die Darstellung eines Blumenstilllebens. Vor einem bläulichen Hintergrund ist mittig eine braune Vase mit weißen Rosen abgebildet. Das Gemälde weist die Abmessungen von 590x455 mm auf. Dem optischen Erscheinungsbild nach zu urteilen, handelt es sich um eine Ölmalerei, wobei eine Bindemittelanalyse nicht vorgenommen wurde. Die Malschicht ist vergleichsweise pastos aufgetragen. Im Bereich der Blütenblätter ist ein ausgeprägtes Relief festzustellen. Das Gemälde kennzeichnet sich durch einen vergleichsweise schlechteren Erhaltungszustand. So ist das Bildschichtengefüge durch ein Craquelé bestimmt. Zudem ist das Schadensbild 'Schüsselbildung' zu attestieren. Im Randbereich sind Restaurierungsmaßnahmen in Form einer Randanstückung augenscheinlich.

'G_002' (►Abb. 213|) Das Gemälde auf textilem Bildträger hat ein Format von 435 x 565 mm. Die Darstellung umfasst eine Landschaft mit einer Windmühle in der Bildmitte. Es ist in einem Zierrahmen fixiert. Auch hier handelt es sich nach optischen Gesichtspunkten um eine ölgebundene Malschicht. Der Erhaltungszustand ist vergleichsweise schlecht. Der Bildträger ist dunkel oxidiert und spröde. Weiter finden sich Löcher im Schichtenverbund, die unfachmännisch mit Papier- und Textil-Flicken hinterklebt sind.

'G_003' (►Abb. 218|) Das Gemälde auf textilem Bildträger besitzt ein Format von 385 x 625 mm. Es kennzeichnet sich durch eine extrem divergente Oberfläche: bunt gestreifte, sowohl helle als auch extrem dunkle Farbpartien, sowie eine einerseits matte und eine sehr glänzende Oberfläche andererseits. Da das Objekt aus eigener Herstellung des Autors stammt, ist das Bindemittelsystem und der maltechnische Aufbau des Gemäldes bekannt. Es handelt sich um eine Leim-Kreidegrundierung mit einer ölgebundenen Malschicht. Weiter ist die Oberfläche von einer sehr vielseitigen

Struktur bestimmt. Die Malschicht ist vergleichsweise glatt. Der teilweise sichtbare textile Bildträger weist eine rauhe, extrem zerklüftete Oberfläche auf – so sind Löcher vorhanden, in deren Randbereichen einzelne Textilfaser aufstehen. Der Gemälde wird daher aufgrund seiner heterogenen Struktur, der Farbigkeit und dem Glanz als verfahrens-unkoorperative eingeschätzt – was maßgeblich zur Objektwahl beiträgt.

'G_004' (►Abb. 230|) Das Gemälde auf hölzernem Bildträger hat das Format 218 x 176 mm. Konstitutiv zeigt das Gemälde zwei monochrome, aneinandergrenzende grünliche Farbflächen mit seiden-mattem Oberflächenglanz. Da das Gemälde aus eigener Produktion des Autors stammt kann der maltechnische Aufbau mit Eichenholz (stehende Jahrringe) als Bildträger angegeben werden, die Grundierung mit Leim-Kreide als Bindemittel und Füllstoff, sowie abschließend eine Ölmalschicht. Die Malschichtoberfläche ist vergleichsweise glatt und strukturlos. Der Erhaltungszustand wird als tadellos bewertet.

20. Experimenteller Ablauf

Die Experimente gliedern sich, wie eingangs erwähnt, in vier Etappen, die sich an der Fragestellung, den Untersuchungsobjekten bzw. der Versuchsumgebung orientieren. In der ersten Phase der Experimente sollen die Untersuchungsobjekte in speziellen Klimaboxen konditioniert werden (►Kapitel 20.1.1|). Ebenfalls in den Klimaboxen erfolgt die Konditionierung der Realobjekte – zweite Phase. Für die dritte Phase mit den Gemälden als Untersuchungsgegenstand ist aufgrund der Formatgröße der Einsatz einer entsprechend dimensionierten und eigens konstruierten Klimakammer geplant (►Kapitel 5.1.2|). In der vierten Phase soll die Laborumgebung verlassen werden – hier sind reale Gemäldetransporte anvisiert (►Kapitel 5.1.3|). Im Vorhinein und im Anschluss an die Belastung soll jeweils die Digitalisierung erfolgen.

20.1 Klimatische Gegebenheit / Konditionierung

Der Fragestellung nach den Folgen eines Kunsttransportes soll mit dem Augenmerk auf den Belastungsfaktor 'Klimaschwankung' nachgegangen werden. Bei den hierzu geplanten Laborexperimenten erfolgt die zeitkritische Belastung ausschließlich über den Parameter der relativen Feuchte, der gemäß eines Konditionierungskonzeptes gezielt beeinflusst wird. Die Temperatur sollte hierbei möglichst konstant bleiben.

In der ersten Phase, den Laborexperimenten an Probekörpern, liegt der Fokus der Belastung auf der Konditionierung über Extremwerte der relativen Feuchte. Diese sollen zu offensichtlichen, hygroskopischen Objektveränderungen führen, über die wiederum die messtechnische Verfahrenseignung belegt werden soll. Die Konditionierungsstrategie beinhaltet jedoch zugleich auch Werte im mittleren Bereich der relativen Feuchte. Sie dienen der Nachweisführung von Objektveränderungen auch bei geringeren Klimaschwankungen (<10 %RH). Gemäß den Empfehlungen der präventiven Konservierung stellt der Bereich um 55 %RH die Bezugsgröße für die Vergleiche von Trocknung und Befeuchtung dar (►Kapitel 6.1|). Alle Untersuchungsgegenstände in den folgenden Laborexperimenten werden daher über Magnesiumnitrat-Hexahydrat auf diesen Bereich (ca. 55 %RH) konditioniert. Folglich werden die daraus resultierenden 3D-Modelle für alle Experimente als 'Soll-Daten' definiert. Die Experimente an den Probekörpern sind im Vergleich zu den anderen Versuchsobjekten deutlich umfangreicher angesetzt, da unter anderem die Reproduzierbarkeit und kumulative Effekte untersucht werden sollen. In der zweiten Phase, also den Experimenten an Realobjekten, liegt der Fokus auf Konditionierungen im mittleren Bereich der relativen Feuchte. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus der ersten Phase wird der Versuch unternommen dieselben Klimata zu erzeugen. Analog zum vorangegangenen Klimatisierungsvorhaben ist die Konditionierung der Gemälde geplant – das betrifft Phase drei. In der vierten Phase soll kein aktiver Einfluss auf das Klima vorge-

nommen werden. Die Klimawerte ergeben sich aus der Realsituation des Umgebungsklimas während des Transportes. Zudem ist hier eine Abschirmung gegen Klimawechsel durch eine Verpackung anvisiert. Für die Laborexperimente gilt die Anforderung relative Feuchten zu erzeugen, die auch bei Schwankungen der Temperatur vergleichsweise konstant bleiben. Außerdem soll sich nach Möglichkeit das Verfahren aus pragmatischen Gründen bereits als gängige Methode in der Praxis bewiesen haben. Ein dementsprechendes Vorbild besteht bei der Befeuchtung von Klimavitrinen.[522] Konkret wird sich in der Vorlage auf die DIN EN ISO 483 2005 aus dem Jahr 2005 bzw. der Vorgängerversion aus dem Jahr 1999 und GREENSPAN bezogen.[523] Die Quellen gehen detailliert auf die Beschaffenheit kleiner Kammern, sowie auf die Konditionierung von Prüfgegenständen über wässrig-gesättigte Lösungen bei konstanter relativer Luftfeuchte ein. Die ausgewählten Konditionierungsstoffe sind in ►Tab. 28| zusammengefasst. Bisher ausgeklammert blieb die extreme Trocknung der Testobjekte (<10 %RH). Hierfür soll aufgrund der einfachen Anwendung 'Silikagel E' in trockener Konditionierung verwendet werden.

Gesättigte wässrige Salzlösungen	Relative Feuchte (%RF) in Abhängigkeit zur Temperatur (°C)					
	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	Literaturverweis
Kaliumcarbonat-Dihydrat	43	43	43	43	43	OHNE VERFF. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	56	54	53	51	50	OHNE VERFF. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5
Natriumbromid	61	59	58	56	55	GREENSPAN, 1977, Seite 92
Ammoniumnitrat	68	65	62	59	56	OHNE VERFF. (DIN EN ISO 483), 1999, Seite 6
Kaliumsulfat	98	98	97	97	97	OHNE VERFF. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5

Tab. 28| Tabelle über die verwendeten Konditionierungsstoffe und die damit zu erzielenden Konstantklimata.
Quelle: Selbst, nach Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5; Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 1999 , Seite 6; Greenspan, 1977 Seite 92

20.1.1 Versuchsumgebung Klimabox

Zur Konditionierung der Probekörper und Realobjekte sind als Versuchsumgebung Befeuchtungsboxen konzipiert. In diesen hermetisch verschließbaren Behältnissen (Maße: 85 x 230 x 170 mm) befindet sich zugleich als Bodensatz der Konditionierungsstoff (►Abb. 140| - Abb. 143|). In die Befeuchtungsboxen selbst wird ein Tablar aus Acrylglas gestellt, auf dem sich die Versuchsobjekte und der Datenlogger befindet.[524] Durch die Erhöhung weisen beide keinen direkten

522 Vergleiche: Stolow, 1987, Seite 168 f.

523 Vergleiche: Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5; Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 1999, Seite 6; Greenspan, 1977, Seite 92. Der letztgenannte Autor geht hierbei auf Salze ein, die in den DIN-Normen nicht mehr berücksichtigt werden. Vergleiche: Greenspan, 1977, Seite 89-96,

524 Zur Verifizierung der Messgüte der drei verwendeten Datenlogger wurden diese hinsichtlich ihrer Abweichung bei der Detektion von Temperatur und relativer Feuchte untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Datenlogger in eine Klimakammer gelegt und über die Gerätesoftware auf einen gemeinsamen Startzeitpunkt und die gleichen Registrierungs-Intervalle eingestellt. Bei allen Datenloggern sind die Abweichungen zwischen den gemessenen Temperaturen vernachlässigbar gering. Lediglich bei den ermittelten Messdaten zur relativen Feuchte steht die größten Abweichungen in wechselseitiger Beziehung zu ‚Logger_02'. So quantifiziert sich die Abweichung zwischen ‚Logger_01' und ‚Logger_02' im Mittel mit Δ 0,03 °C und Δ 0,64 %RH (►Kapitel 29.18|). Wiederum betrug die mittlere Abweichung zwischen den Messwerten von ‚Logger_03' und ‚Logger_02' bei der Temperatur Δ 0,06 °C und bei der relativen Feuchte Δ 0,64 %RH. Als mittlere Abweichung der Ergebnisse zwischen ‚Logger_01' und ‚Logger_03' konnte bei der Temperatur Δ 0,08 °C bestimmt werden und bei der relativen Feuchte Δ 0,03 %RH. Diese Differenz ist von nicht nennenswerter Größe. Demzufolge wurde die Messgüte aller Datenlogger für die

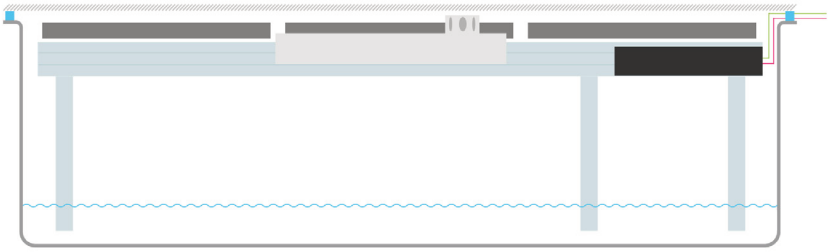


Abb. 140| Grafik zum Querschnitt durch eine Befeuchtungsbox.
Quelle: Selbst

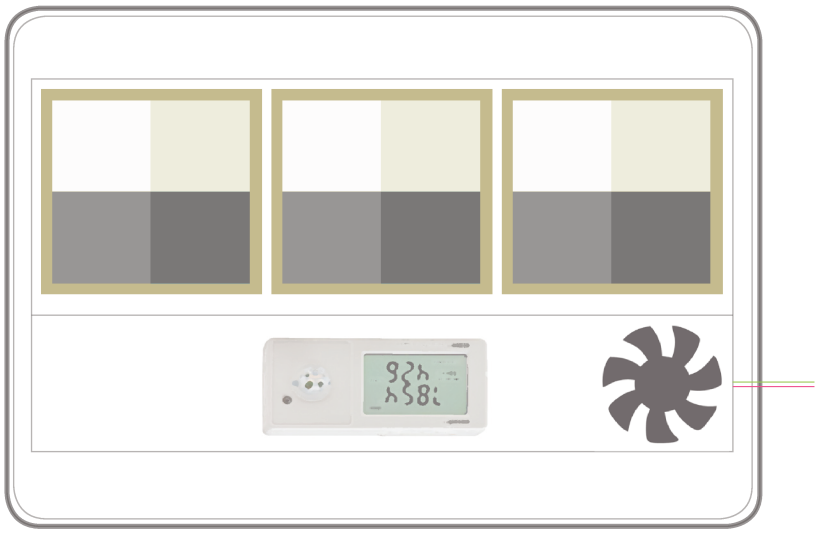


Abb. 139| Grafik zur zur Aufsicht auf eine Befeuchtungsbox.
Quelle: Selbst

Kontakt zum Bodensatz auf. Ein am Tablar befestigter Ventilator sorgt für die nötige Luftumwälzung.[525] Der Verschluss der Befeuchtungsboxen erfolgt mittels einer 'Mirogard Plus-Glasscheibe', sodass die darin befindlichen Versuchsobjekte direkt während der Klimatisierung digitalisiert werden können. Für die Abdichtung wird eine knetbare Dichtungsmasse verwendet, durch die hindurch auch die Kabelführung zur Stromversorgung des Ventilators verläuft. Zur Optimierung der Diffusion zwischen Versuchsobjekt und Umgebungsklima wird der Auflagebereich der Versuchsobjekte mit großen Bohrungen ausgestattet. Neben den Kanten und der Vorderseite kann damit auch ein gleichzeitiger Luftfeuchteaustausch über die Rückseite der Versuchsobjekte erfolgen, was die Akklimatisierung beschleunigt. In Anlehnung an das Format von Probekörpern und Realobjekten wurden die Abmessungen des Tablars so gewählt, dass drei Versuchsobjekte

folgenden Versuchsreihen als ausreichend bewertet.

Bei den verwendeten Datenloggern handelt es sich um das Modell ‚HOBO UX 100-011' der Firma ‚Onset'. Herstellerseitig wird der Messbereich mit -20 °C bis 70 °C und 1 %RH bis 95 %RH angegeben. Die Messgenauigkeit wird bei der Temperatur mit ±0,21 °C im Bereich von 0 °C bis 50 °C und bei der relativen Feuchte mit ±2,5 %RH im Bereich von 10 %RH bis 90 %RH angegeben. Vergleiche: Onset Computer Corporation, 2012

525 Die ersten Versuchsreihen wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 483:2005 ohne Luftumwälzung durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse wurden jedoch aufgrund umfangreicher Streuung in ihrer Gesamtheit verworfen. Der Hauptgrund hierfür war, dass trotz der verwendeten gesättigten Salzlösungen, die eigentlich eine konstante Feuchte gewährleisten sollten, Schwankungen der relativen Feuchte von bis zu 10% detektiert wurden. Durch eine unterschiedliche Anordnung der Datenlogger, über und unter dem Tablar, konnte die Fehlerquelle schließlich bestimmt werden. Zwischen der Oberfläche des Tablars und der abschließenden Glasscheibe hatte sich nachweislich eine passivierende Luftschicht geringerer relativer Feuchte gebildet. Demzufolge konnten die Probekörper nicht zuverlässig und reproduzierbar konditioniert werden, was zu verfälschten Ergebnissen führte. Durch einen folgenden Umbau des Tablars mit integrierter Luftumwälzung konnte das Problem behoben werden.

auf einmal konditioniert werden können. Hierdurch ist bei den Probekörpern die Vorraussetzung für den anvisierten direkten Vergleich der drei verschiedenen Bindemittelsysteme der Malschichten in Bezug auf das selbe Klima erfüllt. Da zur Bestimmung möglicher Dimensionsänderungen auch die Stirnseiten der Versuchsobjekte erfasst werden sollen – in Orientierung an die Ergebnisse der Vorversuche: Sensorneigung 55° – befindet sich zwischen ihnen ein kleiner Abstand. Um Verschattungen durch die Kanten der Befeuchtungsboxen zu umgehen, werden die Proben nah an der Glasscheibe positioniert.[526]

Im Zuge effizienter Arbeitsabläufe sollen, einem modularen Versuchsaufbau folgend, entsprechend klimatisierte Befeuchtungsboxen vorgehalten werden. In diese werden dann in festgelegten, zeitlichen Intervallen die Tablare mit den Proben gestellt (►Abb. 141|). Der Zeitraum der Konditionierung wird für alle Versuche mit vierundzwanzig Stunden bestimmt. Nach durchgeführter Konditionierung und abschließender Digitalisierung soll die Verlagerung der Proben, einem Rotationsprinzip folgend, in eine der übrigen Klimaboxen vorgenommen werden. Eine entsprechende Wiederholung dieser Abfolge ist geplant.

Für die Digitalisierung eines Versuchsobjektes sind jeweils vier Einzelmessungen angesetzt. So können auch die Stirnseiten erfasst werden. Durch ein 'Matching' sollen auf diese Weise möglichst vollständige 3D-Modelle erzeugt werden. Der grundsätzliche Arbeitsablauf der Digitalisierung und Datennachverarbeitung ergibt sich aus dem oben entwickeltem Prozessablaufdiagramm (►Kapitel 13.3| und Abb. 64|).



Abb. 141| Versuchsaufbau mit den vier zur Feuchtekonditionierung eingesetzten Klimaboxen. Im Hintergrund befindet sich das Labornetzgerät zur Steuerung und Stromversorgung der luftumwälzenden Ventilatoren.
Quelle: Selbst

526 Die Anordnung der Proben auf dem Tablar erfolgte über eine Positionierungsschablone. Zur Fixierung der Position wurden sie rückseitig über eine kleine, mittige, temporäre Wachsklebung am Tablar befestigt. Die mittige Fixierung stellte weiterhin die hygroskopisch bedingte Bewegung der Probekörper in alle Dimensionen sicher.



Abb. 142| Aufsicht auf die unbefüllte Befeuchtungsbox.
Quelle: Selbst



Abb. 143| Aufsicht auf die mit den drei Probekörpern befüllte Befeuchtungsbox. Bei diesem Foto sind die Probekörper vorderseitig noch nicht beschriftet. In den Vorversuchen zur Entwicklung des Versuchs- und Auswertungsablaufs erwiesen sich die Digitalisate als so ähnlich, dass die Gefahr der Verwechselung bestand. Um dieses Fehlerpotenzial auszuschließen, erfolgte die Beschriftung gemäß einer fortlaufenden, einmaligen Probekörpernummer.
Quelle: Selbst

20.1.2 Versuchsumgebung Klimakammer

Die Klimakammer folgt hinsichtlich ihrer Konstruktion prinzipiell den Merkmalen der oben beschriebenen Befeuchtungsboxen. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Größe (Maße: 800 x 800 x 400 mm), sodass ganze Gemälde konditioniert werden können. Auch hier ist die Digitalisierung während der Konditionierung geplant. Dementsprechend ist die aus Acrylglas bestehende Klimakammer an der Front mit einer 'Mirogard Plus-Glasscheibe' versehen durch die hindurch gemessen werden kann (►Abb. 144| und Abb. 145|). Der Verschluss zwischen Glasscheibe und Kammer erfolgt über Klebeband. Ferner muss der verhältnismäßig größere Konditionierungsraum berücksichtigt werden, sodass entsprechend große Verdunstungsflächen zu gewährleisten sind. Um zugleich variabel bei der Klimatisierung zu sein, ist der Bodenbereich der Klimakammer mit mehreren mobilen Wannen ausgestattet, in denen wiederum die Konditionierungsstoffe vorgehalten werden. Die Lutfumwälzung erfolgt abermals über einen Ventilator.



Abb. 144| Frontalsicht auf die Klimakammer. Im Bodenbereich der Kammer sind die Boxen mit dem Konditionierungsstoff zu erkennen. Das Untersuchungsobjekt befindet sich, über diesen stehend, auf einem Tablar. Links vom Gemälde ist der Ventilator zur Luftumwälzung zu sehen. An der rechten Seitenwand befindet sich im Kammerinnenraum der Datenlogger. Der obere Teil der Front ist mit einer 'Mirogard Plus-Glasscheibe' versehen. Die Abdichtung und Fixierung erfolgt mittels Klebeband (blau).
Quelle: Selbst



Abb. 145| Seitensicht auf die Klimakammer.
Quelle: Selbst

20.1.3 Versuchsumgebung Transport

Bei dem Gemäldetransport findet keine bewusste Klima-Konditionierung statt. Hingegen soll das Objekt durch Verpackung vor Klimaschwankungen geschützt werden. Aufgrund eines einzelfallspezifischen Vorganges kann hier kein exemplarischer Ablauf geschildert werden. Somit wird dezidiert auf die Ausführungen der betreffenden Experimente verwiesen (►Kapitel 25|).

20.2 Datenerhebung, Datennachverarbeitung und Dokumentation

Im Anschluss an die Konditionierung erfolgt die Digitalisierung der Untersuchungsgegenstände. Da diesbezüglich objektspezifische Messanforderungen zu berücksichtigen sind und die Digitalisierung selbst individuelle Sensoreinstellungen erfordert, sind über die Datenerhebung keine verallgemeinernden Angaben möglich. Gemäß der bisherigen Vorgehensweise werden die Metadaten einer Messung in Form einer tabellarischen Übersicht zusammengefasst. Zudem werden dort auch die Parameter der Triangulation und der Datennachverarbeitung, die Versuchs- und die Messungsnummer aufgeführt, sowie

der Untersuchungsgegenstand benannt. Gleiches gilt für die Klimasituation zum Zeitpunkt der Digitalisierung.[527]

20.3 Auswertungsstrategie der Experimente

Im konkreten Zusammenhang des forcierten Monitorings bezieht sich die Auswertung der Experimente auf den Soll-Ist-Vergleich und eine Beurteilung der erhobenen Daten. Hierfür ist jedoch zunächst eine entsprechende Datenaufbereitung notwendig. Im Wesentlichen umfasst dieses die Arbeitsschritte: Ausrichtung, Referenzierung, Vergleiche und Dokumentation. Die Datenverarbeitung und -aufbereitung schließt sich unmittelbar an die Datenerhebung und Datennachverarbeitung an. Methodisch greifen hierbei, wie bereits erwähnt, 'COMETplus' und 'INSPECTplus' ineinander (►Kapitel 13.5|).
Die Auswertungssoftware 'INSPECTplus' wird aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen und Möglichkeiten der Bezüge autorenseitig als vergleichsweise komplex eingeschätzt. Sie erlaubt jedoch die Konzeption einer umfangreichen Auswertungsstrategie. Wie sich zeigen wird, ermöglicht dieses die Beantwortung zahlreicher Fragestellungen setzt gleichwohl eine dezidierte Planung der Experimente und eine festgelegte Auswertungsstrategie voraus. Im Folgenden wird die methodische Vorgehensweise erörtert, nach der die Experimente ausgewertet werden sowie die Möglichkeiten und Grenzen der Software skizziert.



Abb. 146| Probekörper mit eingeblendeten Koordinatenachsen und Ursprung des Koordinatensystem.
Quelle: Selbst

20.3.1 Ausrichtung der Daten ('COMETplus')

Die auszuwertenden Datensätze müssen zunächst in 'COMETplus' ausgerichtet werden. Dieser Arbeitsschritt wurde bereits oben ausgeführt (►Kapitel 13.4.3|). Er ist ein wichtiger Bestandteil der Auswertungsstrategie, da bspw. Schnittlinien, Ebenen und andere virtuelle Auswertungswerkzeuge durch die Achsengeometrie des Koordinatensystems vorgegeben werden können. Da an diese der Anspruch auf Reproduzierbarkeit besteht ist eine exakte Arbeitsweise geboten.[528] Dementsprechend ist die '3-Ebene-Ausrichtung' oder die '3-2-1-Ausrichtung' anzuwenden.[529]

20.3.2 Referenzierung der Daten ('INSPECTplus')

Nach der räumlichen Ausrichtung der Datensätze erfolgen die weiteren Arbeitsschritte in 'INSPECTplus'. Für die Auswertung müssen die Datensätze zunächst importiert werden. Aufgrund des vorangegangen Arbeitsschrittes weisen beide 3D-Modelle in der gemeinsamen 'Viewer-Ansicht' eine ungefähr vergleichbare räumliche Position und

527 Die Metadaten sind jeweils dem Messprotokoll vorangestellt und befinden sich, wenn nicht hier abgedruckt, auf dem dieser Schrift beiliegenden Datenträger.

528 Für alle Probekörper und Realobjekte wird definiert, dass sich der Nullpunkt der Koordinatenachse bei der unteren, linke Ecke befindet. Damit entspricht die Betrachterachse der Z-Achse des Koordinatensystem und die Malschichtoberfläche jener Ebene, die durch die X-/Y-Ebene aufgespannt wird (►Abb. 146|).

529 Die ‚3-Ebenen-Ausrichtung' konnte bei verformten Holzprobekörpern nicht angewandt werden. Der ausschließende Grund ergab sich daraus, dass die Flächen nicht mehr orthogonal zueinander standen. Alternativ kann jedoch die komplexere ‚3-2-1-Ausrichtung' genutzt werden.

Ausrichtung auf – die Datensätze durchdringen einander bereits und kennzeichnen sich durch gleiche Ebenenorientierung (►Abb. 147|). Zur Differenzierung beider Datensätze empfiehlt es sich, jedem Datensatz eine spezifische Farbe zuzuweisen, was über seine Eigenschaften erfolgen kann.

Der nächste Schritt sieht eine exakte Referenzierung der Datensätze vor. Über eine Ausrichtung werden beide 3D-Modelle miteinander in Beziehung gesetzt und möglichst passgenau aufeinander ausgerichtet. Generell gilt, dass Ungenauigkeiten bei der räumlichen Ausrichtung der beiden 3D-Modelle direkten Einfluss auf die Beurteilung ihrer Disproportionalität haben. Da in Bezug auf die Korrelation zwischen Klimaschwankung und Objektveränderung insbesondere die Geringfügigkeitsgrenze relevant ist, muss die Referenzierung der beiden 3D-Modelle so exakt wie möglich durchgeführt werden. Bevor softwareseitig hierfür eine automatische Berechnung der Ausrichtung gemäß der größten Übereinstimmung erfolgen kann, ist eine manuelle 'Vorausrichtung' durchzuführen.[530] In dieser werden benutzerseitig über korrespondierende Punktepaare markante Objektpunkte der beiden Datensätze bestimmt und eine erste Annäherung berechnet (►Abb. 148| und Abb. 149|).[531]



Abb. 147| Nach dem die 3D-Modelle in 'COMETplus' grob ausgerichtet und in 'INSPECTplus' importiert worden sind, weisen sie bereits eine ähnliche räumliche Lage auf.
Quelle: Selbst

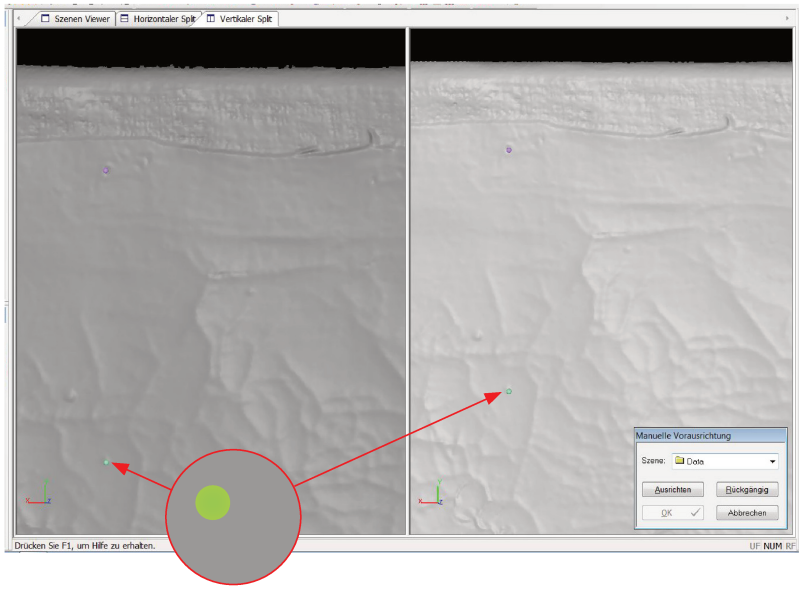


Abb. 148| Bei der 'Manuellen Vorausrichtung (mit Einzelpunkten)' findet anhand korrespondierender Objektpunkte eine erste Ausrichtung statt. In der Abbildung sind die Punktepaare als kleine Kugeln ersichtlich.
Quelle: Selbst

Die finale räumliche Ausrichtung der beiden Datensätze erfolgt softwareseitig über die 'Best-Fit Ausrichtung'. Hierbei werden die Ist-Daten mathematisch bestmöglich passend auf die Soll-Flächen transformiert.[532] Vor dem Hintergrund der anvisierten

530 Für die ‚Vorausrichtung' ist die Selektion des geteilten ‚Szenen-Viewer' (‚Horizontaler Split' oder ‚Vertikaler Split') erforderlich, sowie die Wahl des Drop-down-Menü ‚Ausrichtung' → ‚Manuelle Vorausrichtung (mit Einzelpunkten)'.

531 Nach Bestätigung der Taste ‚Ausrichten' erfolgt die Berechnung. Weiter kann der Erfolg dieses Arbeitsschrittes im ungeteilten ‚Szenen-Viewer' kontrolliert, gegebenenfalls wiederholt oder durch Drücken der Taste ‚OK' bestätigt und abgeschlossen werden.

532 Die Berechnung der bestmöglichen Punktekorellation ist nur im geteilten ‚Viewer-Modus' möglich. Bei der ‚Best-Fit-Ausrichtung' stehen dem Benutzer verschiedene Einstellungen zur Verfügung (►Abb. 149|).

Die ‚Automatische Vorausrichtung' sollte dann gewählt werden, wenn in den Vorarbeiten die ‚Manuelle Vorausrichtung (mit Einzelpunkten)' nicht angewandt wurde. Die

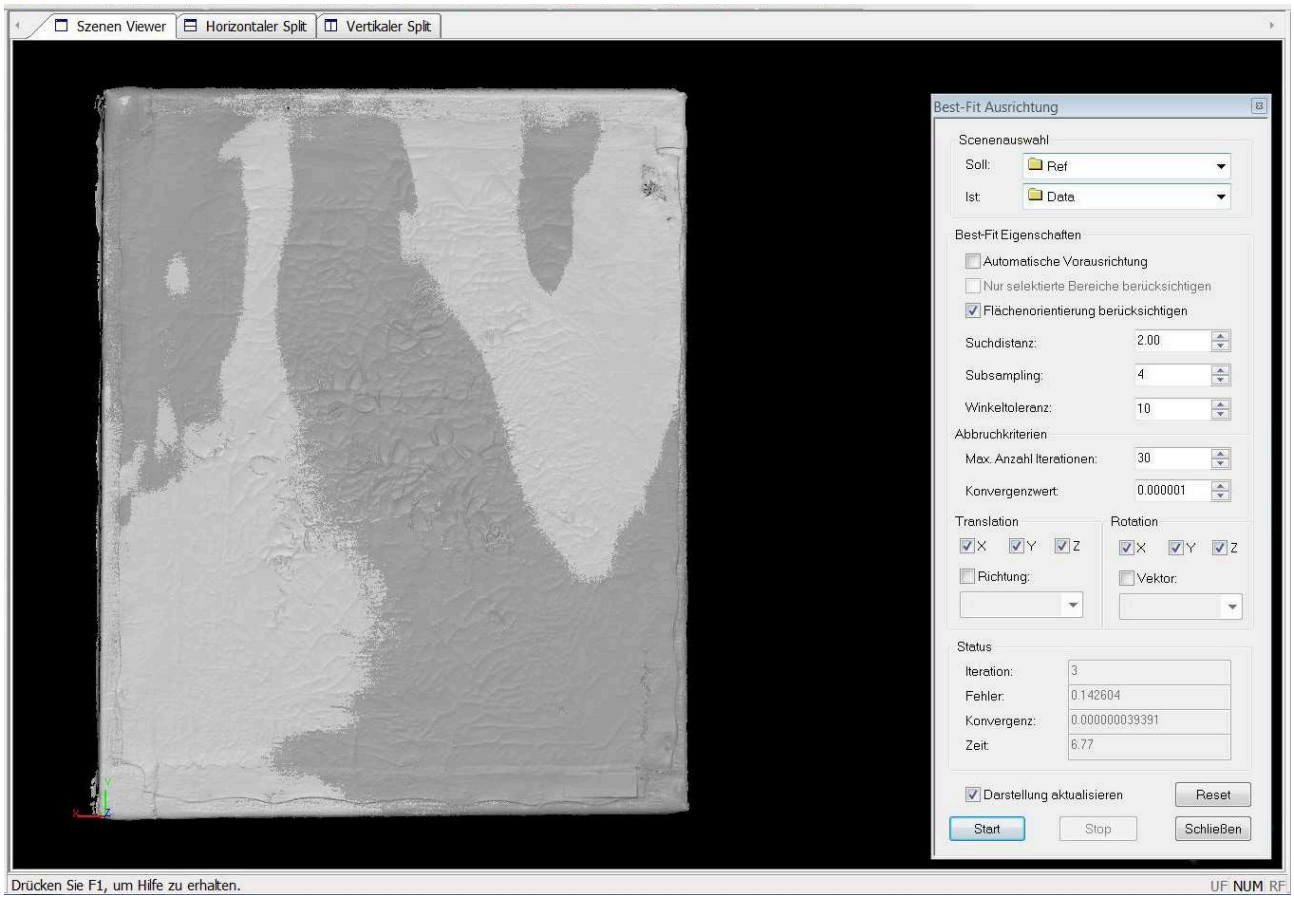


Abb. 149| Ergebnis der 'Manuellen Vorausrichtung (mit Einzelpunkten)', Anhand der Grauwerte der 3D-Modelle kann eine erste Passgenauigkeit, bzw. Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Datensatz qualitativ abgeschätzt werden. Abgebildet ist auch der Dialog zur Eingabe der Werteparameter.
Quelle: Selbst

Transportschadensdetektion besitzt die beschriebene Variante den Vorteil, dass unabhängig jeglicher Referenzkulissen/-Objekte die Ausrichtung mathematisch erfolgt, indem die Beziehung der Knotenpunkte der Dreiecksnetze ermittelt wird. Mögliche Abweichungen werden so gleichmäßig verteilt, bzw. bestmöglich ausgeglichen. Durch die Benutzereinstellungen bleiben hingegen jene Werte, die

Systemerprobung zeigte jedoch, dass es immer sinnvoll ist zuvor die Operation ‚Manuelle Vorausrichtung (mit Einzelpunkten)' durchzuführen. Andernfalls sind bei der ‚Best-Fit Ausrichtung' gehäuft Systemabstürze zu verzeichnen. Weiter muss das Kontrollkästchen ‚Flächenorientierung berücksichtigen' selektiert sein. In diesem Fall werden ausschliesslich jene Ist-Punkte auf die Soll-Fläche gezogen, wenn beide Normalen die gleiche räumliche Orientierung aufweisen. Über den Wert der ‚Winkeltoleranz' kann eingestellt werden, bis zu welchem Winkelmaß eine Soll-Fläche gegenüber einer Ist-Fläche verkippt sein darf, um bei der Ausrichtung berücksichtigt zu werden. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 135] Zudem ist die 'Suchdistanz' entscheidend, da mit diesem Wert festgelegt wird, welcher Ist-Punkt bei der Optimierung auf die Soll-Fläche bewegt wird. Nur wenn der Abstand kleiner oder gleich diesem Wert ist, wird der Ist-Punkt bei der Berechnung berücksichtigt. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 134] So wird empfohlen die Berechnung der 'Best-Fit-Ausrichtung' mehrfach durchzuführen und gemäß einer iterativen Strategie den Wert zunächst etwas größer zu wählen und später zu verringern. Selbiges gilt für die Funktion 'Subsampling'. Hierüber wird angegeben, ob alle Ist-Punkte bei der Berechnung mit einbezogen werden oder bspw. bei der Eingabe der Ziffer zwei nur jeder zweite, vierte etc., berücksichtigt wird. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 135] Um das Risiko von Systemabstürzen zu minimieren, bietet es sich an, zunächst mit einem größeren Wert zu beginnen. Entsprechend der Menge der zu verarbeitenden Daten ist die Berechnung sehr langwierig. Bei der 'Best-Fit-Ausrichtung' der Probekörper kann eine erste Berechnung der Ausrichtung der 3D-Modelle, bei einem großzügig angegebenem Wert des 'Subsampling' von 10, bis zu zwanzig Minuten dauern. Die weitere Ausrichtung erfolgt dann in mehreren Iterationsschritten, deren Anzahl wiederum vom Benutzer über den 'Konvergenzwert' einzustellen ist – wobei dann der Wert des 'Subsampling' stetig verringert werden sollte. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 135] Wird der 'Konvergenzwert' erreicht, so bricht die Optimierung ab und die 'Best-Fit-Ausrichtung' ist erreicht.

signifikant aus dem Gesamtgefüge herausfallen unangepasst, sodass neben der Identifikation globaler Veränderungen auch die Rückschlussbildung auf lokale möglich ist.[533]

Der Erfolg der Ausrichtung kann quantitativ über die Standard-Abweichung, die Mittlere-Abweichung, die Kleinste-Abweichung und die Größte-Abweichung bewertet werden (►Abb. 150|). Der letztgenannte Wert ist für die Erstellung der Farbskala des folgenden Flächenvergleiches relevant. Die Standard-Abweichung gibt vorzeichenneutral die Passgenauigkeit der beiden virtuellen Modelle an und ist damit ein Indikator für die Dimensionsänderung. Damit wird diesem Wert in der quantitativen Auswertung eine entscheidende Bedeutung beigemessen – er findet daher auch in der statistischen Auswertung der Experimente seine Berücksichtigung.



Abb. 150| Bildschirmfoto zu den Metadaten der Ausrichtung mit quantitativen Angaben über bestehende Abweichungen. Diese ermöglichen eine erste Bewertung der Ausrichtung. Quelle: Selbst

20.3.3 Auswertung der Daten über den Soll-Ist-Vergleich ('INSPECTplus')

Für die Visualisierung und Berechnung der Abweichung zwischen den Soll- und den Ist-Daten stehen in 'INSPECTplus' eine Reihe von Funktionen zur Verfügung.[534] Die Möglichkeiten werden im Folgenden vorgestellt und gliedern sich methodisch in eine bildgebende und eine darauf aufbauende, statistische Auswertung.

20.3.4 Bildgebende Auswertung

Die Bildgebende Auswertung basiert auf dem Soll- und dem Ist-Datensatz. Erst durch die bildgebende Auswertung werden Bezüge und Vergleiche zwischen den 3D-Modellen hergestellt und visualisiert. Darauf beruhend sind sowohl qualitative als auch quantitative Rückschlüsse möglich.

'Viewer-Ansicht'

Bereits die 'Viewer-Ansicht' gewährt erste qualitative Rückschlüsse über die beiden 3D-Modelle. Soll hier eine direkte Gegenüberstellung von Vor- und Nachzustand erfolgen, so eignet sich die geteilte 'Viewer-Ansicht'. Benutzerseitig können die Datensätze positioniert und in unterschiedlichen Ansicht nach optischen Merkmalen auf Diskrepanzen untersucht werden. Nach der 'Best-Fit-Ausrichtung' durchdringen sich die beiden unterschiedlich eingefärbten 3D-Modelle, sodass etwaige Diskrepanzen zwischen dem Soll- und dem Ist-

533 In den eigenen Vorarbeiten kennzeichnete sich der Referenzierungsfehler als eine zentrale Verfahrenslimitierung. Damals erfolgte die Referenzierung über einen statischen Referenzquader mit orthogonalen Flächen der jeder Messung beilag. Während der selben blieb das räumliche Verhältnis dem Prinzip nach unverändert, wobei die Einschränkung anzuführen ist, dass aufgrund der klimasensitiven Eigenschaften der Probekörper reale räumliche Veränderungen festzustellen waren. Diese führten mitunter zu einer erheblichen Beeinflussung der Ergebnisse. [Vergleiche: Hein & Krekel, 2010, Seite 135 f. und 142 f.] Genau genommen ist diese Referenzierungsmethode für nicht statische Objekte ungeeignet, da die Klimasensitivität Untersuchungsgegenstand und Fehlerquelle zugleich wäre.

Im Rahmen industrieller Anwendung, bspw. zur Materialprüfung, ist die Referenzierung von Soll-Ist-Zuständen oftmals weniger komplex, da dort in der Regel statische Objekte untersucht werden. So können bspw. im Fahrzeugbau Metallgestelle mit Referenzkulissen verwendet werden, in die die Bauteile über Bohrungen und Flansche exakt und reproduzierbar eingepasst werden können.

534 Prinzipiell ist in ‚COMETplus' ein Vergleich nur zwischen zwei Datensätzen möglich. Sollen mehrere Datensätze miteinander verglichen werden, so ist hierfür ein Bezugs-Datensatz zu bestimmen auf den sich die übrigen beziehen.

Datensatz anhand von Überlagerungen und/oder Verschiebungen abgelesen werden können.

Falschfarbendarstellung

Die in den Protokollen abgebildeten Falschfarbendarstellungen ermöglichen sowohl qualitative als auch quantitative Rückschlüsse hinsichtlich der Oberflächenverformung. Erstgenannte umfassen, bspw. bei den Holzprobekörpern, die globale Verformung in konvexe oder konkave Richtung. Zweitgenannte gibt bspw. den Grad der Verformung an. Maßgeblicher Vorteil ist die Quantifizierung der Abweichung zwischen den Soll- und den Ist-Daten über Farbwerte, deren Größenordnung sich über eine zugehörige Farbskala ableiten lässt (►Abb. 154|).[535] Diese Darstellung ist daher nicht als eine direkte Überlagerung zweier virtueller Modelle zu verstehen, sondern vielmehr als die Darstellung ihrer Diskrepanz. Die Färbung ermöglicht Rückschlüsse über globale aber auch lokale Abweichungen.

Verschnittebene

Durch Verschnittebenen können Querschnitte der 3D-Modelle ausgewertet werden. Die Schnittebene befindet sich in orthogonaler Ausrichtung zu jeweils einer Koordinatenachse. Ihre Positionierung ist beliebig, orientiert sich jedoch in den vorliegenden Fällen am Ursprung des Koordinatensystems (►Abb. 146|). Jene Messepunkte, die auf der Verschnittebene liegen, werden nach Ausblendung der 3D-Modelle als Schnittlinien dargestellt. Darüber hinaus besteht die Auswertungsmöglichkeit in Form von Serienschnitten, wobei die Schnitt-Frequenz variabel ist. Bei dem 'Schnittvergleich' handelt es sich um eine selektive Betrachtung, da benutzerseitig Position und räumliche Lage der Schnitteben definiert werden.[536] Da die Schnittlinien aufgrund ihres Bezuges zum Koordinatensystem reproduzierbar sind, findet das Verfahren seine Anwendung insbesondere im Querschnittvergleich mehrerer Zustände desselben Objektes (►Abb. 146| und Abb. 152|).[537]

535 Nach dem Öffnen des Dialogfensters ‚Flächiger Soll-Ist-Vergleich' über das Dropdown-Menü ‚Vergleich' → ‚Flächenvergleich' sind die zu vergleichenden Datensätze zu selektieren. Die Funktion ‚Bearbeite Farbskala' ermöglicht eine benutzerseitige Justierung der Abstufung (‚Intervalle') -, also die Bearbeitung der Relation der ‚Farbtabelle' zu den Zahlenwerten. Weiter Einstellungsmöglichkeiten sind dem Benutzerhandbuch zu entnehmen. [Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 139 f.] Grundlage des Vergleiches sind die Soll-Daten (grau dargestellt).

536 Die Funktion ‚Schnittvergleich' ist über den gleichnamigen Menüpunkt zu selektieren. Grundsätzlich können beliebig viele, unterschiedlich positionierte ‚Schnittvergleiche' erstellt werden. Dem Prinzip nach können beim ‚Schnittlinienvergleich' zwei Strategien voneinander unterschieden werden. Entweder wird als Verschnittebene eine bestehende Ebene gewählt (Dialogfenster: ‚Vergleich ebener Schnitte' → ‚Ebene' → ‚Vorhandene Ebene'), oder die Schnittebene wird über eine frei wählbare Entfernung entlang einer der Koordinatenachsen definiert (Dialogfenster: ‚Vergleich ebener Schnitte' → ‚Ebene' → ‚Hauptebene'). Hierbei ist der Nullpunkt der Bezugspunkt, wobei in diesen Fällen zu definieren ist zu welcher Koordinatenachse die rechtwinkelige Schnitteben berechnet wer soll den. Die Einstellungen der Variablen für die Berechnung des ‚Schnittlinienvergleich' können dem Benutzerhandbuch der Auswertungssoftware entnommen werden. Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 140 ff.

537 So wird aus Gründen der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit die erforderliche Verschnittebene für die folgende Auswertung immer an der selben Position, bei Y -3,00 mm, erstellt.

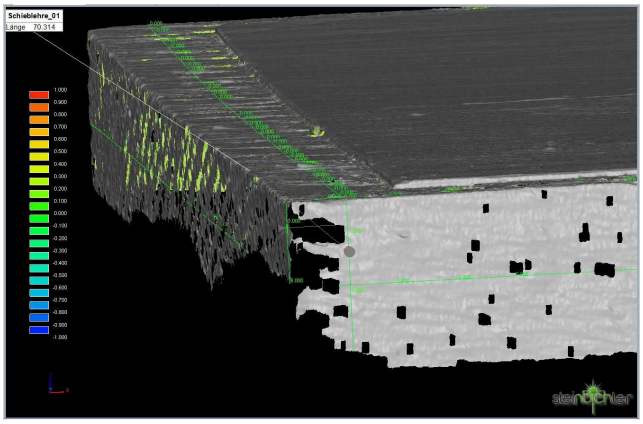


Abb. 151| 'Schnittvergleich' mit eingeblendetem 3D-Datensatz. Da das virtuelle Modell zuvor mit der '3-Ebenen-Ausrichtung' bearbeitet wurde, verlaufen die Schnittlinien, die Objektkanten und die Koordinatenachsen orthogonal, bzw. parallel zueinander.
Quelle: Selbst

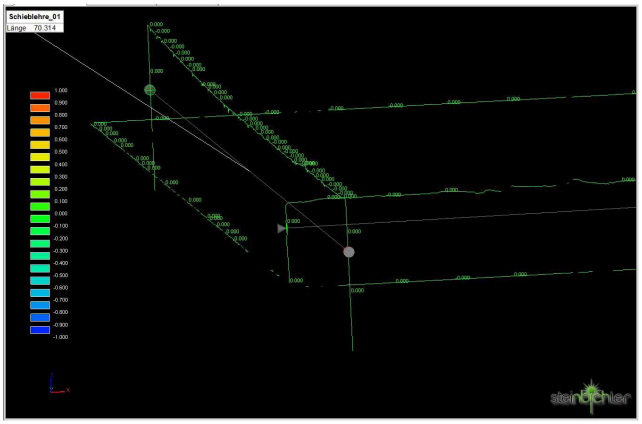


Abb. 152| 'Schnittvergleich' mit ausgeblendetem 3D-Datensatz, sodass die Messschieber zur Quantifizierung der Kantenlänge des Probekörper kenntlich sind.
Quelle: Selbst

Nadeldiagramme

Nadeldiagramme quantifizieren den Abstand von Soll- und Ist-Daten entlang der Verschnittebene. Die Schrittweite der einzelnen Nadeln kann benutzerseitig definiert werden. Sie stehen hierbei senkrecht auf den Soll-Daten und verweisen auf die Ist-Daten, wobei ihre nominal angegebene Länge der quantitativen Abweichung entspricht (►Abb. 151| - Abb. 154|).[538]

Messschieber und tabellarische Ausgabe

Über einen virtuellen Messschieber kann die Distanz zwischen zwei Datenpunkten des 3D-Models ermittelt werden. Letztlich basiert er damit auf der Bildgebung. Auf diese Weise sind jedoch quantitative Rückschlüsse über beliebige Bezüge möglich, wie bspw. bei einer Rissvermessung. Ferner dienen die Messschieberdaten als Basis für die statistische Auswertung zur Beurteilung von Dimensionsänderungen. Sie besitzen in der gewählten Auswertungsstrategie die Gemeinsamkeit, dass sie sich in der selben Verschnittebene befinden. Im Zuge der Dimensionsbestimmung der Probekörper werden exemplarisch drei virtuelle Messschieber entlang der X-Achse positioniert (tangential, in Bezug auf den Faserverlauf des Holzes, angegeben über die Punkte A, B und C), wiederum für die Y-Achse die Punkte D, E und F (axial, in Bezug auf den Faserverlauf des Holzes ►Abb. 154|). Äquivalent zu den Soll-Daten werden bei den Ist-Daten an den Punkten A bis F ebenso Messschieber positioniert. Diese quantitativen Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengefasst. Über ein selbst erstelltes Makro werden weiterhin die Längendifferenzen zwischen den Datensätzen entsprechend ihre Lage automatisch berechnet.

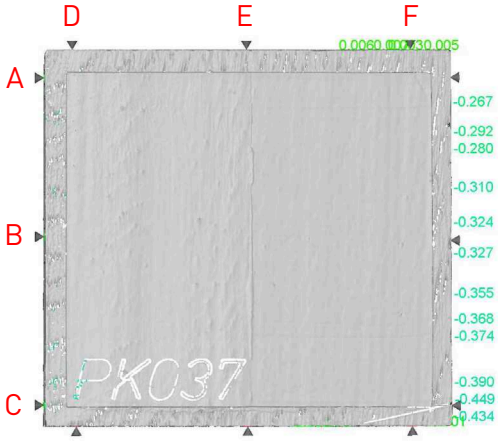


Abb. 153| Die Abbildung zeigt die schematische Anordnung der Messschieber, deren Positionen für alle Auswertungen gilt (A, B, C: X-Achse; respektive D, E, F: Y-Achse) .
Quelle: Selbst

538 Oft sind die Abweichungen zwischen den Soll- und den Ist-Daten so gering, dass Nadeln, die in ihrer Länge nur der tatsächlichen Differenz entsprechen zu kurz sind um wahrgenommen zu werden. Daher können die Nadeln unabhängig vom Maßstab skaliert werden. Ein Wert von eins entspricht hierbei der tatsächlichen Abweichung und alle darüberliegenden Werte einer entsprechenden Vergrößerung (zugehöriges Eingabefeld ‚Darstellung' → ‚Skalierung' im Dialogfenster ‚Vergleich ebener Schnitte'). (Vergleiche: Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch), 2011, Seite 142) In den Messprotokollen können die Nadeln unregelmäßige Abstände aufweisen, wenn Messlücken in den Datensätzen bestehen.

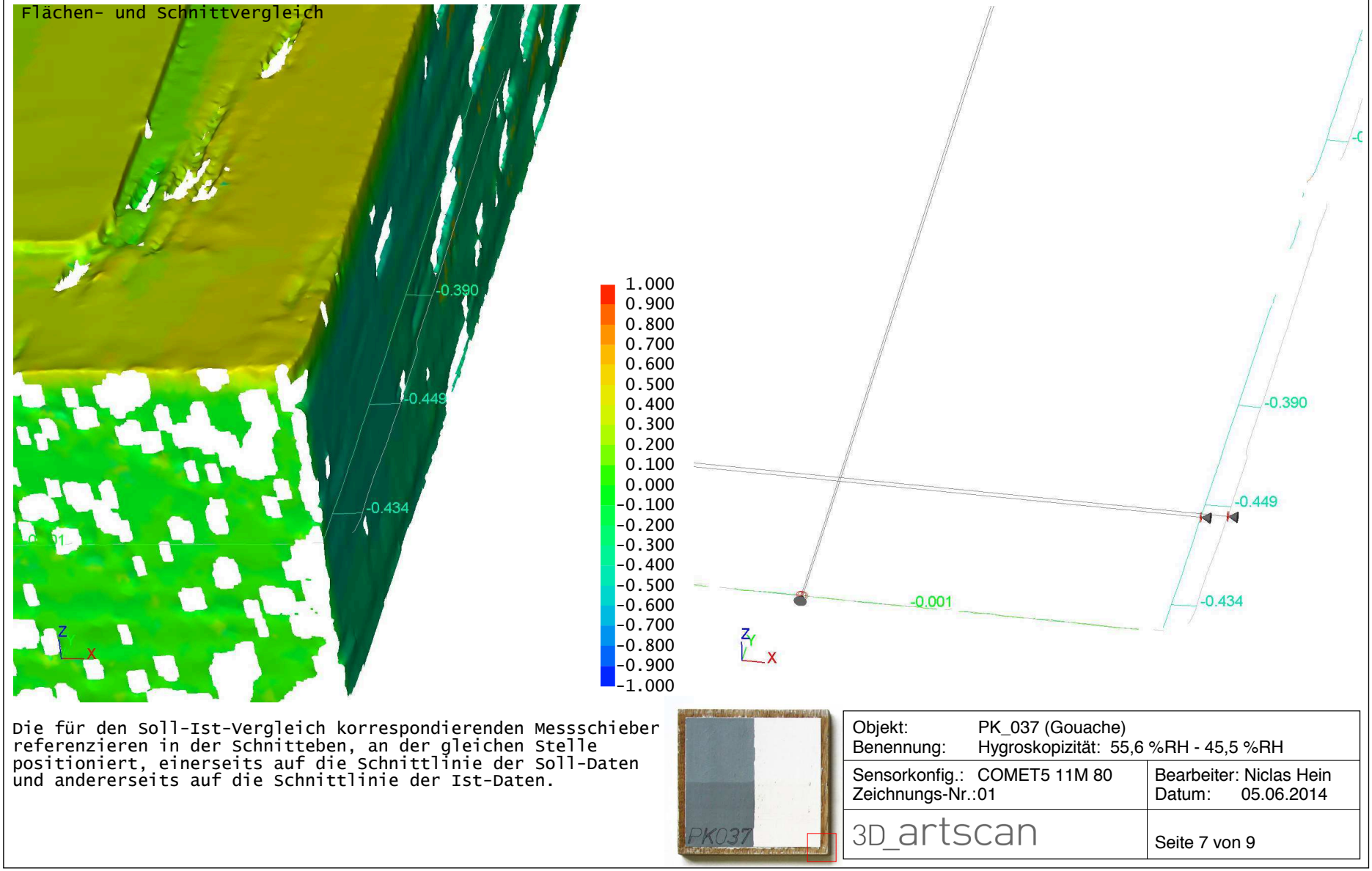


Abb. 154| Stellvertretende Abbildung einer Messprotokollseite zu einer Falschfarbendarstellung, einer Verschnittebene mit eingeblendeten Nadeldiagrammen, sowie virtuellen Messschiebern zur Analyse bestehender Soll-Ist-Diskrepanzen.
Quelle: Selbst

20.3.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung, basierend auf den Daten der 3D-Bildgebung, umfasst vorrangig gemittelte Werte zur Abweichung von virtuellen Modellen oder gezielte Messdaten zu einzelnen Punkten, die mittels Messschieber oder anderen Rastern, definiert werden. Auf Basis dieser Möglichkeiten liegt der Fokus auf der Untersuchung globaler Veränderungen, wie sie aus Klimaschwankungen heraus resultieren. Daher kommt die statistische Auswertung ausschließlich für die Versuche an den Probekörpern (Holz und Textil) zur Anwendung. Bei den Holzprobekörpern wird die Dimensionsänderung über virtuelle Messschieber ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass sich globale Veränderungen aus Verformungen und Dimensionsänderungen auf alle Punkte auswirken werden. Die Abweichung aller Punkte vom Soll- zum Ist-Modell kann über die mittlere Punktabweichung nachvollzogen werden – diese ist das arithmetische Mittel aller ermittelten, absoluten Punktabweichungen. Da insbesondere bei den Versuchen an Probeköpern aus Holz davon ausgegangen wird, dass durch etwaige konkave oder konvexe Verformungen Punktabweichungen in beide Richtungen auszumachen sind (entlang der Z-Achse), ist bei der Berechnung eines Mittelwertes ein Ausgleich von positiven und negativen Werten sehr wahrscheinlich. So wird die Aussage über den mittleren Punktabstand im Kontext der Holzprobekörper vernachlässigt. Im Gegenzug wird zur Ermittlung der globalen Abweichung von Soll- und Ist-Zustand bei den Versuchen an Probekörpern aus Holz die Standardabweichung herangezogen. Sie gibt die Streubreite der gemessenen Punkte um den Mittelwert an und berücksichtigt somit jede Entfernung eines Punktes unabhängig seiner Richtung. In der Konsequenz kann somit über die Standardabweichung lediglich eine Aussage zum Reaktionsvermögen, und damit der Abweichung vom Ausgangszustand, abgeleitet werden. Aussagen zu der Verformungsrichtung sowie ihrem -Maß können nur basierend auf der Bildgebung ermittelt werden. Durchaus können diese Werte dann aber in einer Ableitung mit in eine statistische Auswertung einfließen.
In der Gesamtbetrachtung soll die statistische Auswertung grundlegende Fragestellungen beantworten. Hierzu gehört, ob ein hygroskopisches Verhalten quantitativ nachweisbar ist. Weiterhin soll untersucht werden, ob durch Extrembelastungen irreversible Schäden entstehen. Weiterführend soll die Reproduzierbarkeit der Versuche und ein gegebenenfalls materialspezifisches Verhalten aufgedeckt werden. Im genannten Kontext sind insbesondere die Geringfügigkeitsgrenze möglicher, detektierbarer Veränderungen zu untersuchen. Grundsätzlich wird sich bei den Versuchen an den Probekörpern auf textilem Bildträger an der eben geschilderten Methodik orientiert. Da aufgrund des Spannrahmens keine lateralen Dimensionsänderung zu erwarten sind (in X- und Y-Achse), ist eine Vermessung über Messschieber irrelevant. Jedoch ist es ungeachtet dessen denkbar, dass durch Feuchteschwankungen Verformungen verursacht werden. Aufgrund des starren Spannrahmens ist davon auszugehen, dass Verwerfungen prinzipiell axial verlaufen (entlang der Z-Achse). Daher wird

zusätzlich zur Standardabweichung auf den mittleren Punktabstand zurück gegriffen.
Im Rahmen der quantitativen Auswertung werden die Werte methodisch durch prozentuale Verhältnisse, Korrelationsbetrachtungen, Lageparameter wie Median, Minimum, Maximum und arithmetische Mittel, sowie verschiedenen Streuungsparameter wie Spannweite und Standardabweichung bewertet und verglichen.
Bei den Versuchen an den Realobjekten und der Gemälde, im Zuge der Transportsimulation sowie der Transportdurchführung, erfolgt keine statistische Auswertung. Bei diesen Experimenten geht es weder darum, Ableitungen auf das Reaktionspotenzial des Materials durch veränderte relative Feuchten aufzuzeigen, noch um eine Reproduzierbarkeit der Versuche. Der Fokus liegt vielmehr auf einer Bewertung der grundsätzlichen Verfahrenseignung.

20.4 Prozessablaufdiagramm zur Datenverarbeitung und -Aufbereitung in 'INSPECTplus'

Das folgende Prozessablaufdiagramm zur Datenverarbeitung und -aufbereitunag gibt eine detaillierte Übersicht zu den einzelnen Arbeitsschritten (►Abb. 155|). Es ist als Folgeprozess zum eingangs aufgeführten Prozessablauf der Digitalisierung und Bearbeitung der Daten in 'COMETplus' zu betrachten (►Abb. 64|).

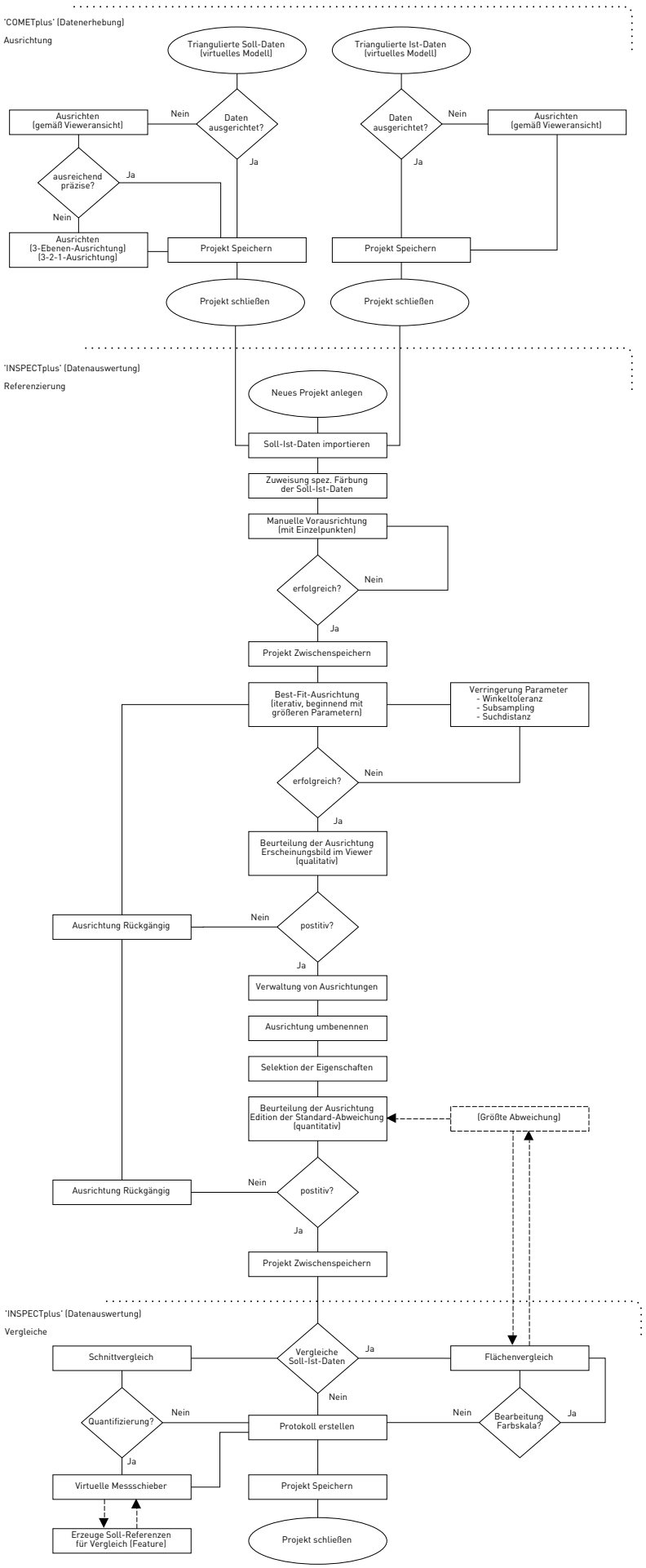


Abb. 155| Prozessablaufdiagramm zur Auswertung der Daten in 'INSPECTplus'.
Quelle: Selbst

20.5 Gliederung der Auswertung und Dokumentation

Der Vergleich von Soll- und Ist-Daten, sprich jeder Versuch, wird in den bereits genannten Messprotokollen dokumentiert. Die dort zusammengefassten Ergebnisse stellen die Basis für die Auswertung der Experimente dar. In der Gesamtheit der Experimente ergibt sich dabei folgende hierarchische Gliederung:

- Versuchsreihe_01 (VR1) bis Versuchsreihe_06 (VR6) umfassen die Experimente an den Probekörpern auf Holzbildträger.
- Versuchsreihe_07 (VR7) bis Versuchsreihe_12 (VR12) gilt den Experimenten der Probekörper auf textilem Bildträger.
- Versuchsreihe_13 (VR13) umfasst die Experimente an den Realobjekten.
- Versuchsreihe_14 (VR14) und Versuchsreihe_15 (VR15) widmet sich der Transportsimulation der Originale in der Klimakammer.
- Versuchsreihe_16 (VR16) und Versuchsreihe_17 (VR17) bilden den Abschluss der Experimente – hier findet der Transport unter Realbedingungen statt.

Die Protokolle sind über fortlaufende Versuchsnummern systematisiert (V_***). Da die Experimente aus jeweils einem Soll- und einem Ist-Datensatz bestehen (vorgegeben durch die relative Feuchte) werden in den Protokollen ebenso zwei zugehörige, fortlaufenden Messungsnummern (M_***) aufgeführt, die damit stellvertretend für den Objektzustand zum Zeitpunkt der Digitalisierung sind.
Der folgenden, systematischen Reihenfolge entsprechend umfasst der Aufbau eines Protokolls bei erstmaliger Erwähnung des Untersuchungsgegenstandes ein Tageslichtfoto von Vorder- und Rückseite. Optional werden verschiedene Darstellungen der unterschiedlich eingefärbten 3D-Modelle gemäß der 'Viewer-Ansicht' gezeigt, sowie eine quantitative Edition der Punkteabweichungen nach der 'Best-Fit-Ausrichtung' und Falschfarbendarstellungen. Ebenso werden Schnittliniendarstellungen, virtuelle Messschieber, zugehörige Flyer sowie quantitative Ergebnisse in Tabellenform fakultativ aufgeführt.
Den Ergebnissen vorgreifend, sind sämtliche der durchgeführten Experimente zu umfangreich, sodass hierorts lediglich die Wiedergabe einer Selektion erfolgt.[539,540,541] Zentrales Auswahlkriterium ist

539 Der volle Umfang der durchgeführten Experimente und die zugehörigen Messprotokolle sind dem beiliegenden elektronischen Datenträger zu entnehmen. Dort finden sich auch die Pivot-Tabellen, Hilfstabellen (HT_***) und die folgend abgedruckten Auswertungstabellen (AT_***) der statistischen Auswertung. Die Referenzierung wird über einen Nummernkreis, bzw. die Versuchsnummern erbracht. Beides ist entweder der Tabellen- oder der Abbildungsbeschriftung zu entnehmen.

540 Methodisch abweichend erfolgt hingegen die Darlegung der Ergebnisse der Kunsttransporte der Gemälde. Aufgrund gegebener Relevanz werden diese nicht als Exzerpt, sondern in Gänze erörtert.

541 Aufgrund thematischer Bezüge und der Komplexität der Versuchsreihen erfolgt keine globale Abschlussbetrachtung des dritten Teiles, so wie dieses bisher für den ersten und zweiten Teil der vorliegenden Schrift geschehen ist. Entsprechend der Gruppe der Untersuchungsgegenstände und der Fragestellungen wird eine dezidierte Zusammenfassung der Ergebnisse jeweils am Ende der objektbezogenen Experimente vorgenommen. Ein globaler Bezug aller Ergebnisse erfolgt wiederum in einem abschließenden Fazit

dabei die Bedeutung der Versuchsergebnisse. Weiter wird im folgenden Ergebnisteil aus Gründen der Übersicht bei der Darlegung der jeweiligen Versuchsreihe eine spezifische Zusammenfassung der Eckdaten der Experimente in tabellarischer Form vorgenommen. Als Ordnungskriterium dient dabei die Versuchsreihe selbst, die fortlaufenden Messungsnummern; fernerhin erfolgt die Nennung des Kürzels des Untersuchungsgegenstandes und des Konditionierungsstoffes, sowie der Ausführung, ob es sich dabei um einen Soll- oder Ist-Datensatz handelt.

21. Experimente zur klimatischen Belastung: Probekörper Holz (VR1-VR6)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente an den Holzprobekörpern in Auszügen vorgestellt.

21.1 Ergebnisse der Konditionierung

Neben den oben theoretisch beschriebenen Werten – gemäß der DIN-Norm – sind die tatsächlichen Konstantklimata, die mit Hilfe der gesättigten Salzlösungen in den Klimaboxen erzielt worden sind, der folgenden Tabelle zu entnehmen (►Tab. 29| und Tab. 30|).[542] Zwischen den Digitalisierungen der Probekörper bestand ein Klimatisierungszeitraum von vierundzwanzig Stunden.[543]

21.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen

Im Folgenden werden die umfangreichen Experimente zur Bildgebung strukturelle Veränderungen in Auswahlform dargelegt, da die Veränderungsmerkmale größtenteils wiederholt auftreten. Die zugrundeliegende Selektion berücksichtigt besonders aussagekräftige Ergebnisse. Wenn vorhanden, werden zugleich etwaige konsekutive Zusammenhänge aufgezeigt.



Abb. 156| Die Probekörper in der Konditionierungsbox während der Digitalisierung. Zudem eine Detailansicht des projizierten Streifenmuster, allerdings mit einer anderen Streifensequenz.
Quelle: Selbst

Dimensionsänderung in Form einer Quellung mit einhergehender, konkaver Oberflächenverformung

Anhand der vorgenommenen Experimente können an den Probekörpern verschiedene Veränderungsmerkmale durch die 3D-Bildgebung visualisiert werden. Anzuführen sind grundsätzliche Dimensionsänderungen, die sich als Belastungsfolge in einer Quellung oder einer Schrumpfung, bzw. einer Verformung äußern. So wird, aufgrund gegebener Eindeutigkeit, exemplarisch auf 'PK_042' im Versuch V_015 verwiesen. Durch eine benutzerseitige, vergleichende Gegenüberstellung der beiden unterschiedlich gefärbten 3D-Datensätze lassen sich in der geteilten 'Viewer-Ansicht' Diskrepanzen herausstellen und im Auswertungsprotokoll dokumentieren (►Abb. 157|).[544] Hier bestehen Rückschlüsse auf eine globale, konkave Oberflächenverformung der Ist-Daten im Gegensatz zu der vergleichsweise planen Oberfläche

542 Die gemittelten Daten zur Temperatur und der relativen Feuchte in Tabelle 29 belegen, im Vergleich zu den erwarteten Ergebnissen der relativen Feuchte gemäß Tabelle 28, dass die selbst erhobenen Daten geringfügig abwichen. Im Mittel waren diese um ca. zwei Prozent höher. Davon ausgenommen sind die Ergebnisse der Datenloggern bei der Detektion des Klima über gesättigte, wässrige Kaliumsulfat-Lösung. Diese wurden im Mittel mit 97,5 %RH bestimmt, was exakt den in der DIN-Norm angegebenen Werten entspricht. Gleichwohl ist mit diesem Wert der herstellerseitig angegebene Messbereich der Datenlogger (<90 %RH) deutlich überschritten. Gewohnheitsgemäß sind die Ergebnisse nahe des Taupunktes grundsätzlich von großen Messunsicherheit geprägt.

543 Unter der betreffenden Versuchsreihen-Nummer sind die entsprechenden Datenlogger-Protokolle in digitaler Form dem beiliegenden Datenträger beigefügt. Dieses gilt auch für alle folgenden Versuchsreihen.

544 Vergleiche: V_015, ‚PK_042' (Soll-Daten: M_055 bei 55,2 %RH / Ist-Daten: M_056 bei 97,8 %RH, Konditionierung: Δ42,6 %RH), Protokollseite 3 f.

der Soll-Daten.[545] Die separierte Darstellung der beiden 3D-Datensätze belegt die Verformung eindeutig. Im Protokoll rot eingezeichnete Hilfslinien offenbaren die signifikante Dimensionsänderung in Form einer Quellung bei einhergehender Wölbung der Ist-Daten. Nach der Best Fit-Ausrichtung der Datensätze zeigt sich zudem über die 'Viewer-Ansicht', dass sich einerseits die 3D-Modelle nicht homogen durchdringen und andererseits die Ecken des Soll-Datensatzes nicht mehr deckungsgleich auf den Ecken des Ist-Datensatzes aufliegen (►Abb. 157|). Augenscheinlich wird dieses bei der Sicht auf die Unterseite der beiden aufeinander ausgerichteten 3D-Modelle. Hier offenbart sich, dass der Soll-Datensatz entlang der X-Achse sehr viel größer geworden ist und demzufolge die Stirnseiten des Ist-Datensatzes, wiederum bei Aufsicht, verdeckt. Werden hierbei auch die Ergebnisse der Falschfarbendarstellung mit berücksichtigt, so können die eben beschriebenen Merkmale verifiziert werden (►Abb. 158|). Zugleich ermöglicht die Farbcodierung quantitative Ableitungen: die Bestimmung der Dimensionsänderung im Maximum von ca. 2 mm, entlang der X-Achse. Dieses Ergebnis verifiziert zudem jene der statistischen Auswertung (►Tab. 35| (2,085 mm)). Auch das Maß der konkaven Verformung entlang der Z-Achse lässt sich über die Falschfarbendarstellung mit 1,8 mm nachweisen (►Tab. 36| (1,8 mm)). Methodisch lässt sich die Dimensionsänderung darüber hinaus ebenso über die Schnittlinienselektion, die Nadeldiagramme und die virtuellen Messschieber belegen (►Abb. 158| und Abb. 159|).
Grundsätzlich beweist sich über die Bildgebung die Verfahrenseignung zum Nachweis von Dimensionsänderungen – im vorliegenden Fall einer Objektquellung als Folge einer signifikanten Befeuchtung um Δ42,6 %RH. Ebenso kann die Richtung der Verformung bestimmt werden – eine konkave Wölbung. Die eben beschriebenen Veränderungsmerkmale der Quellung und der einhergehenden, konkaven Verformung können, dem Grundsatz nach, auch bei den übrigen Holzprobekörpern nachgewiesen werden. Zum Beleg wird auf die beiliegenden Protokolle einerseits und die statistische Auswertung andererseits verwiesen (►Tab. 36|).

545 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um Verformungen, die gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entsprechen und systematisch der Topografieveränderung unterliegen. Darüber hinaus bestehen Übereinstimmungen mit dem Schadensbild Krümmen, Verwerfen, Verziehen, Verwinden, Verwölben (Kategorie 16).

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_01

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_001	PK_037	Silikagel E	26,2	5,4	Ist (V_002)
M_002	PK_037	Kaliumcarbonat-Dihydrat	21,9	45,5	Ist (V_001)
M_003	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	22,7	56,6	Soll (V_001/_002/_003)
M_004	PK_037	Kaliumsulfat	22,7	97,4	Ist (V_003)
M_017	PK_042	Silikagel E	26,2	5,4	Ist (V_005)
M_018	PK_042	Kaliumcarbonat-Dihydrat	22,3	44,4	Ist (V_004)
M_019	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	21,9	55,5	Soll (V_004/_005/_006)
M_020	PK_042	Kaliumsulfat	22,9	98,2	Ist (V_006)
M_033	PK_047	Silikagel E	26,2	5,4	Ist (V_008)
M_034	PK_047	Kaliumcarbonat-Dihydrat	22,9	46,5	Ist (V_007)
M_035	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	22,5	55,9	Soll (V_007/_008/_009)
M_036	PK_047	Kaliumsulfat	22,1	96,9	Ist (V_009)

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_02

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_037	PK_037	Silikagel E	22,9	2,6	Ist (V_011)
M_038	PK_037	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,7	45,3	Ist (V_010)
M_039	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,8	54,0	Soll (V_010/_011/_012)
M_040	PK_037	Kaliumsulfat	22,7	97,4	Ist (V_012)
M_053	PK_042	Silikagel E	22,9	2,6	Ist (V_014)
M_054	PK_042	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,3	47,4	Ist (V_013)
M_055	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,6	55,2	Soll (V_013/_014/_015)
M_056	PK_042	Kaliumsulfat	24,6	97,8	Ist (V_015)
M_069	PK_047	Silikagel E	22,9	2,6	Ist (V_017)
M_070	PK_047	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,7	47,9	Ist (V_016)
M_071	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,7	53,9	Soll (V_016/_017/_018)
M_072	PK_047	Kaliumsulfat	24,8	95,5	Ist (V_018)

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_03

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_073	PK_037	Silikagel E	26,0	6,7	Ist (V_020)
M_074	PK_037	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,4	44,7	Ist (V_019)
M_075	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	53,9	Soll (V_019/_020/_021)
M_076	PK_037	Kaliumsulfat	25,0	96,3	Ist (V_021)
M_089	PK_042	Silikagel E	26,0	6,7	Ist (V_023)
M_090	PK_042	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,9	47,3	Ist (V_022)
M_091	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	54,0	Soll (V_022/_023/_024)
M_092	PK_042	Kaliumsulfat	24,3	97,1	Ist (V_024)
M_105	PK_047	Silikagel E	26,0	6,7	Ist (V_026)
M_106	PK_047	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,4	46,5	Ist (V_025)
M_107	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,2	53,8	Soll (V_025/_026/_027)
M_108	PK_047	Kaliumsulfat	24,4	96,0	Ist (V_027)

Tab. 29| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihen VR1-VR3 (Probekörper Holz), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung.
Quelle: Selbst

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_04

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_075	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	53,9	Soll (V_030/_031/_033)
M_193	PK_037	Natriumbromid	21,0	60,6	Ist (V_030)
M_194	PK_037	Ammoniumnitrat	23,3	64,4	Ist (V_031)
M_195	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,8	54,4	Ist (V_032)
M_091	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	54,0	Soll (V_033/_034/_035)
M_196	PK_042	Natriumbromid	21,0	60,6	Ist (V_033)
M_197	PK_042	Ammoniumnitrat	23,3	64,4	Ist (V_034)
M_198	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,8	54,4	Ist (V_035)
M_107	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,2	53,8	Soll (V_036/_037/_038)
M_199	PK_047	Natriumbromid	21,0	60,6	Ist (V_036)
M_200	PK_047	Ammoniumnitrat	23,3	64,4	Ist (V_037)
M_201	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,8	54,4	Ist (V_038)

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_05

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_075	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	53,9	Soll (V_039/_040/_041)
M_223	PK_037	Natriumbromid	24,5	59,2	Ist (V_039)
M_224	PK_037	Ammoniumnitrat	23,8	64,4	Ist (V_040)
M_225	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,1	54,6	Ist (V_041)
M_091	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	54,0	Soll (V_042/_043/_044)
M_226	PK_042	Natriumbromid	24,5	59,2	Ist (V_042)
M_227	PK_042	Ammoniumnitrat	23,8	64,4	Ist (V_043)
M_228	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,1	54,6	Ist (V_044)
M_107	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,2	53,8	Soll (V_045/_046/_047)
M_229	PK_047	Natriumbromid	24,5	59,2	Ist (V_045)
M_230	PK_047	Ammoniumnitrat	23,8	64,4	Ist (V_046)
M_231	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,1	54,6	Ist (V_047)

Probekörper Holz (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_06

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_075	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	53,9	Soll (V_048/_049/_050)
M_232	PK_037	Natriumbromid	26,2	59,0	Ist (V_048)
M_233	PK_037	Ammoniumnitrat	26,5	62,0	Ist (V_049)
M_234	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,4	53,9	Ist (V_050)
M_091	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,4	54,0	Soll (V_051/_052/_053)
M_235	PK_042	Natriumbromid	26,2	59,0	Ist (V_051)
M_236	PK_042	Ammoniumnitrat	26,5	62,0	Ist (V_052)
M_237	PK_042	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,4	53,9	Ist (V_053)
M_107	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,2	53,8	Soll (V_054/_055/_056)
M_238	PK_047	Natriumbromid	26,2	59,0	Ist (V_054)
M_239	PK_047	Ammoniumnitrat	26,5	62,0	Ist (V_055)
M_240	PK_047	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,4	53,9	Ist (V_056)

Tab. 30| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihen VR4-VR6 (Probekörper Holz), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung.
Quelle: Selbst



Abb. 157| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_015 ('PK_042') zur Bildgebung einer Dimensionsänderung in Form einer Quellung mit einhergehender konkaven Oberflächenverformung – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht'.
Quelle: Selbst

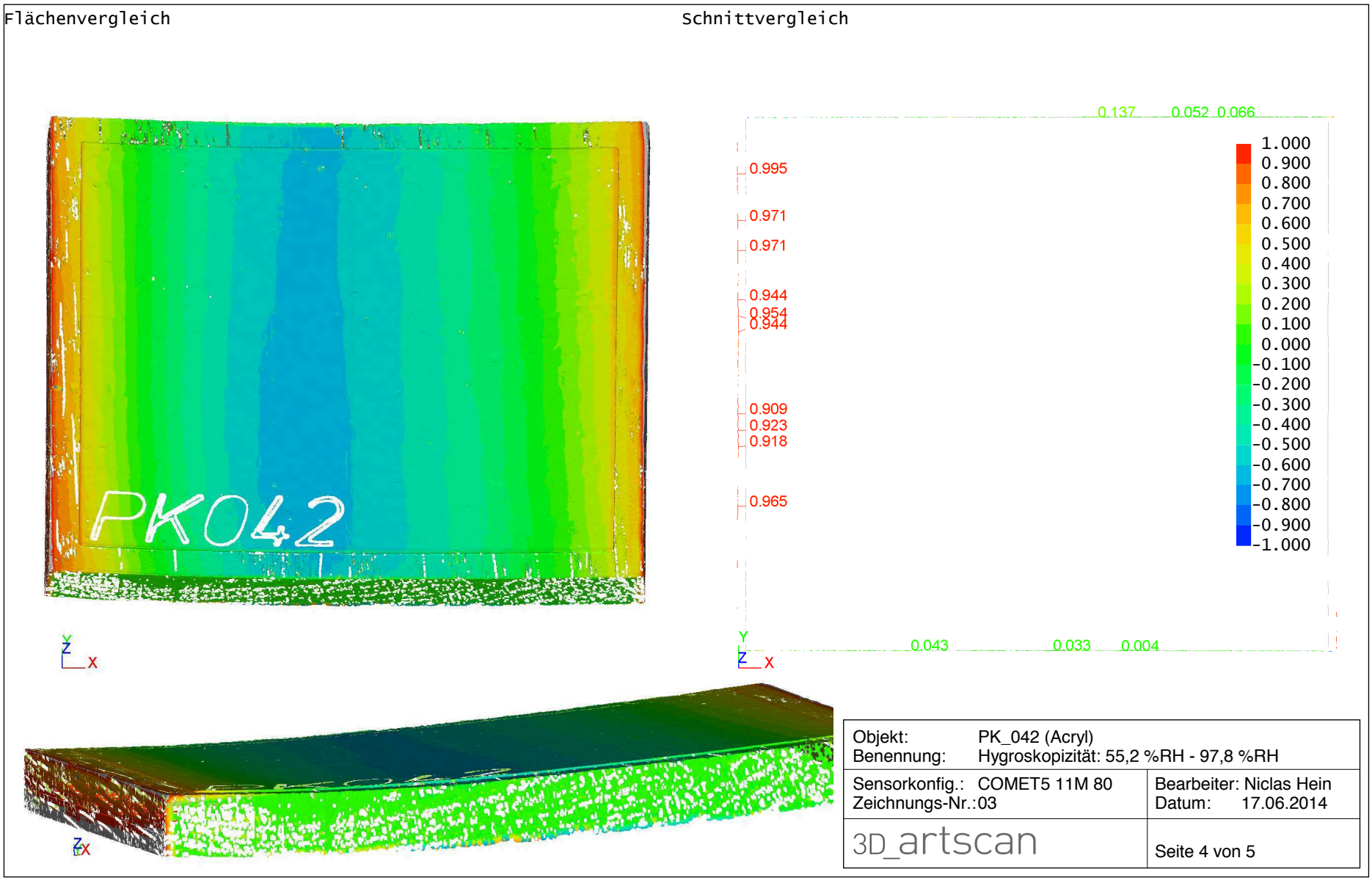
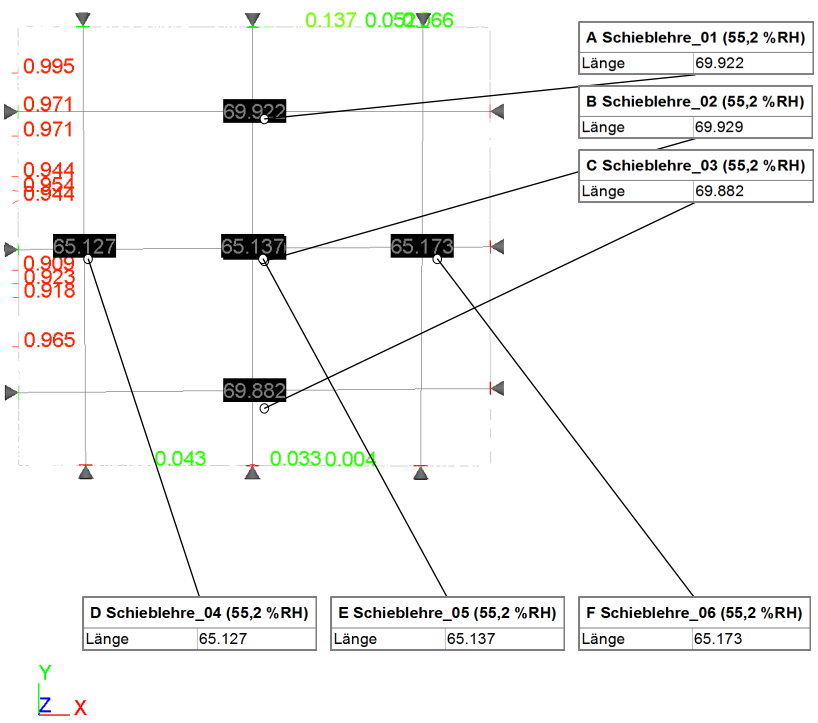
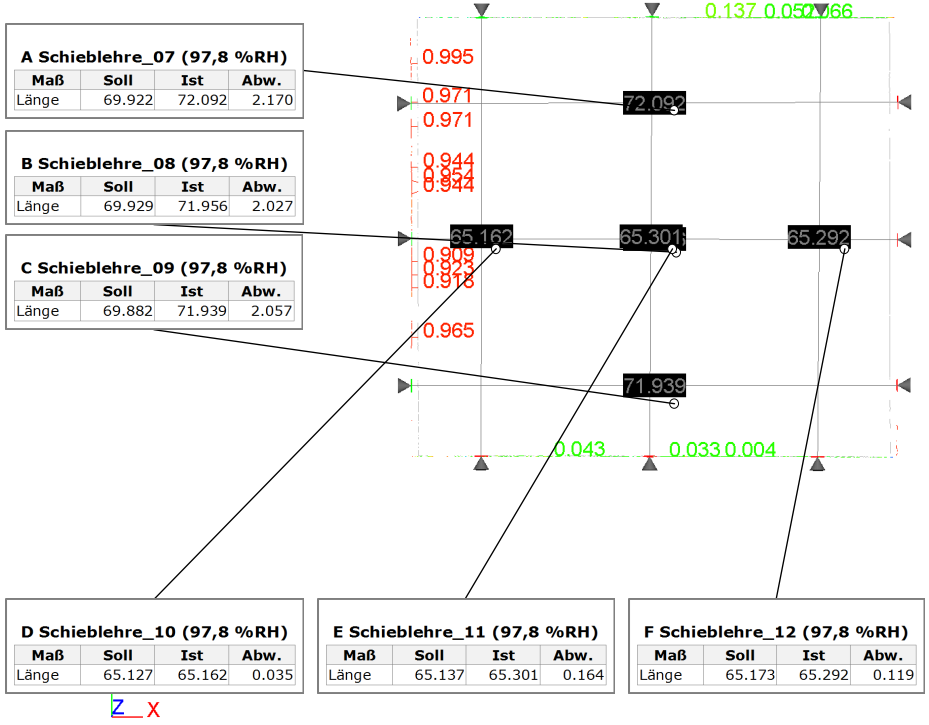


Abb. 158| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_015 ('PK_042') zur Bildgebung einer Dimensionsänderung in Form einer Quellung mit einhergehender konkaven Oberflächenverformung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und die Schnittlinienselektion mit eingeblendeten Nadeldiagrammen.
Quelle: Selbst

Messschieber Soll-Daten
Dimension PK_042 bei 55,2 %RH



Messschieber Soll-Daten
Dimension PK_042 bei 97,8 %RH



Feat.	Maß	Soll
D Schieblehre_04 (55,2 %RH)	Länge	65.127
A Schieblehre_01 (55,2 %RH)	Länge	69.922
B Schieblehre_02 (55,2 %RH)	Länge	69.929
C Schieblehre_03 (55,2 %RH)	Länge	69.882
E Schieblehre_05 (55,2 %RH)	Länge	65.137
F Schieblehre_06 (55,2 %RH)	Länge	65.173

Feat.	Maß	Soll	Ist	Abw.
A Schieblehre_07 (97,8 %RH)	Länge	69.922	72.092	2.170
B Schieblehre_08 (97,8 %RH)	Länge	69.929	71.956	2.027
C Schieblehre_09 (97,8 %RH)	Länge	69.882	71.939	2.057
D Schieblehre_10 (97,8 %RH)	Länge	65.127	65.162	0.035
E Schieblehre_11 (97,8 %RH)	Länge	65.137	65.301	0.164
F Schieblehre_12 (97,8 %RH)	Länge	65.173	65.292	0.119

Objekt: PK_042 (Acryl) Benennung: Hygroskopizität: 55,2 %RH - 97,8 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:03	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 17.06.2014
3D_artscan	Seite 5 von 5

Abb. 159| Wiedergabe der Protokollseite 5 von V_015 ('PK_042') zum bildgebenden Nachweis der Dimensionsänderung. Quantitativ wurde letztere über die eingeblendeten virtuellen Messschieber bestimmt. Die Ergebnisse sind tabellarisch gegliedert.
Quelle: Selbst

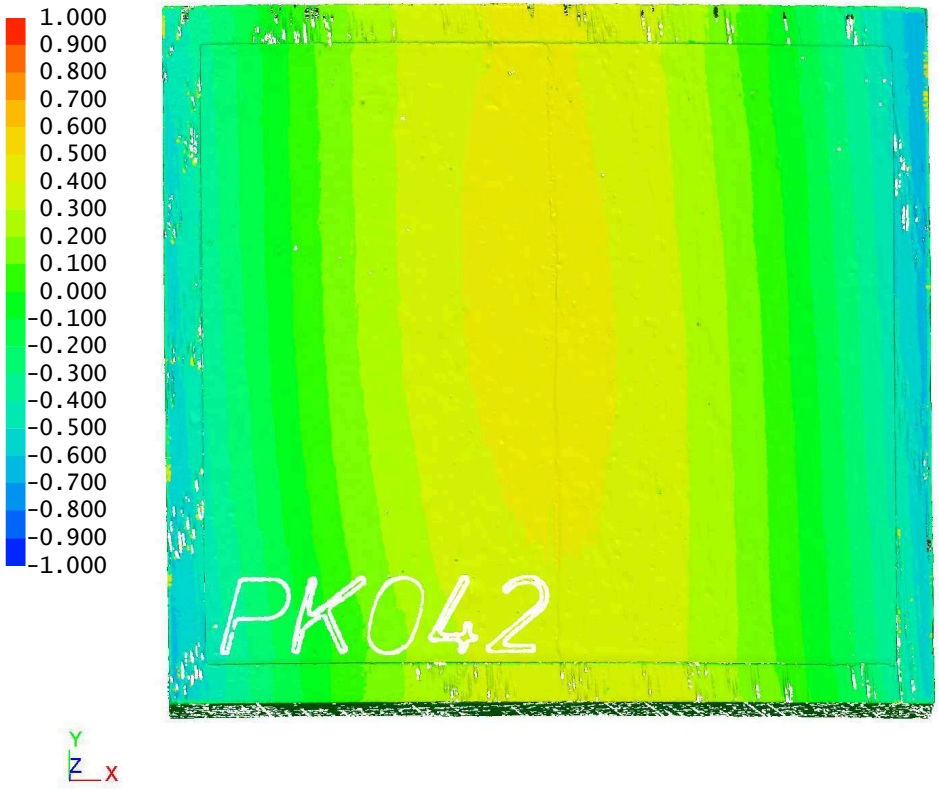
Dimensionsänderung in Form einer Schrumpfung mit einhergehender, konvexer Oberflächenverformungen

Weiter wird in einem gegenübergestellten Experiment überprüft, ob sich bei gegenteiliger Belastung der Untersuchungsgegenstand entsprechend verhält und analoge Veränderungsmerkmale festzustellen sind. Im Anschluss an eine extreme Trocknung um Δ52,6 %RH, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, können über den Soll-Ist-Vergleich an 'PK_042' im Versuch V_014 signifikante Veränderungen nachgewiesen werden.[546] Ein Beleg kann methodisch sowohl über die 'Viewer-Ansicht', als auch die Falschfarbendarstellung, die Nadeldiagramme und die virtuellen Messschieber vorgewiesen werden. Die Auswertung belegt die Schrumpfung des Probekörpers (►Abb. 160|).[547] Die Falschfarbendarstellung gewährt, gegenüber den Soll-Daten, den Rückschluss einer Dimensionsänderung der Ist-Daten in Form einer Verkleinerung entlang der X-Achse. Über die Skala ist diese mit ca. -0,6 mm zu bestimmen, ein Wert, der über die Nadeldiagramme zusätzlich verifiziert werden kann. Zugleich bestätigt dies die Ergebnisse der statistischen Auswertung (►Tab. 35| (-0,661mm)). Ebenso gewährt die Falschfarbendarstellung eindeutige Anhaltspunkte für eine konvexe Oberflächenverformung, die der Größenordnung nach mit 1,3 mm quantifiziert wird. Messtechnisch kann damit sowohl die Richtung der Formänderung sowie ihr Maß bestimmt werden.

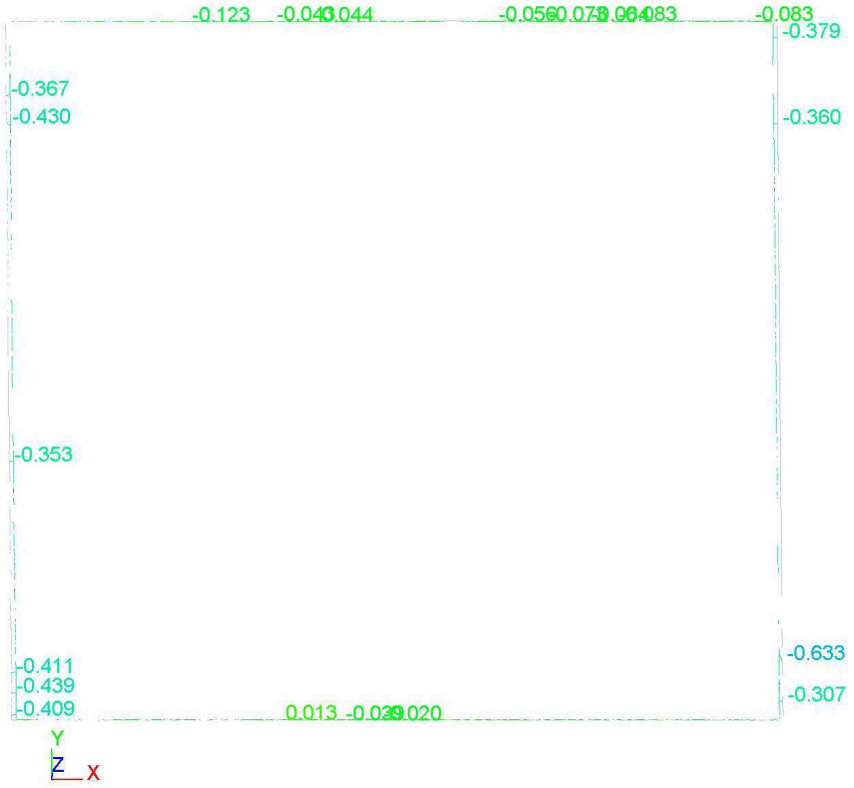
546 Vergleiche: V_014, ‚PK_042' (Soll-Daten: M_055 bei 55,2 %RH / Ist-Daten: M_053 bei 2,6 %RH, Konditionierung: Δ52,6 %RH), Protokollseite 2 ff.

547 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Verformung, die gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entspricht und systematisch der Topografieveränderung untergliedert ist. Darüber hinaus bestehen Übereinstimmungen mit dem Schadensbild Krümmen, Verwerfen, Verziehen, Verwinden, Verwölben (Kategorie 16).

Flächenvergleich



Schnittvergleich



Objekt:	PK_042 (Acryl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 55,2 %RH - 2,6 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 18.06.2014
3D_artscan		Seite 3 von 4

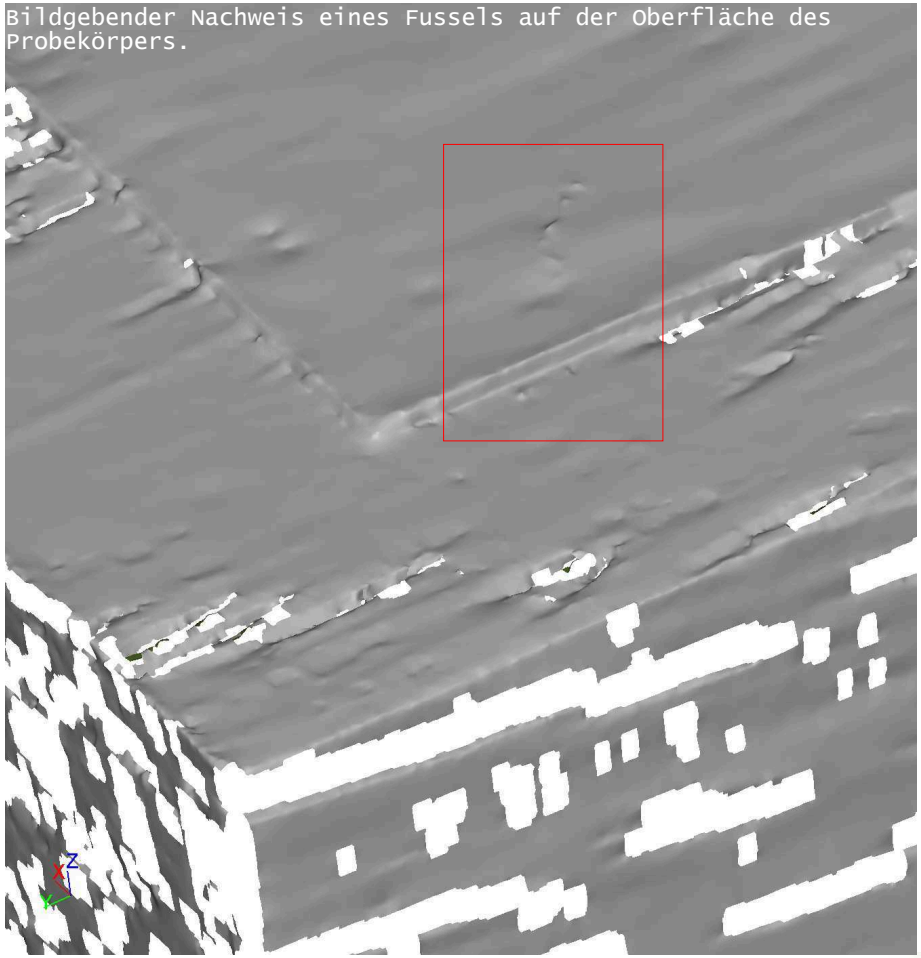
Abb. 160| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_014 ('PK_042') zur Bildgebung einer Dimensionsänderung in Form einer Schrumpfung mit einhergehender konvexen Oberflächenverformung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und die Schnittlinienselektion mit eingeblendeten Nadeldiagrammen.
Quelle: Selbst

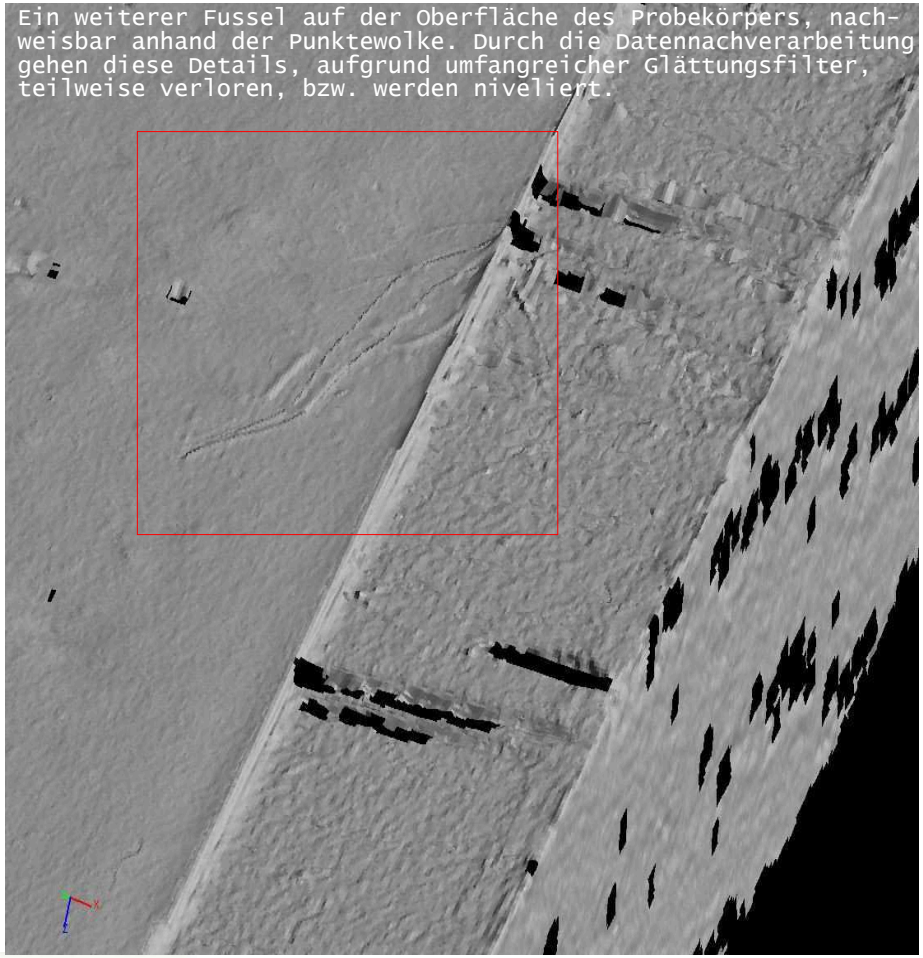
Verschmutzung

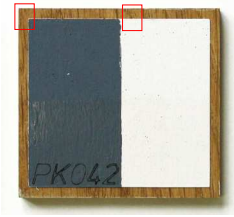
Weiter kann über die 'Viewer-Ansicht' beim direkten Vergleich der Soll-Daten mit den Ist-Daten bei 'PK_042' im Versuch V_022 eine Textilfaser auf der Malschichtseite nachgewiesen werden (►Abb. 161|).[548,549] Anhand der Visualisierung dieser feinen Verschmutzung belegt sich die Leistungsfähigkeit des Untersuchungsverfahrens. Zugleich offenbaren sich durch das Experiment Verfahrenseinschränkungen. So können einzelne Verschmutzungen in Form feiner Textilfasern, die zwar an der Punktewolke des digitalisierten Probekörpers augenscheinlich sind, beim folgend trinagulierten 3D-Modell nicht mehr entdeckt werden. Demzufolge hat die Datennachverarbeitung mit den gewählten Parametern, trotz umsichtiger Selektion, einen nachteiligen Einfluss auf die Detailgenauigkeit. Ebenso zeigt sich anhand des Experimentes die Notwendigkeit, die identifizierten Veränderungsmerkmale am Original zu überprüfen. Hilfreich wäre auch ein Tageslichtfoto.

548 Vergleiche: V_022, ‚PK_042' (Soll-Daten: M_091 bei 54,0 %RH / Ist-Daten: M_090 bei 47,3 %RH, Konditionierung: Δ6,7 %RH), Protokollseite 3

549 Im Abgleich mit der Klassifikation im Schadenskatalog besteht keine direkte Merkmalsübereinstimmung. Vielmehr entspricht die Objektveränderung der Grundschadensart: Verschmutzung.







Objekt:	PK_042 (Acryl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 54,0 %RH - 47,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 26.06.2014
3D_artscan		Seite 3 von 5

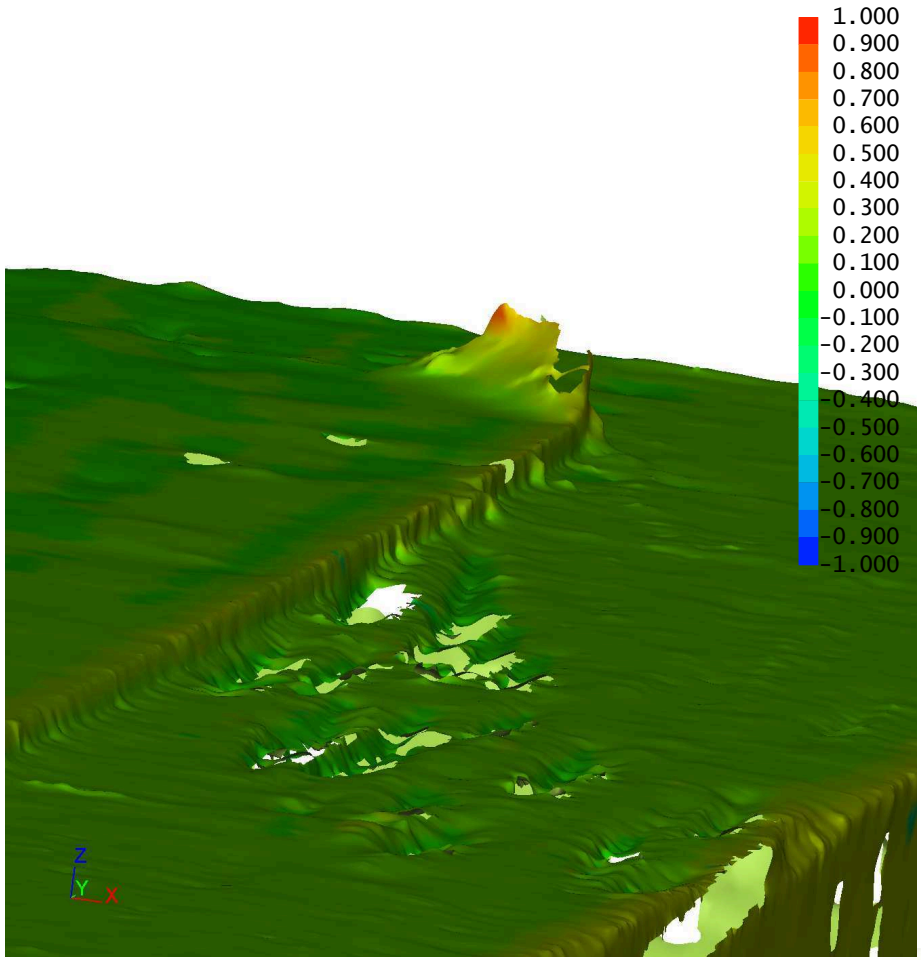
Abb. 161| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_022 ('PK_042') zur Bildgebung einer Oberflächenverschmutzung in Form von Textilfasern – veranschaulicht über den triangulierten Datensatz (links) und den selben Datensatz als Punktewolke (rechts).
Quelle: Selbst

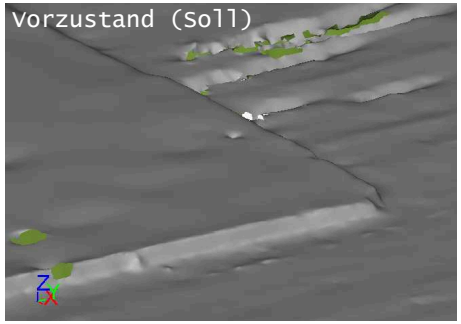
Aufstehende Malschicht

Bei der klimatischen Belastung von Probekörper 'PK_042' in Versuch V_052 kann, sowohl über die Ansicht des Ist-Datensatzes im 'Viewer' als auch die Falschfarbendarstellung, eine lokal begrenzte Veränderung nachgewiesen werden.[550] Diese offenbart sich in der oberen rechten Ecke in Form aufstehender Malschicht (►Abb. 162|).[551] Die Falschfarbendarstellung erlaubt eine Quantifizierung mit <1 mm. Die Bildgebung gibt Aufschluss über eine Delamination zwischen Bildträger und Grundierung, Diese kann am Original durch Sichtprüfung bestätigt werden. Eine zweifelsfreie Benennung der Ursache für die beschriebene Veränderung ist nicht möglich, mehrere Faktoren kommen in Betracht: Erstens die klimatische Belastung in Form einer Trocknung um 10 %RH. Zweitens ein Fehler bei der Herstellung des Probekörpers. Drittens eine mechanische Beschädigung beim Wechsel zwischen den Befeuchtungsboxen, wobei währenddessen darauf geachtet wurde lediglich das Tablar und keinesfalls den Probekörper selbst zu berühren.

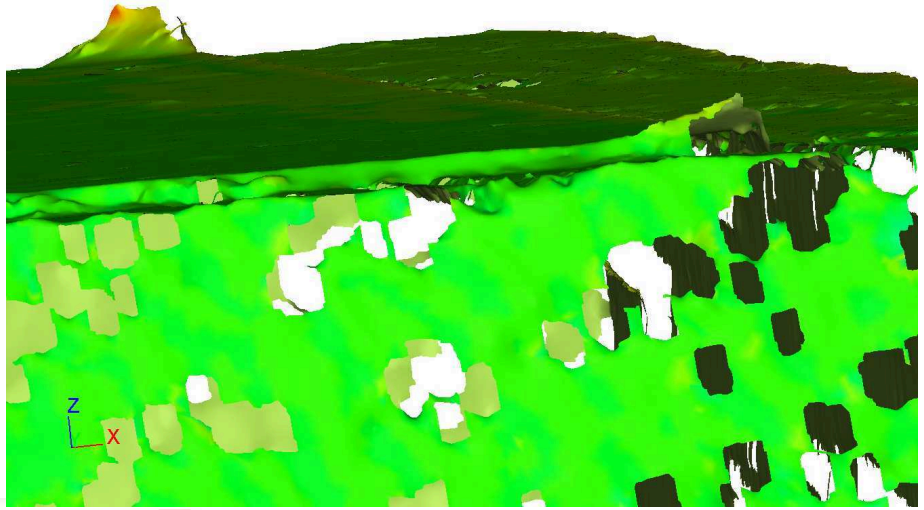
550 Vergleiche: V_052, ‚PK_042' (Soll-Daten: M_091 bei 54,0 %RH / Ist-Daten: M_236 bei 62,0 %RH, Konditionierung: Δ8,0 %RH), Protokollseite 2

551 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges besteht die Übereinstimmung mit dem Schadensbild: Dachförmig aufstehende Malschicht, Abblättern der Malschicht (Merkmal 08).

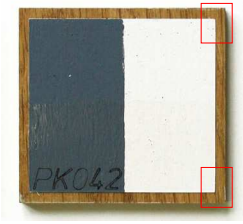








Über die Falschfarbendarstellung konnten im Randbereich klimatisch induzierte Veränderungen identifiziert werden (in der nebenstehenden Übersicht rot markiert). Diese äußern sich in einem partiell aufstehenden Bildschichtengefüge. Über die eingeblendete Farbskala kann die Veränderung in Z-Achse mit bis zu 1 mm quantifiziert werden.



Objekt:	PK_042 (Acryl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 54,0 %RH - 62,0 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 21.07.2014
3D_artscan		Seite 2 von 3

Abb. 162| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_052 ('PK_042') zur Bildgebung einer Topografieveränderung in Form einer aufstehenden Malschichtscholle – sowohl veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung als auch die 'Viewer-Ansicht' der der 3D-Modelle.
Quelle: Selbst

21.3 Ergebnisse der statistischen Auswertung

Gemäß der Auswertungsstrategie wird eine statistische Betrachtung der Versuchsreihen VR1 bis VR6 vorgenommen. In einem ersten Schritt wird auf die Ergebnisse der Versuchsreihen, die die klimatischen Extremata umfassen (VR1-V3), eingegangen, um die Verfahrenseignung aufgrund der zu erwartenden Eindeutigkeit der Veränderungen zu erkunden. Die Untersuchung der Nachweismöglichkeit von auch geringfügigen Klimaschwankungen und der Auswirkung auf die Probekörper erfolgt in einem zweiten Schritt (VR4-VR6). Daran anschließend erfolgt eine globale Betrachtung der Versuchsreihen VR1-VR6.

Versuchsreihen VR1-VR3

Zunächst wird die absolute und prozentuale Dimensionsänderung für die Versuchsreihen VR1 bis VR3 in Abhängigkeit zur Änderung der relativen Feuchte untersucht. Die als 'Änderung' deklarierten Daten ergeben sich aus der Berechnung der Abweichung von Ist- und Soll-Datensatz des entsprechenden Versuchs.

Die Betrachtung der Korrelation der Änderung der relativen Feuchte und der Dimensionsänderung aller Probeköper belegt eine eindeutige, positive Abhängigkeit (►Tab. 31|). So führt eine Zunahme der relativen Feuchte zu einer Ausdehnung – vice versa. Bei globaler Betrachtung der Versuche an allen Probekörpern sind die Werte in X-Dimension sehr stark korrelierend (0,921). In der Y-Dimension ist eine Ausdehnung gleichwohl eindeutig vorhanden, jedoch weniger ausgeprägt (0,839).

Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (in %)	Gesamtheit der Probekörper
X-Achse	0,921
Y-Achse	0,839

Tab. 31| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung (in %) für die Gesamtheit der Probekörper für VR1-VR3.
Quelle: Selbst

Bei der Einzelbetrachtung der drei Probekörper ist eine starke Korrelation der relativen Feuchte mit der Dimensionsänderung entlang der X-Achse zu verzeichnen ('PK_037': 0,926; 'PK_042': 0,975; 'PK_047': 0,991) (►Tab. 32|). Ebenso besteht die positive Korrelation in Bezug auf die Y-Achse, wobei Probekörper 'PK_042' im Vergleich zu den übrigen von einer deutlichen Abweichung gekennzeichnet ist (Korrelation 0,745) – Begründung siehe unten.

Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (mm)	Probekörper		
	PK_037	PK_042	PK_047
X-Achse	0,926	0,975	0,991
Y-Achse	0,939	0,745	0,956

Tab. 32| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung (in mm) je Achse und Probekörper für VR1-VR3 .
Quelle: Selbst

Eine detaillierte Betrachtung der Dimensionsänderung je Probekörper über die Versuchsreihen hinweg, zeigt das gemäß der Korrelation zu erwartende Verhalten. So geht mit einer Verringerung der relativen Feuchte in allen Fällen eine negative Dimensionsänderung, also Schrumpfung einher. In der maximalen Schrumpfung, in X-Dimension, können hierbei -2,20% (-1,556 mm; V_008, 'PK_047')

verzeichnet werden (►Tab. 33|). Ähnlich verhält sich Probekörper 'PK_037' (-2,15%, -1,517 mm; V_002). Lediglich Probekörper 'PK_042' reagiert weniger ausgeprägt auf Trockenheit mit einer maximalen Schrumpfung von -0,95% (-0,661 mm; V_014). Bei diesem Probekörper kann jedoch im Gegenzug bei einer hohen Feuchtigkeit eine vergleichsweise ausgeprägtere Ausdehnung von mindestens 2,54% (1,771 mm; V_006, 'PK_042') und maximal 3,20% (2,231 mm; V_024, 'PK_042') ausgemacht werden. Auch hier verhält sich Probekörper 'PK_037' vergleichbar, wohingegen 'PK_047' weniger signifikant reagiert – mit einer maximalen Ausdehnung von 1,98% (1,398 mm; V_018). Die mittels Kaliumcarbonat-Dihydrat erzeugte relative Feuchte bewirkt im Vergleich zur Ausgangskonditionierung mit Magnesiumnitrat-Hexahydrat ein trockeneres Klima. Damit ist auch eine negative Dimensionsänderung zu erwarten. Dies ist bei globaler Betrachtung grundsätzlich auch zutreffend. Jedoch ist in einem Fall eine unerwartete Abweichung, also eine Ausdehnung von 1,22% (0,850 mm; V_022) für Probekörper 'PK_042' festzustellen. Daraus begründet sich die oben nachgewiesene geringere Korrelation für den genannten Probekörper.

Das durch 'Silikagel E' erzeugte trockene Klima zieht im Durchschnitt eine Trocknung von 50 %RH nach sich. Wohingegen die Befeuchtung mittels Kaliumsulfat im Vergleich zur Ausgangsfeuchte lediglich eine gemittelte Änderung der relativen Feuchte um 42 %RH bedeutet. Die damit verbundenen raumdimensionalen Änderungen zeigen bei der Trocknung eine Schrumpfung um maximal -2,20% (V_008, 'PK_047'), hingegen bei Befeuchtung eine Ausdehnung um 3,28% (V_012, 'PK_037'). So führen hohe Werte der relativen Feuchte – trotz geringerer Spannweite zur Ausgangsfeuchte – zu einer größeren Dimensionsänderung der Probekörper als bei vergleichbarer Trocknung, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich. Diese trifft sowohl für die Veränderung entlang der X-Achse als auch jene entlang der Y-Achse zu.

Die Betrachtung der Dimensionsänderung entlang der Y-Achse zeigt ebenfalls ein durch die Korrelation zu erwartendes Verhalten. Die Ausprägung der Dimensionsänderung liegt jedoch deutlich unter einem Zehntel im Vergleich zur X-Achse.

So beträgt die maximale Schrumpfung über alle Probekörper hinweg -0,18% (-0,115 mm; V_005, 'PK_042'), die maximale Ausdehnung 0,28% (-0,180 mm; V_021, 'PK_037').

Konditionierungsstoff	Min/Max	X-Achse Dimensionsänderung			Y-Achse Dimensionsänderung		
		PK_037	PK_042	PK_047	PK_037	PK_042	PK_047
Silikagel E	min	-2,15%	-0,95%	-2,20%	-0,14%	-0,18%	-0,16%
	max	-0,91%	-0,58%	-1,82%	-0,07%	-0,13%	-0,07%
Kaliumcarbonat	min	-1,07%	-0,12%	-0,45%	-0,04%	-0,04%	-0,04%
	max	-0,15%	1,22%	0,03%	-0,02%	0,01%	0,02%
Kaliumsulfat	min	1,57%	2,54%	1,35%	0,15%	-0,10%	0,09%
	max	3,28%	3,20%	1,98%	0,28%	0,16%	0,11%

Tab. 33| Darstellung von Minimum und Maximum der Dimensionsänderung (in %) in Abhängigkeit zur Konditionierung, aufgeschlüsselt nach Probekörper unter Angabe der Achsenbeziehung für VR1-VR3.
Quelle: Selbst

In einem nächsten Schritt soll untersucht werden, ob die Konditionierungen und die damit verbundenen Dimensionsänderungen je Probekörper über die Versuchsreihen reproduzierbar sind. Je Konditionierung und Versuchsreihe wird hierzu über die Differenz der raumdimensionalen Änderung von Minimum und Maximum die Spannweite ermittelt. Dabei werden für alle drei Probekörper über die drei Versuchsreihen nicht unerhebliche Streuungen der Dimensionsänderungen festgestellt. Probekörper 'PK_047' zeigt im Vergleich zu den zwei anderen Probekörpern die größte Reproduzierbarkeit. Hier sind zwischen den jeweiligen Konditionierungszyklen Streuungen vorhanden, doch fallen diese nicht größer als 0,444 mm aus (63%; Kaliumsulfat; 'PK_047') (►Tab. 34|). Weitaus größer fällt die Spannweite der einzelnen Konditionierungen von Probekörper 'PK_037' und 'PK_042' aus. Hierbei handelt es sich um signifikante Abweichungen von bis zu 1,179 mm (1,71%; Kaliumsulfat; 'PK_037') und 0,933 mm (1,34%; Kaliumcarbonat-Dihydrat; 'PK_042').

	Probekörper		
	PK_037	PK_042	PK_047
Spannweite der Änderung %RH			
Silikagel E	4,2	5,6	4,2
Kaliumcarbonat	2,4	4,4	3,5
Kaliumsulfat	2,6	0,5	2,0
Spannweite der Standardabweichung (in mm)			
Silikagel E	0,236	0,144	0,071
Kaliumcarbonat	0,149	0,148	0,056
Kaliumsulfat	0,285	0,199	0,101
Spannweite der Dimensionsänderung (in mm)			
Silikagel E	0,879	0,258	0,271
Kaliumcarbonat	0,652	0,933	0,335
Kaliumsulfat	1,179	0,461	0,444

Tab. 34| Spannweiten aufgeschlüsselt nach Konditionierungsstoff für die Änderung %RH (in Bezug zur Ausgangsfeuchte), die Dimensionsänderung (in mm) entlang der X-Achse und die Standardabweichung (in mm) für VR1-VR3 . Quelle: Selbst

Sich anschließend wird über die Standardabweichung die 'Best-Fit-Ausrichtung' ausgewertet, wie sehr sich die räumliche Lage der einzelnen Messpunkte in allen Dimensionen von Soll- und Ist-Daten entsprechen. Anders als in den vorangegangenen Auswertungen wird hierbei nicht die Verformung entlang einer Achse isoliert betrachtet. Vielmehr werden die Verformungen entlang aller Achsen als Streubreite der Punkte rund um ihren Mittelwert der Abweichung angegeben. Die Passgenauigkeit der beiden Modelle lässt erstmalig quantitative Rückschlüsse über das Maß der Veränderung zu. Gleichwohl hat die Standardabweichung keine Aussagekraft über die Art und Weise der Verformung – dieses gelingt alleinig durch die Bildgebung.
Anhand der Standardabweichung soll nun das Reaktionsvermögen der einzelnen Probekörper untereinander verglichen werden. Für eine Vergleichbarkeit über alle Versuchsreihen wird hierzu je Konditionierung und Probekörper der Mittelwert der Standardabweichung aus den drei Versuchsreihen gebildet (►Tab. 35|). So zeigt der Vergleich der gemittelten Standardabweichung, dass 'PK_042' am stärksten auf Befeuchtung reagiert (Kaliumsulfat, 0,545 mm). Diese Verhalten bestätigt sich in der absoluten Dimensionsänderung. Probekörper 'PK_037' belegt anhand des Mittelwertes der

Konditionierungsstoff	Versuchs-reihe	Lageparameter	Standardabweichung	prozentuale Dimensionsänderung X-Achse	Dimensionsänderung (mm) X-Achse	Standardabweichung	prozentuale Dimensionsänderung X-Achse	Dimensionsänderung (mm) X-Achse	Standardabweichung	prozentuale Dimensionsänderung X-Achse	Dimensionsänderung (mm) X-Achse
			PK_037			PK_042			PK_047		
Silikagel E	VR1		0,563	-2,15%	-1,517	0,320	-0,74%	-0,513	0,458	-2,20%	-1,556
	VR2		0,341	-0,91%	-0,638	0,341	-0,95%	-0,661	0,387	-1,82%	-1,285
	VR3		0,328	-1,14%	-0,798	0,197	-0,58%	-0,403	0,397	-1,87%	-1,320
	VR1-VR3	**Median**	**0,341**	**-1,14%**	**-0,798**	**0,320**	**-0,74%**	**-0,513**	**0,397**	**-1,87%**	**-1,320**
	VR1-VR3	**Mittelwert**	**0,411**	**-1,40%**	**-0,984**	**0,286**	**-0,75%**	**-0,526**	**0,414**	**-1,96%**	**-1,387**
Kaliumcarbonat	VR1		0,197	-1,07%	-0,754	0,041	-0,12%	-0,083	0,106	-0,45%	-0,315
	VR2		0,048	-0,15%	-0,102	0,128	0,96%	0,673	0,066	0,03%	0,020
	VR3		0,098	-0,39%	-0,273	0,189	1,22%	0,850	0,050	-0,03%	-0,021
	VR1-VR3	**Median**	**0,098**	**-0,39%**	**-0,273**	**0,128**	**0,96%**	**0,673**	**0,066**	**-0,03%**	**-0,021**
	VR1-VR3	**Mittelwert**	**0,114**	**-0,53%**	**-0,376**	**0,119**	**0,69%**	**0,480**	**0,074**	**-0,15%**	**-0,105**
Kaliumsulfat	VR1		0,253	1,57%	1,108	0,440	2,54%	1,771	0,286	1,35%	0,954
	VR2		0,511	3,28%	2,288	0,555	2,98%	2,085	0,387	1,98%	1,398
	VR3		0,537	3,06%	2,140	0,639	3,20%	2,231	0,353	1,61%	1,141
	VR1-VR3	**Median**	**0,511**	**3,06%**	**2,140**	**0,555**	**2,98%**	**2,085**	**0,353**	**1,61%**	**1,141**
	VR1-VR3	**Mittelwert**	**0,434**	**2,64%**	**1,845**	**0,545**	**2,91%**	**2,029**	**0,342**	**1,65%**	**1,164**

Tab. 35| Vergleich der Standardabweichung mit der Dimensionsänderung (in % und mm) anhand des Mittelwertes je Versuchsreihe (VR1-VR3), Probekörper und Konditionierung. Quelle: Selbst

Standardabweichung ebenfalls ein ausgeprägteres Verhalten bei Befeuchtung (Kaliumsulfat, 0,434 mm) als bei Trocknung. Probekörper 'PK_047' hingegen reagiert sowohl im Vergleich mit den übrigen Probekörpern als auch bezogen auf das eigene Reaktionsvermögen am signifikantesten auf Trocknung ('Silikagel E', Mittelwert der Standardabweichung 0,414 mm). Die Erkenntnisse aus der Betrachtung zur Standardabweichung decken sich grundsätzlich mit dem oben festgestellten Verhalten bezüglich der Dimensionsänderung entlang der X-Achse.

Konditionierungsstoff	Versuchsreihe	PK_037		PK_042		PK_047	
		Oberflächenverformung	Maß der Oberflächenverformung (mm)	Oberflächenverformung	Maß der Oberflächenverformung (mm)	Oberflächenverformung	Maß der Oberflächenverformung (mm)
Silikagel E	VR1	konvex	2,2	konvex	1,2	konvex	1,7
	VR2	konvex	2,2	konvex	1,3	konvex	1,5
	VR3	konvex	2	konvex	1,1	konvex	1,4
Kaliumcarbonat	VR1	konkav	0,5	keine	0	konvex	0,3
	VR2	keine	0	keine	0	keine	0
	VR3	konvex	0,4	konkav	0,2	keine	0
Kaliumsulfat	VR1	konkav	0,75	konkav	1,4	konkav	1,1
	VR2	konkav	1,95	konkav	1,8	konkav	1,4
	VR3	konkav	1,95	konkav	2,25	konkav	1,4

Tab. 36| Oberflächenverformung der Probekörper, deren Maß (in mm) und Richtung für VR1-VR3 .
Quelle: Selbst

Die Auswertung der Falschfarbendarstellung gewährt weiter gehende quantitative und qualitative Rückschlüsse über die Objektverformung. So belegt sich für alle Probekörper bei Trocknung durch 'Silikagel E' in allen Versuchsreihen der kausale Zusammenhang einer konvexen Oberflächenverformung. Das Verformungsmaß ist am Probeköper 'PK_037' mit maximal 2,2 mm im Vergleich zu den anderen Probekörpern am stärksten ausgeprägt (►Tab. 36|). Am geringsten hingegen ist das konvexe Verhalten von 'PK_042'. Für die einzelnen Probekörper gilt in der genannten Konditionierung ein reproduzierbares Verhalten. Auch in einem extrem feuchten Klima, das mittels Kaliumsulfat erzielt wurde, verhalten sich alle Probekörper bezüglich ihrer Verformungsrichtung identisch. Ihre Oberflächenverformung ist konkav – die quantitative Ausprägung fällt jedoch unterschiedlich aus. So reagiert 'PK_042' mit einer maximalen Verformung um 2,25 mm am stärksten, im Gegenzug fällt diese bei 'PK_047' mit 1,4 mm am geringsten aus. Da das Verhalten bei Kaliumsulfat je Probekörper sehr unterschiedlich ist, wird lediglich 'PK_047' als reproduzierbar bewertet. Weniger eindeutig bzw. vergleichbar ist das Verhalten bei Kaliumcarbonat-Dihydrat. Während Probeköper 'PK_047' sich im Maximum mit 0,3 mm konvex verformt bzw. sich nicht verändert, reagiert 'PK_042' ebenso kaum. Widersprüchlich ist das Verhalten bei Probekörper 'PK_037', der sich sowohl konkav als auch konvex verformt.

Untersuchung zur Reversibilität von Dimensionsänderungen an den Holzprobekörpern

Wie geschildert werden innerhalb der drei Versuchsreihen die Probekörper mittels gesättigter Magnesiumnitrat-Hexahydrat-Lösung jeweils wieder in einen mittleren Feuchtebereich – den Ausgangszustand – konditioniert. Für eine Bewertung der Reversibilität der drei Probekörper werden die Soll-Daten aus der ersten Konditionierung (VR1) als Bezugsgröße definiert und mit den Soll-Daten der übrigen Versuchsreihen (VR2-VR3) verglichen. Anhand des Vergleiches werden alle Probekörper als irreversibel verändert eingestuft. Die geringste Veränderung weist 'PK_042' auf. So liegt die maximale Abweichung zur Ausgangsgröße entlang der X-Achse bei 0,100 mm (0,14%, ►Tab. 37|). Weitaus gravierender sind die irreversiblen Veränderungen für 'PK_047' mit -0,165 mm (-0,23%) und 'PK_037' mit -0,805 mm (-1,14%). Auffällig sind die negativen Werte, die auf eine bleibende Schrumpfung der Probekörper rückschließen lassen. Sehr wahrscheinlich sind hierfür irreversible Schäden durch eine plastische Verformung, verursacht durch die extreme Befeuchtung > 95 %RH.

		PK_037			PK_042			PK_047		
		VR1	VR2	VR3	VR1	VR2	VR3	VR1	VR2	VR3
Änderung (in %RH) in Bezug zur Ausgangsfeuchte (VR1)		0	-2,6	-2,7	0	-0,3	-1,5	0	-2	-2,1
X-Achse	Veränderung (in mm) in Bezug zur Ausgangslänge (VR1)	0	-0,805	-0,693	0	0,100	-0,051	0	-0,114	-0,165
	Veränderung (in %) in Bezug zur Ausgangslänge (VR1)	0	-1,14%	-0,98%	0	0,14%	-0,07%	0	-0,16%	-0,23%
Y-Achse	Veränderung (in mm) in Bezug zur Ausgangslänge (VR1)	0	-0,052	-0,054	0	-0,009	-0,015	0	-0,011	-0,005
	Veränderung (in %) in Bezug zur Ausgangslänge (VR1)	0	-0,08%	-0,08%	0	-0,01%	-0,02%	0	-0,02%	-0,01%

Tab. 37| Bewertung der Reversibilität von Dimensionsänderungen aller Soll-Daten (Ausgangsfeuchte) im Vergleich zur ersten Versuchsreihe (VR1).
Quelle: Selbst

Auch anhand einer exemplarischen bildgebenden Auswertung bestätigen sich die oben hergeleiteten Erkenntnisse (►Abb. 163| und Abb. 164|).[552] Hierzu wird ein Vergleich der Soll-Daten von 'PK_037' aus der ersten Versuchsreihe (VR1) mit jenen aus der zweiten Versuchsreihe (VR2) vorgenommen (►Tab. 38|). So zeigt die Standardabweichung mit 0,240 mm signifikante Soll-Ist-Differenzen. Ebenso belegt die Bildgebung irreversible Dimensionsänderung in Form einer Schrumpfung entlang der X-Achse, verifizierbar über Nadeldiagramme. Im abgedruckten Messprotokoll wird zusätzlich durch die Sicht auf die Stirnseite des Probekörpers und die dort rot eingeblendeten Hilfslinien eine bleibende konvexe Verformung dokumentiert.

Probekörper Holz Reproduzierbarkeit

Versuchsreihe_Untersuchung zur Reproduzierbarkeit

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_003	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	22,7	56,6	Soll (V_028)
M_039	PK_037	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,8	54,0	Ist (V_028)

Tab. 38| Übersicht des durchgeführten Experimentes zur Untersuchung der Reversibilität (Probekörper Holz), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung.
Quelle: Selbst

552 Vergleiche: V_028, ‚PK_037' (Soll-Daten: M_003 bei 56,6 %RH / Ist-Daten: M_039 bei 54,0 %RH, Konditionierung: Δ2,6 %RH), Protokollseite 1 f.

Versuch: V_028

Analyse der Messergebnisse hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit
Gegenüberstellung der Ergebnisse von PK_037 (Gouache) bei 56,6 %RH (M_003) und der verifizierenden Messung bei 54,0 %RH (M_039)

Konstantklima über gesättigter Salzlösung:
Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat

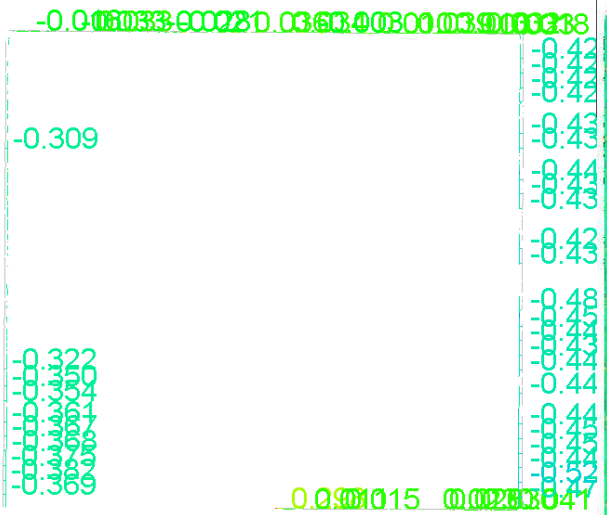


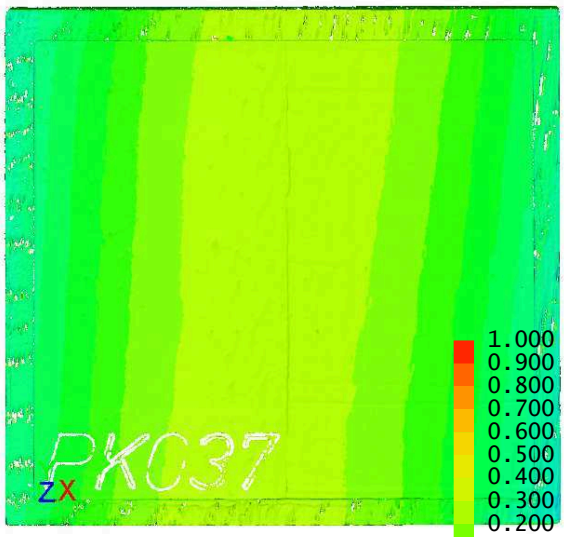
Text

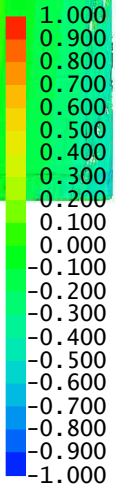
Standard-Abweichung: 0.2401569
Mittlere Abweichung: -0.0522978
Kleinste Abweichung: -4.5415108
Größte Abweichung: 4.6442230

==========
Bewegte Objekte:
==========

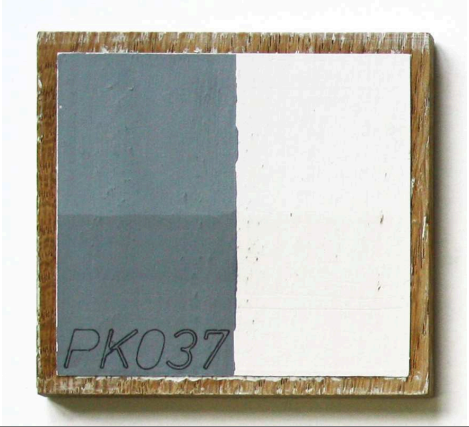
PK037_041_045_140616_566RFMAGNESIUMNITRAT







Y
Z X

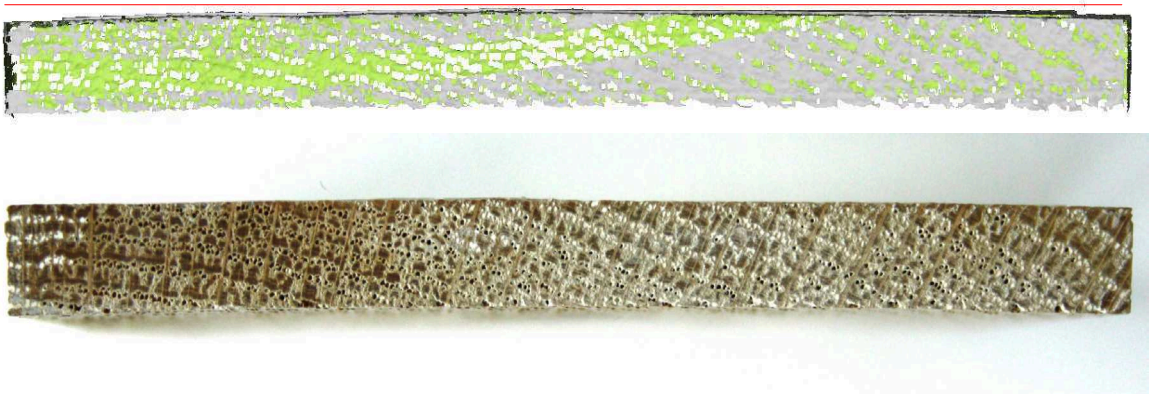


PK_037 bei 55,6 %RH (Soll-Daten)
PK_037 bei 54,0 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	PK_037		
Benennung:	Gegenüberstellung Ergebn. verifiz. Messungen		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	08.07.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2	

Abb. 163| Messprotokoll zur Untersuchung der Reversibilität der Holzprobekörper – V_028 an PK_37, Protokollseite 1.
Quelle: Selbst

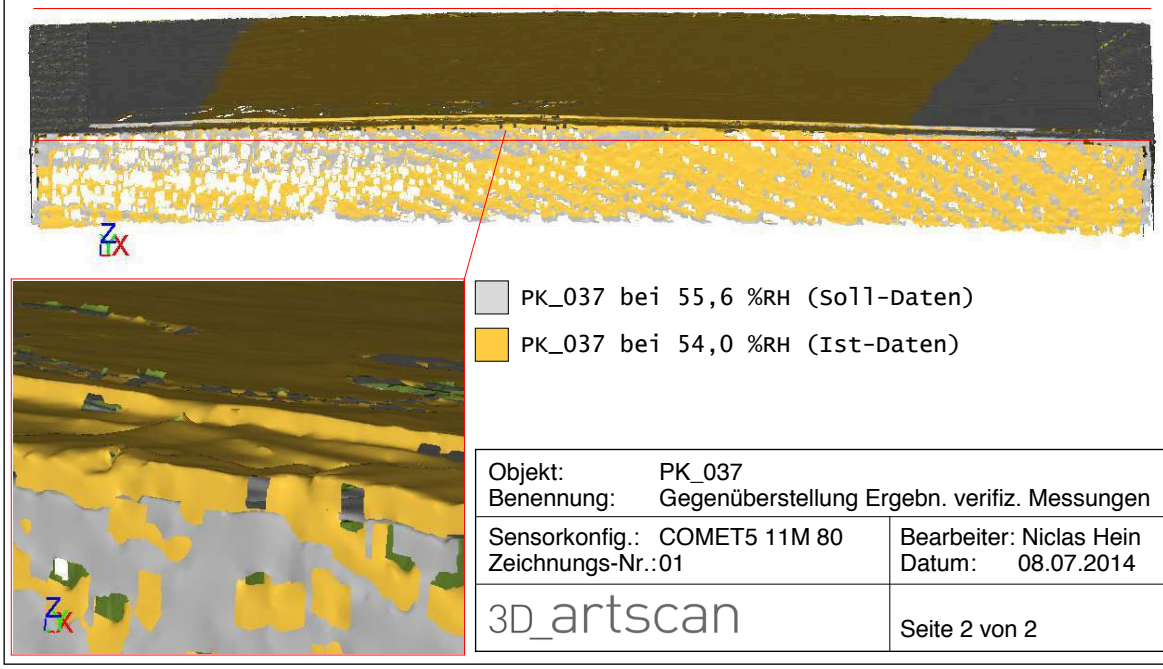
PK_037 bei 56,6 %RH (M_003)
Erste Konditionierung mittels gesättigter Magnesiumnitrat-Hexahydrat-Lösung



PK_037 bei 54,0 %RH (M_039)
Zweite Konditionierung mittels gesättigter Magnesiumnitrat-Hexahydrat-Lösung. Zwischenzeitig erfolgte die Konditionierung auf weiter Konstantklimata (45,5 %RH (M_002), 5,4 %RH (M_001) und 97,4 %RH (M_004)).



Vergleich von PK_037 bei 56,6 %RH (M_003) und bei 54,0 %RH (M_039)
Durchdringung der beiden aufeinander ausgerichteten virtuellen Modelle. Die gezeigte Darstellung belegt eindeutige Diskrepanzen.



Objekt:	PK_037		
Benennung:	Gegenüberstellung Ergebn. verifiz. Messungen		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	08.07.2014
3D_artscan		Seite 2 von 2	

Abb. 164| Messprotokoll zur Untersuchung der Reversibilität der Holzprobekörper – V_028 an PK_37, Protokollseite 2.
Quelle: Selbst

Versuchsreihen VR4-VR6

In den Versuchsreihen VR4, VR5 und VR6 werden die Probekörper mit der selben Methodik wie in den vorangegangen Versuchsreihen konditioniert – jedoch mit den Konditionierungsstoffen Ammoniumnitrat, Magnesiumnitrat-Hexahydrat und Natriumbromid. Dieses Mal mit dem Ziel keine Extremfeuchten sondern ausschließlich geringere Feuchteschwankungen zu erzeugen, um deren Auswirkungen zu untersuchen. Vorrangig soll hierbei die angesprochene Geringfügigkeitsgrenze ermittelt werden. Ammoniumnitrat, das zu einem moderaten Anstieg der relativen Feuchte von 10 %RH führt, müsste bei den Probekörpern zu der ausgeprägtesten Dimensionsänderung führen. Bei der Konditionierung über Natriumbromid ist ebenfalls eine Ausdehnung zu erwarten, da hiermit eine geringfügige Befeuchtung um ca. 5 %RH verbunden ist. Von der bisherigen Vorgehensweise bei VR1-VR3 abweichend, wird der zu Beginn der Versuchsreihen erzeugte Datensatz (VR4), konditioniert mit Magnesiumnitrat-Hexahydrat, für die Experimente durchgängig als Soll-Datensatz verwendet. Da die Experimente den mittleren Feuchtebereich betreffen, der hinsichtlich seiner Objektbelastung gemeinhin als unproblematisch gilt, werden keine irreversiblen Veränderungen erwartet. Weiterhin implizieren die Versuchsreihen eine erneute Konditionierung mit Magnesiumnitrat-Hexahydrat, was einer Ausgangsfeuchte und damit einem Soll-Zustand gleichkommt, jedoch ein Ist-Datensatz nach sich zieht. Dieser erneute Soll-Ist Vergleich soll etwaige Diskrepanzen aufdecken und die Reproduzierbarkeit belegen. Hier wird jedoch keine Veränderung an den Probekörpern erwartet.

Eine Betrachtung der Korrelation zwischen der Änderung der relativen Feuchte und der Dimensionsänderung der Probeköper in ihrer Gesamtheit, soll einen ersten Hinweis auf die Reproduzierbarkeit der Dimensionsänderungen geben. In globaler Betrachtung der Experimente an allen Probekörpern kann den Werten sowohl in X-Dimension (Korrelation -0,007) als auch Y-Dimension (Korrelation 0,463) keine Korrelation nachgewiesen werden (►Tab. 39|). Dies ist ein erstes Indiz für ein nicht reproduzierbares, bzw. nicht vergleichbares Verhalten der Probekörper miteinander.

	Gesamtheit der Probekörper
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (in %) in X-Achse	-0,007
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (in %) in Y-Achse	0,463

Tab. 39| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung (in %) aller Probekörper für VR4-VR6.
Quelle: Selbst

Bei einer Einzelbetrachtung der Probekörper hinsichtlich der Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung entlang der X-Achse – jedoch über VR4-VR6 kumuliert – ist der höchste Wert bei Probekörper 'PK_037' (0,54) auszumachen, wohingegen 'PK_042' (0,044) und 'PK_047' (0,164) gegen null gehen. Es besteht folglich keine Korrelation (►Tab. 40|). In Y-Dimension können für Probeköper 'PK_037' und 'PK_047' Werte über 0,6

(Korrelation: 'PK_037'=0,678; 'PK_047'=0,687) verzeichnet werden, die auf eine schwache Korrelation hinweisen.

	Probekörper		
	PK_037	PK_042	PK_047
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (mm) in X-Achse	0,540	0,044	0,164
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (mm) in Y-Achse	0,678	0,509	0,687

Tab. 40| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung (in mm) je Achse und Probekörper für VR4-VR6. Quelle: Selbst

Zur Ergründung der nicht gegebenen Korrelation entlang der X-Achse werden die Dimensionsänderungen je Konditionierung und Probekörper im Detail betrachtet. Ein auffälliges Verhalten kann bei allen Probekörpern gehäuft anhand der Dimensionsänderungen bei Versuchsreihe VR4 festgestellt werden. Eine erneute Berechnung der Korrelation, ausgenommen Versuchsreihe VR4, zeigt daraufhin eine starke Korrelation der Dimensionsänderung und der Änderung der relativen Feuchte (►Tab. 41|). So weist Probeköper 'PK_037', bei Betrachtung der X-Achse, eine Korrelation von nahezu 1 auf (0,989), 'PK_042' von 0,763 und 'PK_047' von 0,798 (►Tab. 42|). Entlang der Y-Achse fällt diese geringer aus. Die grundsätzlich gegebene Korrelation lässt schlussfolgern, dass sich die Dimensionsänderung in weitestgehender Abhängigkeit zur veränderten relativen Feuchte verhält – exklusive der Werte für die Versuchsreihe VR4 (Begründung siehe unten).

Konditionierungs-stoff	Versuchs-reihe	X-Achse Dimensionsänderung		
		PK_037	PK_042	PK_047
Ammoniumnitrat	VR4	**0,22%**	**0,02%**	**-0,54%**
	VR5	0,41%	0,82%	-0,34%
	VR6	0,37%	0,76%	-0,30%
Natriumbromid	VR4	0,34%	0,73%	**-0,48%**
	VR5	0,33%	0,66%	-0,32%
	VR6	0,35%	0,77%	-0,31%
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	VR4	0,22%	**-0,01%**	-0,46%
	VR5	0,25%	0,70%	-0,46%
	VR6	0,25%	0,65%	-0,44%

Tab. 41| Darstellung der Dimensionsänderung (in %) je Versuchsreihe in Abhängigkeit zur Konditionierung, gravierende Abweichungen sind hervorgehoben. Quelle: Selbst

	Probekörper		
	PK_037	PK_042	PK_047
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (mm) in X-Achse	0,989	0,763	0,798
Korrelation von Änderung %RH und Dimensionsänderung (mm) in Y-Achse	0,757	0,687	0,447

Tab. 42| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung (in mm) je Achse und Probekörper exklusive der Versuchsreihe VR4. Quelle: Selbst

Eine Betrachtung der Abhängigkeit von Standardabweichung und Feuchteschwankung über alle Experimente zeigt zunächst bei 'PK_042' und 'PK_047' eine schwache Korrelation – hingegen bei 'PK_037' mit 0,493 keine (►Tab. 43|). Ein genauerer Blick auf die Messergebnisse offenbart Unstimmigkeiten in der Standardabweichung abermals für die Versuchsreihe VR4 bei der Konditionierung der Probekörper über Ammoniumnitrat (siehe oben). Die Gründe für

die Abweichungen sind nicht bekannt. In der Konsequenz wird eine erneute Korrelationsbetrachtung je Probekörper vorgenommen, jedoch exklusive der Messergebnisse durch die Konditionierung mit Ammoniumnitrat bei Versuchsreihe VR4. Die Korrelation fällt damit eindeutig positiv aus. 'PK_037' zeigt nun im Gesamten eine starke Korrelation mit 0,885. Korrelierend, jedoch schwächer ausgeprägt, ist 'PK_042' mit 0,673. Stark korrelierend ist 'PK_047', wobei diese mit -0,913 negativ ausfällt. Das Verhalten deckt sich jedoch mit der nachgewiesenen Schrumpfung des Materials trotz Befeuchtung; es wird darauf im Textverlauf eingegangen.

		PK_037		PK_042		PK_047	
Konditionierungsstoff	Versuchs-reihe	Standard-abweichung	Änderung relative Feuchte |%RH|	Standard-abweichung	Änderung relative Feuchte |%RH|	Standard-abweichung	Änderung relative Feuchte |%RH|
Ammoniumnitrat	VR4	**0,071**	**10,5**	**0,127**	**10,4**	**0,094**	**10,6**
	VR5	0,099	10,6	0,142	10,4	0,081	10,6
	VR6	0,105	8,1	0,144	4,3	0,081	8,2
Natriumbromid	VR4	0,086	6,7	0,127	6,6	0,091	6,8
	VR5	0,089	5,4	0,130	5,2	0,090	5,4
	VR6	0,094	5,1	0,133	5,0	0,083	5,2
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	VR4	0,071	0,5	0,112	0,0	0,102	0,6
	VR5	0,074	0,8	0,074	0,6	0,104	0,8
	VR6	0,080	0,0	0,118	0,1	0,100	0,1
Korrelation (Änderung der relativen Feuchte |%RH| zur Standardabweichung			0,493		0,607		-0,745
Korrelation (Änderung der relativen Feuchte |%RH| zur Standardabweichung ohne Ammoniumnitrat VR4			0,885		0,673		-0,913

Tab. 43| Korrelation von Standardabweichung und Wert der Änderung der relativen Feuchte mit und ohne VR4 bei Ammoniumnitrat, gravierende Abweichungen sind hervorgehoben.
Quelle: Selbst

Außerdem wird untersucht, ob gemäß der Theorie ein schlüssiges, hygroskopisches Verhalten auch im mittleren Feuchtebereich bei vergleichsweise geringfügigen Klimaschwankungen zu belegen ist. Im Zuge dessen wird die oben erfolgte Korrelationsberechnung je Probekörper nun im Detail untersucht. So wird ergründet, inwiefern die jeweiligen Konditionierungen reproduzierbare Dimensionsänderungen ergeben. Die Dimensionsänderungen werden anhand von Standardabweichung und Längenänderung ausgewertet – die Bewertung ihrer Reproduzierbarkeit ergibt sich aus dem Abgleich der Experimente je Probeköper über die drei Versuchsreihen.

Zur Bewertung der Dimensionsänderung in Abhängigkeit zum Konditionierungsstoff wird jeweils auf den Median der drei Versuchsreihen zurückgegriffen. Hierzu wird zunächst 'PK_037' betrachtet. Erwartungsgemäß wird bei Ammoniumnitrat die ausgeprägteste Dimensionsänderung erzielt (Median Standardabweichung 0,099 mm, Median Dimensionsänderung X-Achse 0,258 mm, ►Tab. 44|). Entsprechend der geringeren Befeuchtung durch Natriumbromid fällt der Median der Dimensionsänderung in dieser Konditionierung kleiner aus (Median Standardabweichung 0,089 mm, Median Dimensionsänderung X-Achse 0,240 mm). Obgleich bei der Konditionierung durch Magnesiumnitrat-Hexahydrat kaum eine Feuchteschwankung (ca. 0,8 %RH, ►Tab. 43|) vorliegt, wird erstaunlicherweise eine deutliche Dimensionsänderung festgestellt (Median

Konditionierungs-Stoff	Versuchsreihe	Lageparameter	Standardabweichung	Prozentuale Dimensions-änderung X-Achse	Dimensions-änderung (mm) X-Achse	Standardabweichung	prozentuale Dimensions-änderung X-Achse	Dimensions-änderung (mm) X-Achse	Standardabweichung	Prozentuale Dimensions-änderung X-Achse	Dimensions-änderung (mm) X-Achse
			PK_037			PK_042			PK_047		
Ammoniumnitrat	VR4		0,071	0,22%	0,152	0,127	0,02%	0,016	0,094	-0,54%	-0,385
	VR5		0,099	0,41%	0,289	0,142	0,82%	0,574	0,081	-0,34%	-0,242
	VR6		0,105	0,37%	0,258	0,144	0,76%	0,532	0,081	-0,30%	-0,213
	VR4-VR6	Median	**0,099**	**0,37%**	**0,258**	**0,142**	**0,76%**	**0,532**	**0,081**	**-0,34%**	**-0,242**
	VR4-VR6	Mittelwert	**0,092**	**0,33%**	**0,233**	**0,138**	**0,54%**	**0,374**	**0,086**	**-0,40%**	**-0,280**
Natriumbromid	VR4		0,086	0,34%	0,240	0,127	0,73%	0,507	0,091	-0,48%	-0,341
	VR5		0,089	0,33%	0,229	0,130	0,66%	0,459	0,090	-0,32%	-0,229
	VR6		0,094	0,35%	0,241	0,133	0,77%	0,536	0,083	-0,31%	-0,220
	VR4-VR6	Median	**0,089**	**0,34%**	**0,240**	**0,130**	**0,73%**	**0,507**	**0,090**	**-0,32%**	**-0,229**
	VR4-VR6	Mittelwert	**0,090**	**0,34%**	**0,237**	**0,130**	**0,72%**	**0,501**	**0,088**	**-0,37%**	**-0,263**
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	VR4		0,071	0,22%	0,156	0,112	-0,01%	-0,008	0,102	-0,46%	-0,327
	VR5		0,074	0,25%	0,177	0,074	0,70%	0,489	0,104	-0,46%	-0,325
	VR6		0,080	0,25%	0,178	0,118	0,65%	0,453	0,100	-0,44%	-0,311
	VR4-VR6	Median	**0,074**	**0,25%**	**0,177**	**0,112**	**0,65%**	**0,453**	**0,102**	**-0,46%**	**-0,325**
	VR4-VR6	Mittelwert	**0,075**	**0,24%**	**0,170**	**0,101**	**0,45%**	**0,311**	**0,102**	**-0,45%**	**-0,321**

Tab. 44| Vergleich der prozentualen und absoluten Dimensionsänderung mit der Standardabweichung anhand von Mittelwert und Median.
Quelle: Selbst

Standardabweichung 0,074 mm, Median Dimensionsänderung X-Achse 0,177 mm, ►Tab. 44|). Dieses offenbart nicht nur der Median, sondern ebenso die beiden anderen Ergebnisse der Versuchsreihen (VR4 und VR6) – sie fallen vergleichbar aus. Die Spannweite beträgt bei dieser Konditionierung, bezogen auf die Standardabweichung, 0,009 mm und für die Dimensionsänderung entlang der X-Achse 0,022 mm. Damit liegt für Magnesiumnitrat-Hexahydrat ein reproduzierbares Verhalten vor. Ebenso zeigt die Betrachtung der Spannweite für die Konditionierungen durch Natriumbromid eine sehr hohe Reproduzierbarkeit (Spannweite Standardabweichung 0,012 mm, Spannweite Dimensionsänderung X-Achse 0,008 mm, ►Tab. 45|). Obgleich nicht so stark ausgeprägt sind die Dimensionsänderungen auch bei Ammoniumnitrat reproduzierbar (Spannweite Standardabweichung 0,034 mm, Spannweite Dimensionsänderung X-Achse 0,137 mm). Die zuletzt aufgeführte Spannweite der Dimensionsänderung entlang der X-Achse fällt jedoch, verglichen mit den sehr geringen Spannweiten der Konditionierungen von Magnesiumnitrat-Hexahydrat und Natriumbromid, verhältnismäßig hoch aus. Wie bereits oben erwähnt ist diese der Versuchsreihe VR4 bei Ammoniumnitrat geschuldet. Eine Betrachtung exklusive des genannten Experimentes zeigt für die Konditionierungen mittels Ammoniumnitrat eine hohe Reproduzierbarkeit (Spannweite Standardabweichung 0,006 mm, Spannweite Dimensionsänderung X-Achse 0,031 mm, ►Tab. 46|).

	Probekörper		
Spannweite der Standardabweichung (in mm)	PK_037	PK_042	PK_047
Ammoniumnitrat	0,034	0,017	0,013
Natriumbromid	0,008	0,007	0,008
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	0,009	0,044	0,004
Spannweite der Dimensionsänderung (in mm)			
Ammoniumnitrat	0,137	0,558	0,172
Natriumbromid	0,012	0,077	0,121
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	0,022	0,016	0,016

Tab. 45| Spannweite der Dimensionsänderung entlang der X-Achse und Standardabweichung – inklusive Versuchsreihe VR4 bei Ammoniumnitrat.
Quelle: Selbst

	Probekörper		
Spannweite der Standardabweichung (in mm)	PK_037	PK_042	PK_047
Ammoniumnitrat	0,006	0,002	0,000
Natriumbromid	0,008	0,007	0,008
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	0,009	0,044	0,004
Spannweite der Dimensionsänderung (in mm)			
Ammoniumnitrat	0,031	0,042	0,029
Natriumbromid	0,012	0,077	0,121
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	0,022	0,016	0,016

Tab. 46| Spannweite der Dimensionsänderung entlang der X-Achse und Standardabweichung – exklusive Versuchsreihe VR4 bei Ammoniumnitrat.
Quelle: Selbst

Das eben für 'PK_037' geschildert Verhalten kann im Grundsätzlichen auch für 'PK_042' und 'PK_047' attestiert werden. Wie dieses bereits durch die Korrelationsbetrachtung aufgezeigt wurde, fällt die Reproduzierbarkeit im Vergleich tendenziell geringer aus. Trotz der reproduzierbaren Ergebnisse zeigt das Verhalten von 'PK_047' im

Gegensatz zu den übrigen Probekörpern ein stringent-anormales, hygroskopisches Verhalten. Eine Befeuchtung führt zu einer Schrumpfung (Ammoniumnitrat/Natriumbromid/Magnesiumnitrat-Hexahydrat: Median Standardabweichung 0,081 mm/0,090 mm/0,102 mm; Median Dimensionsänderung X-Achse -0,242 mm/-0,229 mm/-0,325 mm, ►Tab. 45|). Mit zunehmender Befeuchtung reduziert sich jedoch das Maß der Schrumpfung.

Für eine vollständige Betrachtung der Dimensionsänderungen am Probekörper sind ebenfalls Verformungsgrad und -maß zu berücksichtigen. Mittels der eingesetzten Konditionierungsstoffe sind die relativen Feuchte entweder nahezu nicht geändert oder geringfügig um ca. 5 %RH bzw. moderat um 10 %RH verändert worden. Gemäß vorangegangener Auswertungen wird eine entsprechende Verformung erwartet. Über die drei Versuchsreihen betrachtet, bestätigt sich dieses durch 'PK_037', der im Maximum bei Magnesiumnitrat-Hexahydrat eine konkave Verformung um etwa 0,1 mm aufweist (►Tab. 47|). In der folgenden Konditionierung, die mit Natriumbromid erzeugt wurde, liegt die konkave Verformung bei maximal 0,2 mm – gefolgt von Ammoniumnitrat, das eine maximale, konkave Verformung von 0,3 mm bewirkt. Die Werte für 'PK_042' folgen dem Verhaltensmuster von 'PK_037'. So ist die maximale, konkave Verformung mit 0,3 mm bei Ammoniumnitrat festzustellen, die mittlere mit 0,2 mm bei Natriumbromid und die geringste mit 0,1 bzw. 0 bei Magnesiumnitrat-Hexahydrat. Bei Probekörper 'PK_047' ist trotz der Änderung der Feuchte keine konkave sondern eine konvexe Verformung nachweisbar. Damit kennzeichnet sich das Verhalten des Probekörpers abermals anormal. Dieser ist nahezu konstant mit 0,1 mm konvex verformt.

Gesamtbetrachtung der Versuchsreihen VR1-VR6

Die Ergebnisse aller Versuchsreihen an den Holzprobekörpern (VR1-VR6) werden im Folgenden miteinander in Beziehung gesetzt. Damit lassen sich Zusammenhänge bei geringfügigen, aber auch gravierenderen Änderungen der relativen Feuchte aufzeigen und vergleichen. Über den Grad der Abhängigkeit von Dimensionsänderungen entlang der X-Achse und Änderungen der relativen Feuchte soll die Korrelation Aufschluss geben. Alle Probeköper sind sehr stark korrelierend – die größte Abhängigkeit weist 'PK_047' auf (Korrelation 0,938) (►Tab. 48|). Eine Untersuchung der Standardabweichung, welche repräsentativ ist für eine globale Abweichung des Ist-Datensatzes im Vergleich zum Soll-Datensatz, zeigt ebenfalls für alle Probekörper starke Abhängigkeiten. Auch hier besteht die größte Abhängigkeit bei Probekörper 'PK_047' im Vergleich zu den anderen Probekörpern (Mittelwert der Korrelation 0,972). Am schwächsten fällt die Korrelation bei Probekörper 'PK_042' (Mittelwert der Korrelation 0,892) aus. Insgesamt zeigt die Korrelation sowohl bei der Dimensionsänderung als auch bei der Standardabweichung eine starke Abhängigkeit der Änderung der relativen Feuchte zur Verformung und Dimensionsänderung der Probekörper Holz.

Konditionierungsstoff	Versuchsreihe	PK_037 Oberflächenverformung	PK_037 Maß der Oberflächenverformung (mm)	PK_042 Oberflächenverformung	PK_042 Maß der Oberflächenverformung (mm)	PK_047 Oberflächenverformung	PK_047 Maß der Oberflächenverformung (mm)
Ammoniumnitrat	VR4	konkav	0,2	konkav	0,2	konvex	0,1
	VR5	konkav	0,2	konkav	0,3	konvex	0,1
	VR6	konkav	0,3	konkav	0,3	konvex	0,1
Natriumbromid	VR4	konkav	0,2	konkav	0,2	konvex	0,1
	VR5	konkav	0,1	konkav	0,1	konvex	0,1
	VR6	konkav	0,1	konkav	0,2	konvex	0,1
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	VR4	konkav	0,1	keine	keine	keine	keine
	VR5	keine	keine	keine	keine	keine	keine
	VR6	konkav	0,1	konkav	0,1	konvex	0,1

Tab. 47| Oberflächenverformung, deren Maß (in mm) und Richtung, Abgeleitet von der zugehörigen Falschfarbendarstellung. Quelle: Selbst

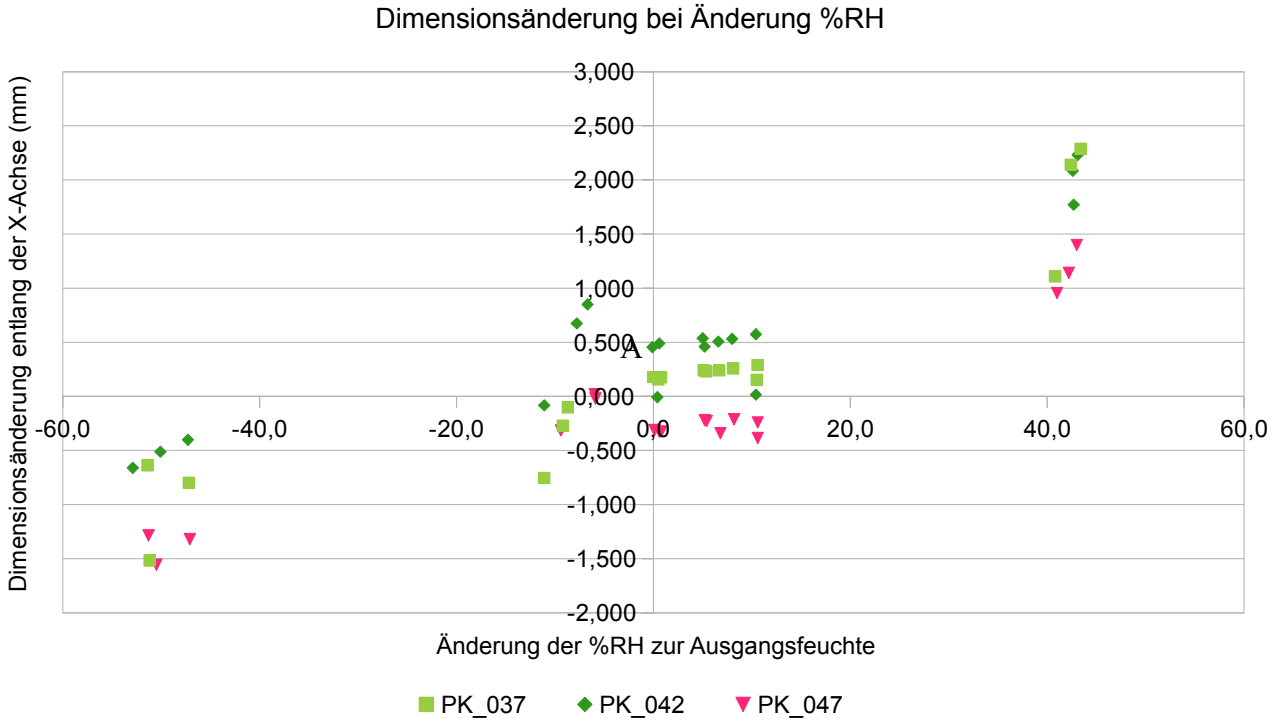
	Korrelation Dimensionsänderung und Änderung %RH				Korrelation Standardabweichung und Änderung %RH			
	PK_037	PK_042	PK_047	alle Probekörper	PK_037	PK_042	PK_047	alle Probekörper
Trocknung (Änderung %RH < 0)	0,700	0,897	0,985	0,778	-0,882	-0,815	-0,990	-0,872
Befeuchtung (Änderung %RH >0)	0,932	0,950	0,971	0,895	0,916	0,968	0,953	0,911

Tab. 48| Korrelation von Änderung der relativen Feuchte und Dimensionsänderung bzw. Standardabweichung für VR1-VR6.
Quelle: Selbst

In den vorangegangen Auswertungen für die Versuchsreihen VR1-VR3 sowie VR4-VR6 konnten deutliche Unterschiede der einzelnen Probeköper hinsichtlich ihres Verhaltens bei einer veränderten Umgebungsfeuchte ausgemacht werden. In einer Gesamtbetrachtung ist daher bereits vor einer Berechnung der Korrelation von relativer Feuchte und Dimensionsänderung, bzw. von relativer Feuchte und Standardabweichung, bei allen Probekörper davon auszugehen, dass die gemeinsame Abhängigkeit und damit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geringer ausfallen wird als bei einer Probekörper-spezifischen Betrachtung (►Tab. 48|). Sowohl bei Befeuchtung als auch bei Trocknung können dem Grundsatz nach starke Korrelation ausgemacht werden, die jedoch aus den eingangs erwähnten Gründen geringer ausfallen als die Korrelationen bezogen auf einen einzelnen Probekörper.

Eine grafische Darstellung der Dimensionsänderung in Abhängigkeit zur Umgebungsfeuchte verdeutlicht unerwartete Messwert, die auf Basis der Erkenntnisse zur Hygroskopizität nicht erklärbar sind. Exemplarisch ist auf Probekörper 'PK_042' zu verweisen, der eine positive Dimensionsänderung bei Trocknung (X-Achse > 0 und Y-Achse > 0) aufweist, sowie Probekörper 'PK_047', der eine negative Dimensionsänderung bei Befeuchtung (X-Achse > 0 und Y-Achse < 0) offenbart (►Abb. 165| - Abb. 167|).

Abb. 165| Darstellung der Dimensionsänderung je Probekörper in Abhängigkeit zur Änderung der relativen Feuchte für VR1-VR6.
Quelle: Selbst



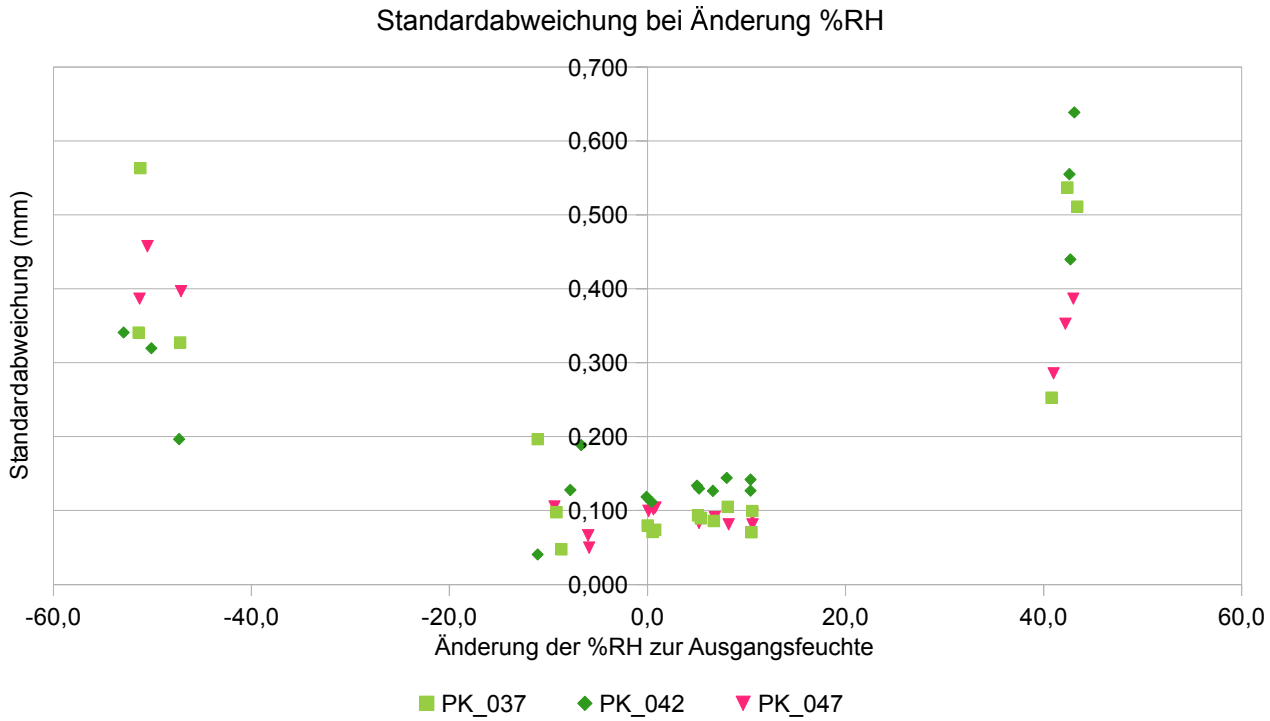


Abb. 166| Darstellung der Standardabweichung je Probekörper in Abhängigkeit zur Änderung der relativen Feuchte für VR1-VR6 . Quelle: Selbst

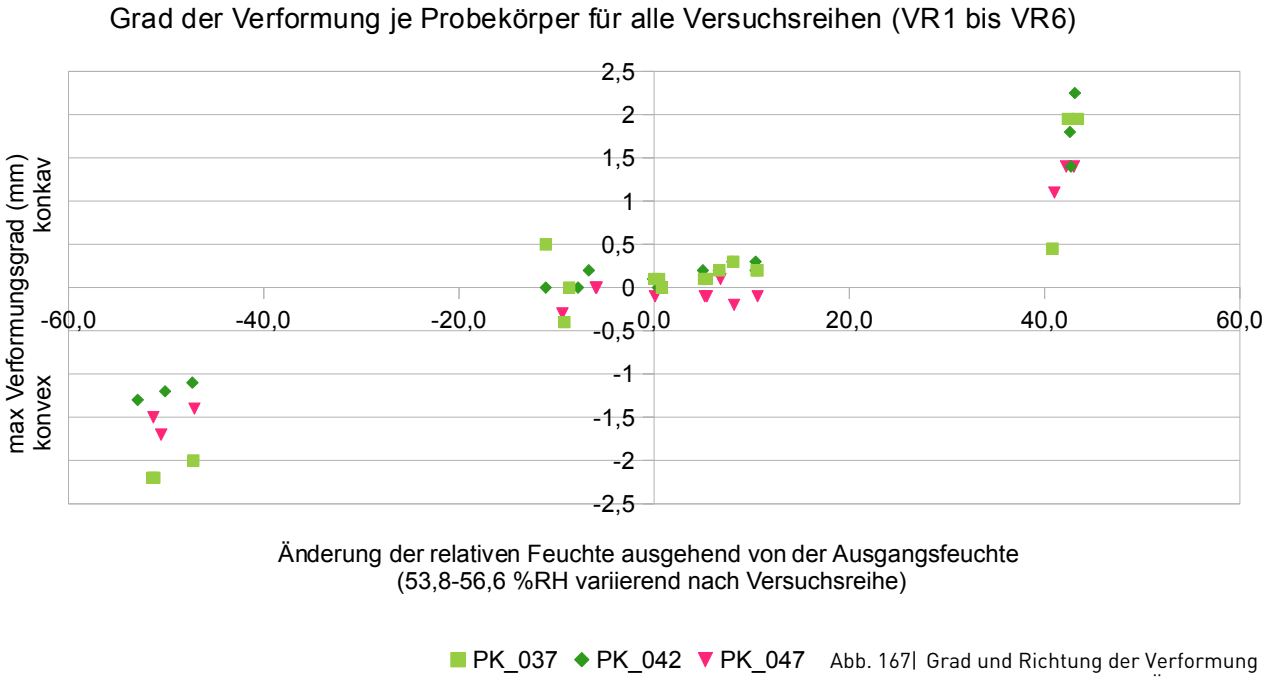


Abb. 167| Grad und Richtung der Verformung je Probekörper entsprechend der Änderung der relativen Feuchte für VR1-VR6. Quelle: Selbst

Weiterhin sind beim Vergleich der Probekörper untereinander Unterschiede im tendenziellen Verhalten bei Klimaschwankungen in Korrelation zur Dimensionsänderung offenkundig. 'PK_047' reagiert hinsichtlich einer Schrumpfung über die Versuchsreihen hinaus am eindeutigsten auf extreme Trocknung – gleichermaßen weniger ausgeprägt mit einer Dimensionszunahme bei einer extremen Befeuchtung. Entgegengesetzt reagiert 'PK_042' weniger sensibel auf Trocknung, wohingegen sein tendenzielles Reaktionsvermögen ein-

deutiger bei Befeuchtung ausfällt. 'PK_037' verhält sich tendenziell verhältnismäßig ausgewogen. Selbiges Verhalten spiegelt sich in Richtung sowie Grad der Verformung wider (►Abb. 167|).

21.4 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR1-VR6)

Die Experimente an den Holzprobekörpern geben hinsichtlich ihrer bildgebenden Ergebnisse erste Hinweise auf eine Verfahrenseignung zum Nachweis von Veränderungen. So können über die 3D-Bildgebung Ergebnisse vorgewiesen werden, die sowohl qualitative als auch quantitative Rückschlüsse ermöglichen. Zusammenfassend sind hier wesentliche Erkenntnisse zum hygroskopischen Verhalten der untersuchten Holzprobekörper bei Klimaschwankungen gewonnen worden. Dieses umfasst sowohl Veränderungen im extremen, als auch im moderaten und geringfügigen Bereich. Mit dem eingesetzten 'COMET-System' sind in der hochauflösenden Sensorkonfiguration Dimensionsänderungen als Belastungsfolge nachzuweisen. Konkret: Quellung[553] und Schrumpfung[554], sowie konkave[555] und konvexe[556] Oberflächenverformungen. Neben diesen, sich global äußernden Veränderungen, kann über ein Experiment erstmals auch ein bildgebender Beleg über eine lokal begrenzte Veränderung in Form einer aufstehenden Malschichtscholle[557] erbracht werden. Neben der grundsätzlichen 3D-Bildgebung und der Lokalisierung der Veränderung stellt ihre Quantifizierung in den Sub-Millimeterbereich ein Novum dar, sodass die Untersuchungsmethode bereits hierorts positiv bewertet wird.

Auch über die vorgenommene statistische Auswertung ist das hygroskopische Verhalten der untersuchten Holzprobekörper nachweisbar – maßgeblich sich äußernd in Dimensionsänderungen und Verformungen. Wie belegt, liegt die Dimensionsänderung bei globaler Betrachtung über alle Probekörper, entlang der X-Achse bei max 3% und entlang der Y-Achse bei max 0,3%. Dabei besteht eine grundsätzliche Korrelation von Dimensionsänderung und dem Ausmaß der Änderung der relativen Feuchte . In der Regel führt eine Befeuchtung zu einer Quellung bzw. einer konkaven Verformung. Umgekehrtes Verhalten besteht bei Trocknung, was zu einer Schrumpfung bzw. zu einer konvexen Verformung führt. Die Probekörper reagieren in Relation gravierender auf eine extreme Befeuchtung als auf eine extreme Trocknung, obgleich die Spannweite zur Ausgangsfeuchte bei Trocknung am größten ist. Auffällig ist zudem, dass das Verhalten der einzelnen Probekörper, nach qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten beurteilt, nicht vergleichbar ist. So bestehen ausgeprägte Unterschiede hinsichtlich der Dimensionsänderung und der

553 Vergleiche: V_015

554 Vergleiche: V_014

555 Vergleiche: V_015

556 Vergleiche: V_014

557 Vergleiche: V_052

Verformung bei Befeuchtung und bei Trocknung. Die Einzelbetrachtung der Probekörper zeigt jedoch, dass sie, entsprechend ihres Verhaltensmusters, schlüssig auf die klimatische Änderung reagieren. Darüber hinaus zeigt sich, dass bei den Extremfeuchten (VR1-VR3) ausgeprägtere Unsicherheiten bezüglich der Reproduzierbarkeit bestehen als bei den Experimenten mit den geringeren Feuchteschwankungen (VR4-VR6). Grundsätzlich sind die Folgen geringer Klimaschwankungen messtechnisch nachzuweisen und zudem reproduzierbar. Auffällig ist hierbei ein hygroskopisch anormales Verhalten eines Probekörpers, der bei einer moderaten Befeuchtung, im mittleren Feuchtebereich, eine Schrumpfung nach sich zieht. Dieses Verhaltensmuster ist über die drei Versuchsreihen durchgängig und bleibt auch in einer abschließenden Betrachtung unerklärt. Außerdem konnte aufgezeigt werden, dass extreme klimatische Belastungen zu irreversiblen Veränderungen führen, die sich in dauerhaften Verformungen und Dimensionsänderungen äußern.

Eine zentrale Fragestellungen zum hygroskopischen Verhalten bei geringeren Feuchteschwankungen galt der Bestimmung einer Geringfügigkeitsgrenze. Dieses meint einen zuverlässigen und reproduzierbaren messtechnischen Nachweis von Objektveränderungen in Abhängigkeit zur kleinsten Klimaschwankung. Zur Ermittlung derselben sind die Probekörper wiederholt nach Durchführung der Befeuchtungszyklen (ca. 5 %RH bzw. 10 %RH) in den Ausgangszustand (Magnesiumnitrat-Hexahydrat) konditioniert worden. Bei Versuchsdurchführung bestand die Annahme, dass die Konditionierungen einen reversiblen Ausgangszustand zur Folge haben – im Vergleich zur Erstmessung wurden daher keine Dimensionsänderung bei Magnesiumnitrat-Hexahydrat erwartet. Obgleich zwischen diesen Konditionierungen gemäß der Datenlogger nur geringfügigste Änderungen der relativen Feuchte von <1% belegt sind, können durch das Messverfahren eindeutige Objektveränderungen nachgewiesen werden. Eine Rückkonditionierung in den Ausgangszustand hatte reproduzierbare Dimensionsänderungen zur Folge. Aufgrund dessen kann die Geringfügigkeitsgrenze hierorts nicht zweifelsfrei angegeben werden. Bewertend lassen sich methodische Defizite der Laborexperimente anführen. Allen voran ist eine unzureichende Datenlage anzuführen. So müssten für eine Bestimmung etwaiger Fehlergrößen und -quellen, die die Geringfügigkeitsgrenze unmittelbar tangieren, umfangreichere und höher frequentierte Messdaten vorliegen. Ideal wäre ein über Mehrfachmessungen dokumentiertes Objektverhalten bei Konditionierungen im Bereich von 50-60 %RH, in sehr viel engeren Schritten von 1,0 %RH. Fernerhin ist auch der Akklimatisations-Zeitraum zwischen den einzelnen Konditionierungsstufen kritisch zu überprüfen da die Probekörper eventuell doch länger brauchen, um sich vollständig der veränderten Feuchtesituation anzupassen. Um ein etwaiges, vom Durchschnitt abweichendes, individuelles Verhalten einzelner Probekörper aufdecken zu können, sollte dann bei einer entsprechend angelegten Versuchsreihe auch eine größere Anzahl an Probekörpern verwendet werden.

Weiterhin können bei der Bestimmung der Geringfügigkeitsgrenze einschränkende Faktoren auch aus der Messtechnik selbst resultieren. Hinsichtlich der Messgenauigkeit konnte 'COMET 5 11M 80' durch andere Verfahren auf Abweichungen bzw. Messunsicherheiten von ca. 0,021 mm eingegrenzt werden (►Tab. 100|). Seitens der das Klima protokollierenden Datenlogger können ebenso Abweichungen von 0,64 %RH belegt werden. Bei der Bewertung der tatsächlichen Klimaschwankungen zwischen den Konditionierungen durch Magnesiumnitrat-Hexahydrat ist dieser Faktor mit zu berücksichtigen (►Kapitel 20.1.1|). In Addition können sich weitere methodische Unsicherheitsfaktoren aus der 'Best-Fit-Ausrichtung' oder der Datenauswertung durch Positionierungsdifferenzen der virtuellen Messschieber ergeben. Im letztgenanntem Kontext wird ebenso auf die poröse Beschaffenheit an den Stirnseiten der Probekörper hingewiesen, die auf die Markstahlen zurückzuführen sind. Aufgrund einer möglichen Kumulation der aufgeführten Fehlergrößen und -quellen lässt sich abschließend nicht bewerten, in welchem Maß die oben aufgeführten messtechnisch nachgewiesenen Dimensionsänderungen, jeweils zurückzuführen auf die Magnesiumnitrat-Hexahydrat-Konditionierungen, tatsächlich vorhanden waren und/oder ob hierfür andere Faktoren ursächlich sind. Relevant ist im genannten Zusammenhang jedoch, dass es bei den besagten Experimenten in irgendeiner Form Objektbelastungen gegeben haben muss, da neben den Dimensionsänderungen teilweise auch geringfügige Verformungen nachgewiesen werden konnten.

22. Experimente zur klimatischen Belastung: Probekörper Textil (VR7-VR12)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente an den Textilprobekörpern in Auszügen vorgestellt.

22.1 Ergebnisse der Konditionierung

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Klimatisierung der Textilprobekörper zusammengefasst (►Tab. 49| - Tab. 50|).

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_07

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_261	PK_049	Silikagel E	25,8	1,3	Ist (V_058)
M_262	PK_049	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,6	45,7	Ist (V_057)
M_263	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,5	53,9	Soll (V_057/_058/_059)
M_264	PK_049	Kaliumsulfat	26,3	97,1	Ist (V_059)
M_265	PK_051	Silikagel E	25,8	1,3	Ist (V_061)
M_267	PK_051	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,6	45,7	Ist (V_060)
M_268	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,5	53,9	Soll (V_060/_061/_062)
M_269	PK_051	Kaliumsulfat	26,3	97,1	Ist (V_062)
M_270	PK_053	Silikagel E	25,8	1,3	Ist (V_064)
M_271	PK_053	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,6	45,7	Ist (V_063)
M_272	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,5	53,9	Soll (V_063/_064/_065)
M_273	PK_053	Kaliumsulfat	26,3	97,1	Ist (V_065)

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_08

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_274	PK_049	Silikagel E	26,0	1,3	Ist (V_067)
M_275	PK_049	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,1	46,2	Ist (V_066)
M_276	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,9	53,5	Soll (V_066/_067/_068)
M_277	PK_049	Kaliumsulfat	25,5	97,3	Ist (V_068)
M_278	PK_051	Silikagel E	26,0	1,3	Ist (V_070)
M_279	PK_051	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,1	46,2	Ist (V_069)
M_280	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,9	53,5	Soll (V_069/_070/_071)
M_281	PK_051	Kaliumsulfat	25,5	97,3	Ist (V_071)
M_282	PK_053	Silikagel E	26,0	1,3	Ist (V_073)
M_283	PK_053	Kaliumcarbonat-Dihydrat	26,1	46,2	Ist (V_072)
M_284	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,9	53,5	Soll (V_072/_073/_074)
M_285	PK_053	Kaliumsulfat	25,5	97,3	Ist (V_074)

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_09

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_286	PK_049	Silikagel E	26,1	2,8	Ist (V_076)
M_287	PK_049	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,9	46,5	Ist (V_075)
M_288	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_075/_076/_077)
M_289	PK_049	Kaliumsulfat	25,4	96,7	Ist (V_077)
M_290	PK_051	Silikagel E	26,1	2,8	Ist (V_079)
M_291	PK_051	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,9	46,5	Ist (V_078)
M_292	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_078/_079/_080)
M_293	PK_051	Kaliumsulfat	25,4	96,7	Ist (V_080)
M_294	PK_053	Silikagel E	26,1	2,8	Ist (V_082)
M_295	PK_053	Kaliumcarbonat-Dihydrat	24,9	46,5	Ist (V_081)
M_296	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_081/_082/_083)
M_297	PK_053	Kaliumsulfat	25,4	96,7	Ist (V_083)

Tab. 49| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihen VR7-VR9 (Probekörper Textil), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung.
Quelle: Selbst

Übersicht_Versuchsnummer_Versuch_Messnummer_Konditionierung

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_10

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_288	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_090/_091/_092)
M_298	PK_049	Natriumbromid	25,7	59,8	Ist (V_090)
M_299	PK_049	Ammoniumnitrat	27,0	60,7	Ist (V_091)
M_300	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,8	54,8	Ist (V_092)
M_292	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_093/_094/_095)
M_301	PK_051	Natriumbromid	25,7	59,8	Ist (V_093)
M_302	PK_051	Ammoniumnitrat	27,0	60,7	Ist (V_094)
M_303	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,8	54,8	Ist (V_095)
M_296	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_096/_097/_098)
M_304	PK_053	Natriumbromid	25,7	59,8	Ist (V_096)
M_305	PK_053	Ammoniumnitrat	27,0	60,7	Ist (V_097)
M_306	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,8	54,8	Ist (V_098)

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_11

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_288	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_099/_100/_101)
M_307	PK_049	Natriumbromid	26,9	57,6	Ist (V_099)
M_308	PK_049	Ammoniumnitrat	25,1	64,0	Ist (V_100)
M_309	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,7	53,9	Ist (V_101)
M_292	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_102/_103/_104)
M_310	PK_051	Natriumbromid	26,9	57,6	Ist (V_102)
M_311	PK_051	Ammoniumnitrat	25,1	64,0	Ist (V_103)
M_312	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,7	53,9	Ist (V_104)
M_296	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_105/_106/_107)
M_313	PK_053	Natriumbromid	26,9	57,6	Ist (V_105)
M_314	PK_053	Ammoniumnitrat	25,1	64,0	Ist (V_106)
M_315	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	25,7	53,9	Ist (V_107)

Probekörper Textil (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_12

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_288	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_108/_109/_110)
M_316	PK_049	Natriumbromid	25,0	59,9	Ist (V_108)
M_317	PK_049	Ammoniumnitrat	25,5	61,3	Ist (V_109)
M_318	PK_049	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,8	55,2	Ist (V_110)
M_292	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_111/_112/_113)
M_319	PK_051	Natriumbromid	25,0	59,9	Ist (V_111)
M_320	PK_051	Ammoniumnitrat	25,5	61,3	Ist (V_112)
M_321	PK_051	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,8	55,2	Ist (V_113)
M_296	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	26,2	52,1	Soll (V_114/_115/_116)
M_322	PK_053	Natriumbromid	25,0	59,9	Ist (V_114)
M_323	PK_053	Ammoniumnitrat	25,5	61,3	Ist (V_115)
M_324	PK_053	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,8	55,2	Ist (V_116)

Tab. 50| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihen VR10-VR12 (Probekörper Textil), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung.
Quelle: Selbst

22.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen

Die bildgebenden Ergebnisse der Experimente zur klimatische Belastung der Probekörper auf textilem Bildträger sind analog zur bisherigen Vorgehensweise über das Ordnungskriterium des Veränderungsmerkmales gegliedert. Im Rahmen einer Auswahl werden diese folgend dargelegt.

Rissbildung / Keilrahmensprung

Im Anschluss an die klimatische Belastung von 'PK_049' im Versuch V_067, kann über visualisierte Soll-Ist-Diskrepanzen ein feiner Riss im Bildschichtengefüge nachgewiesen werden (►Abb. 168|).[558] Der Falschfarbendarstellung zufolge verläuft dieser parallel zur Kante des rückseitigen Rahmenschenkels.[559] Zugleich gewährt sie anhand der Farbkodierung den Rückschluss einer partiellen Aufwerfung des Bildschichtengefüges zu den Risskanten hin – 0,070 mm in positive Normalenrichtung. Fernerhin gelingt eine Quantifizierung des Risses über virtuelle Messschieber (►Abb. 169|). Seine Länge beträgt 17,667 mm. Die Rissbreite wird über siebzehn Messschieber bestimmt und im Mittel mit 0,106 mm angegeben. Die Ursache für die Beschädigung ist nicht zweifelsfrei zu benennen. Möglich ist eine maltechnischer Fehler, der auf die Herstellungsweise des Probekörpers zurückzuführen ist (Druck beim Aufbringen der Grundierung). Denn bereits vor den Experimenten kennzeichnete sich der Probekörper an der besagten Stelle durch eine Anomalie (►Abb. 170|). Nach einer optischen Untersuchung wurde diese jedoch nicht als Schaden bewertet. Auffällig war lediglich ein leicht verdickter Bereich des Bildschichtengefüges.

Zur kausalen Bestimmung der Veränderung werden sämtliche Experimente an 'PK_049' in ihrer zeitlichen Folge ausgewertet. In der ersten Belastung im Versuch V_057 erfolgte die moderate Trocknung (Δ8,2 %RH), ausgehend vom mittleren Feuchtebereich. Anhand der Falschfarbendarstellung ist daraufhin zunächst keine Veränderung nachweislich (►Abb. 171|).[560] Im darauf folgenden Experiment V_058, verbunden mit einer signifikanten Trocknung (Δ52,6 %RH), zeigt sich an 'PK_049' hingegen eine erste Veränderung.[561] Die Falschfarbendarstellung offenbart eine partielle Aufwerfung im Rissbereich mit bis zu 0,050 mm (►Abb. 172|). Werden hierzu die oben aufgeführten Ergebnisse von V_067 mit in Beziehung gesetzt, so wird deutlich, dass die Größe der Merkmalsausprägung mit der Belastung

558 Vergleiche: V_067, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_276 bei 53,5 %RH / Ist-Daten: M_274 bei 1,3 %RH, Konditionierung: Δ52,2 %RH), Protokollseite 1 ff.

559 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um einen Riss, was gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entspricht. Da der Riss jedoch parallel zur rückseitigen Kante des Rahmenschenkels verläuft findet das beschriebene Merkmal ebenso seine Übereinstimmung im Schadensbild: Keilrahmensprung (Kategorie 24).

560 Vergleiche: V_057, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_263 bei 53,9 %RH / Ist-Daten: M_262 bei 45,7 %RH, Konditionierung: Δ8,2 %RH), Protokollseite 1

561 Vergleiche: V_058, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_263 bei 53,9 %RH / Ist-Daten: M_261 bei 1,3 %RH, Konditionierung: Δ8,2 %RH), Protokollseite 1

korreliert.[562] Ebenso kann in einem späteren Experiment V_077 durch eine ausgeprägte Befeuchtung (Δ44,6 %RH) an 'PK_049' ein gegenteiliges Materialverhalten belegt werden.[563] Der Falschfarbendarstellung zufolge legt sich der Malschichtbereich entlang des Risses um 0,080 mm nieder (►Abb. 173|).

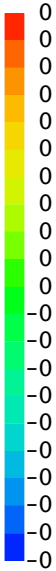
Die dargelegten Ergebnisse erlauben zwei Rückschlüsse. Erstens: der Bereich des Bildschichtengefüges, der dem Kantenverlauf des rückseitigen Rahmenschenkels entspricht, ist einem erhöhten Gefährdungspotenzial unterworfen – was seinen Ausdruck im Schadensbild des sogenannten Keilrahmensprungs findet. Zweitens: Areale mit Imperfektionen reagieren besonders klimasensitiv. Denkbar sind auch Spannungen im Grenzbereich unterschiedlich dick ausgeprägter Schichtstärken. Darüber hinaus zeigt sich bei der Vermessung der Struktur über virtuelle Messschieber abermals, dass die Bestimmung der Rissränder aufgrund bestehender Unschärfen der Kanten bei den 3D-Modellen schwer zu ermitteln sind. Mitunter sind hier die untriangulierten Daten eindeutiger. Auch das Weißlicht-Kamerabild des Sensors wurde ausgewertet. Obgleich die Darstellung hier rein zweidimensional ist, kann die Rissstruktur anhand des Kontrastunterschiedes vergleichsweise leicht und eindeutig identifiziert werden (►Abb. 174|). Wie bereits erwähnt beweist sich hier der Vorteil einer fotografischen Abbildung.

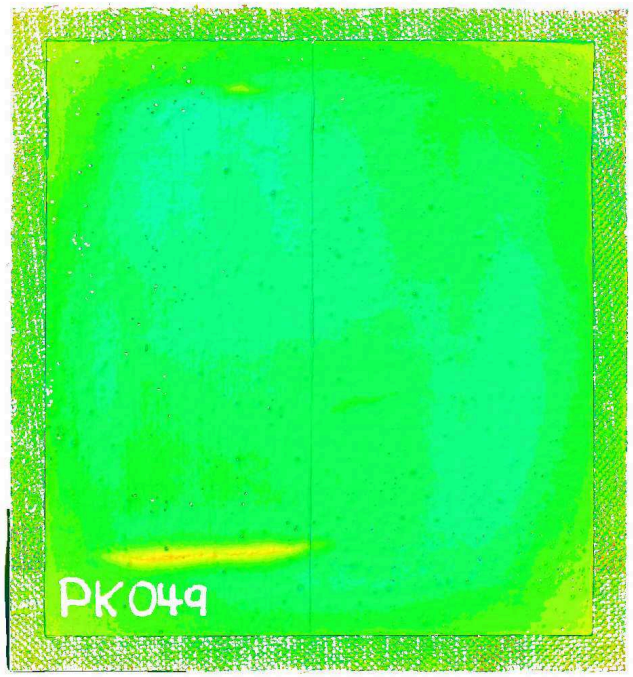
562 V_067, Δ52,2 %RH → Aufwerfung 0,070 mm; V_058, Δ8,2 %RH → Aufwerfung 0,050 mm) .

563 Vergleiche: V_077, 'PK_049' (Soll-Daten: M_288 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_289 bei 96,7 %RH, Konditionierung: Δ44,6 %RH), Protokollseite 1 ff.

Versuch: V_067
PK_049 (Gouache) bei 53,5 %RH (M_276)/ 1,3 %RH (M_274)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 52,2 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Silikagel E







Standard-Abweichung: 0.0565707
Mittlere Abweichung: -0.0013270
Kleinste Abweichung: -4.0043393
Größte Abweichung: 3.9362329

==========
Bewegte Objekte:
==========

V8_PK049-051-053_140730_RFSILIKAGEL



PK_049 bei 53,5 %RH (Soll-Daten)

PK_049 bei 1,3 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	PK_049 (Gouache)	
Benennung:	Hygroskopizität: 53,5 %RH - 1,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 30.07.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

Abb. 168| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_067 ('PK_049') zur Bildgebung von Soll-Ist-Diskrepanzen in Umgebung eines Risses – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

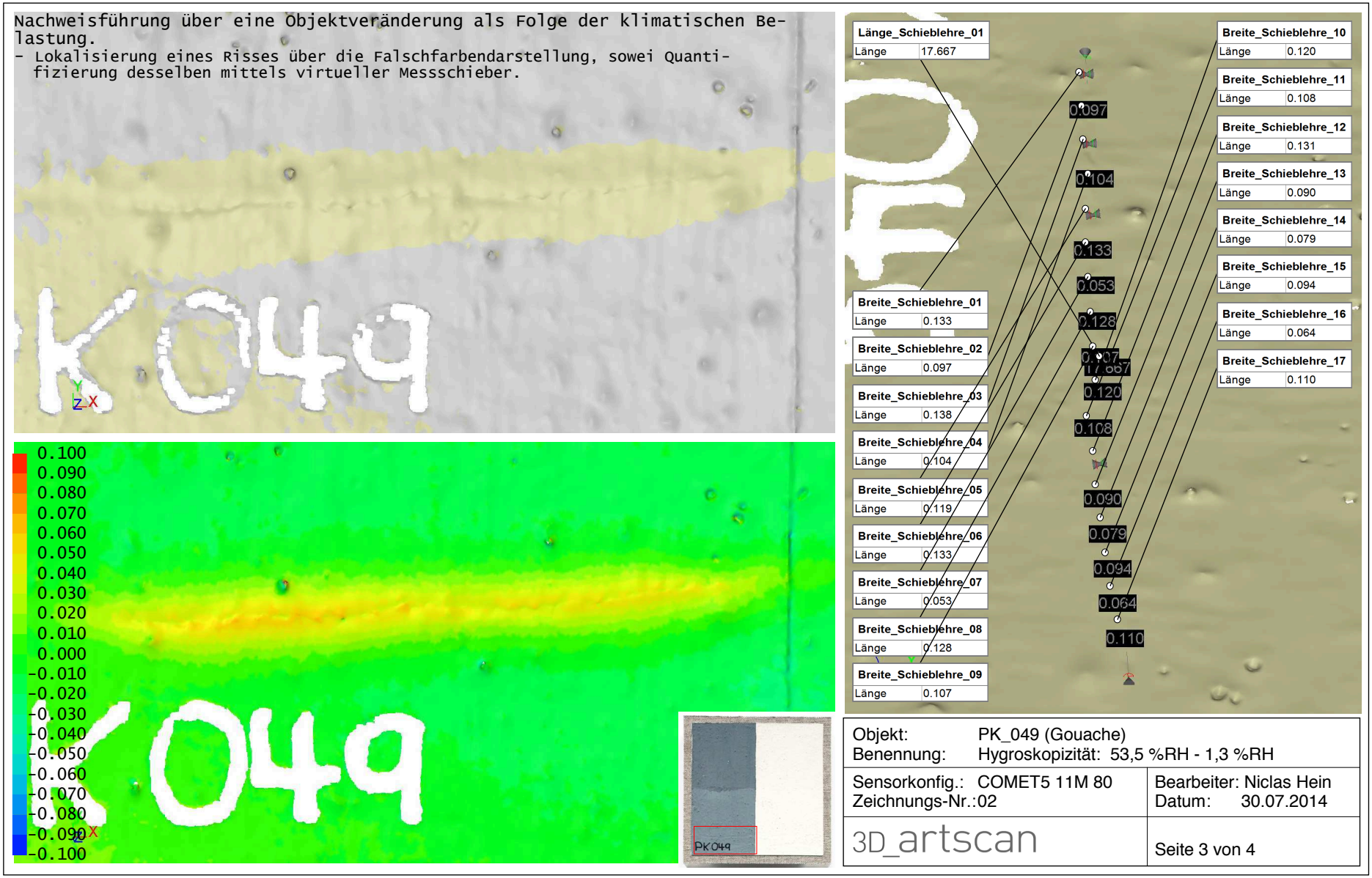
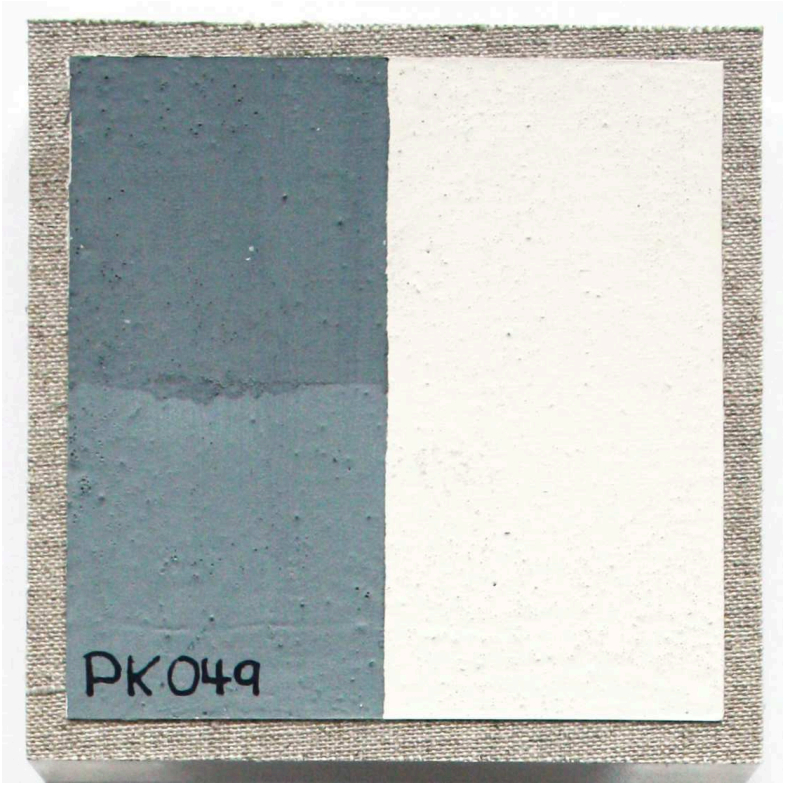
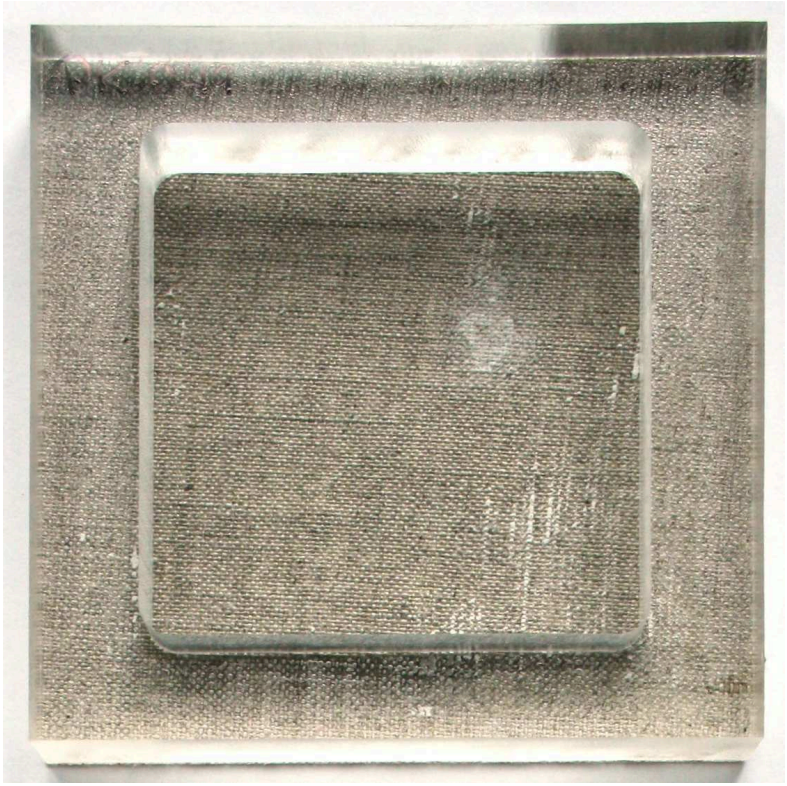


Abb. 169| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_067 ('PK_049') zur Bildgebung und Quantifizierung des Risses – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und die 'Viewer-Ansicht' mit eingeblendeten virtuellen Messschiebern und zugehörigen Flyern.
Quelle: Selbst

Versuch: V_057
PK_049 (Gouache) bei 53,9 %RH (M_263)/ 45,7 %RH (M_262)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 8,2 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Kaliumcarbonat-Dihydrat





Objekt:	PK_049 (Gouache)	
Benennung:	Hygroskopizität: 53,9 %RH - 45,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 25.07.2014
3D_artscan		Seite 1 von 3

Abb. 170| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_057 ('PK_049') zur Darlegung der vorhandenen Imperfektion direkt über der Kennung des Probekörpers – veranschaulicht über ein Farbfoto des Untersuchungsgegenstandes vor Beginn der Experimente.
Quelle: Selbst

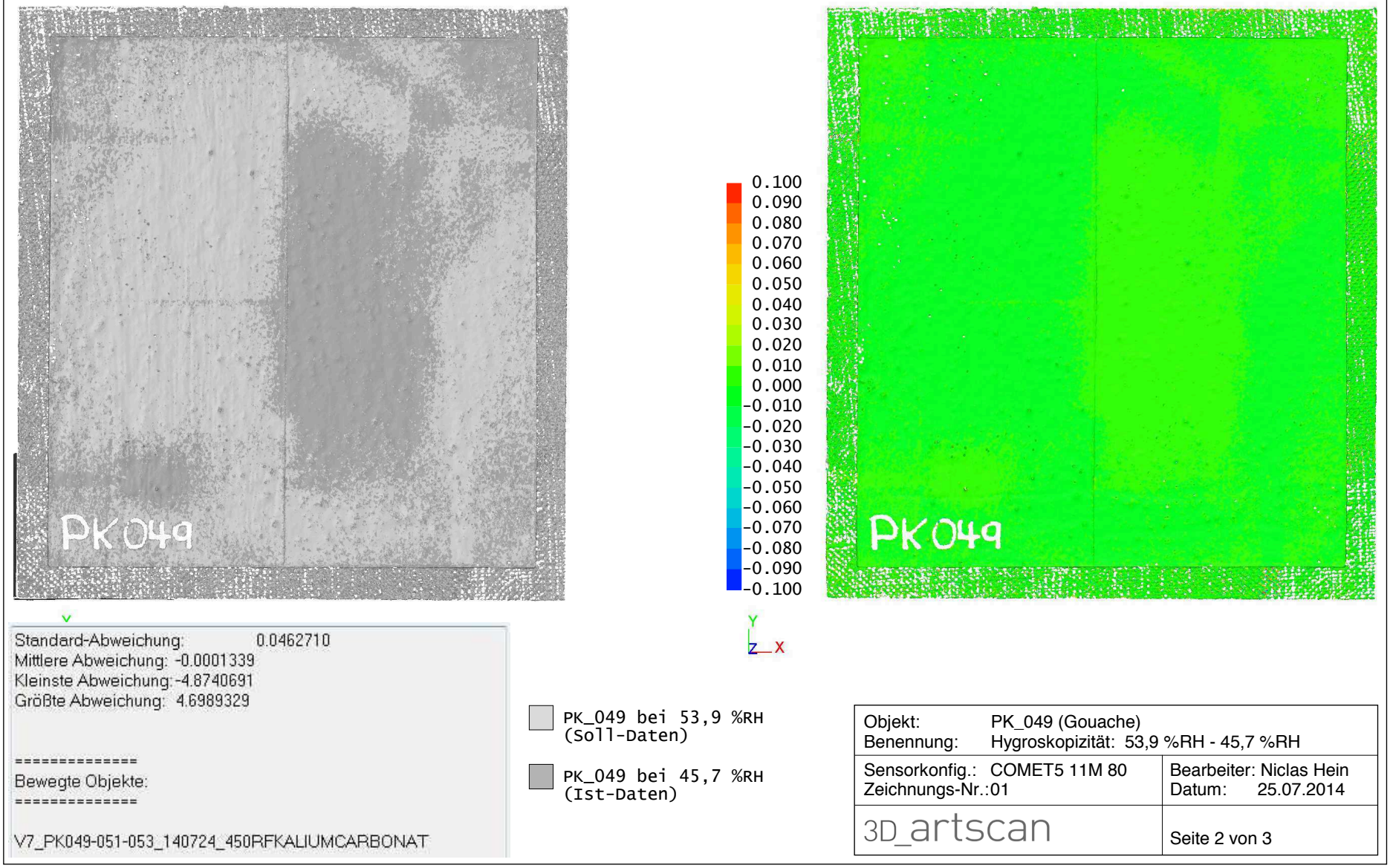
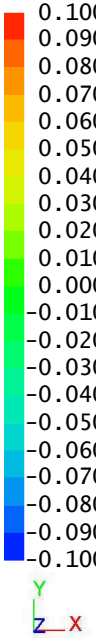
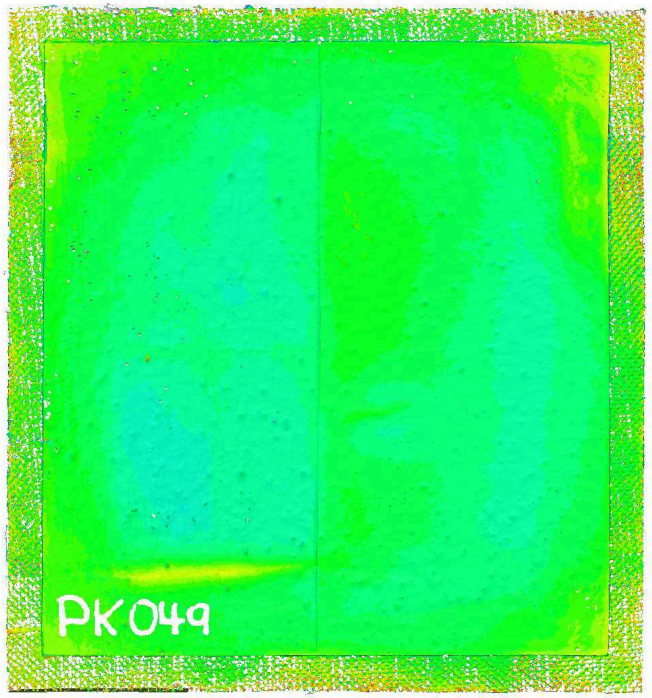


Abb. 171| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_057 ('PK_049') zur Bildgebung des intakt erscheinenden Probekörpers – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_058
PK_049 (Gouache) bei 53,9 %RH (M_263)/ 1,3 %RH (M_261)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 52,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Silikagel E







Standard-Abweichung: 0.0715009
Mittlere Abweichung: -0.0006966
Kleinste Abweichung: -4.7419678
Größte Abweichung: 4.7063407

==========
Bewegte Objekte:
==========

V7_PK049-051-053_140726_1RFSILIKAGEL

PK_049 bei 53,9 %RH (Soll-Daten)

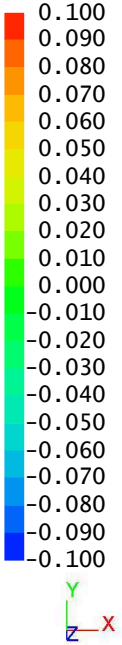
PK_049 bei 1,3 %RH (Ist-Daten)

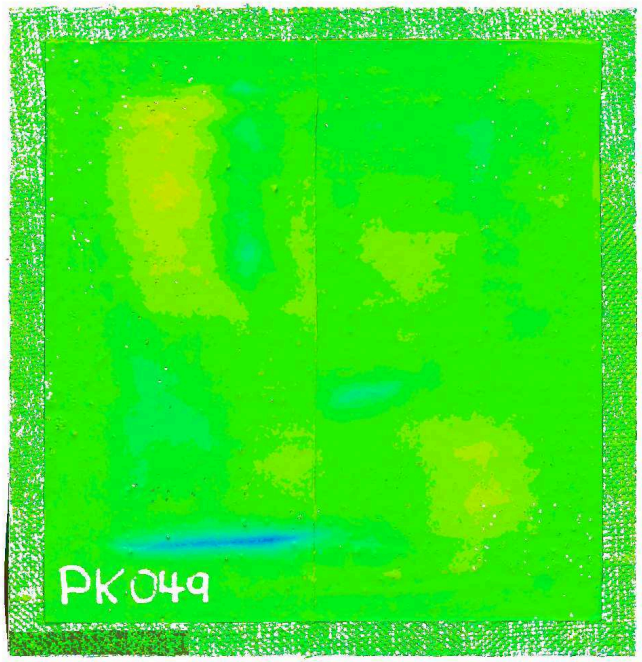
Objekt:	PK_049 (Gouache)	
Benennung:	Hygroskopizität: 53,9 %RH - 1,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 27.07.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 172| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_058 ('PK_049') zur Bildgebung und Quantifizierung des Risses – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_077
PK_049 (Gouache) bei 52,1 %RH (M_288)/ 96,7 %RH (M_289)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 44,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Kaliumsulfat







Standard-Abweichung: 0.0452206
Mittlere Abweichung: 0.0005613
Kleinste Abweichung: -4.5346154
Größte Abweichung: 4.3176075

==========
Bewegte Objekte:
==========

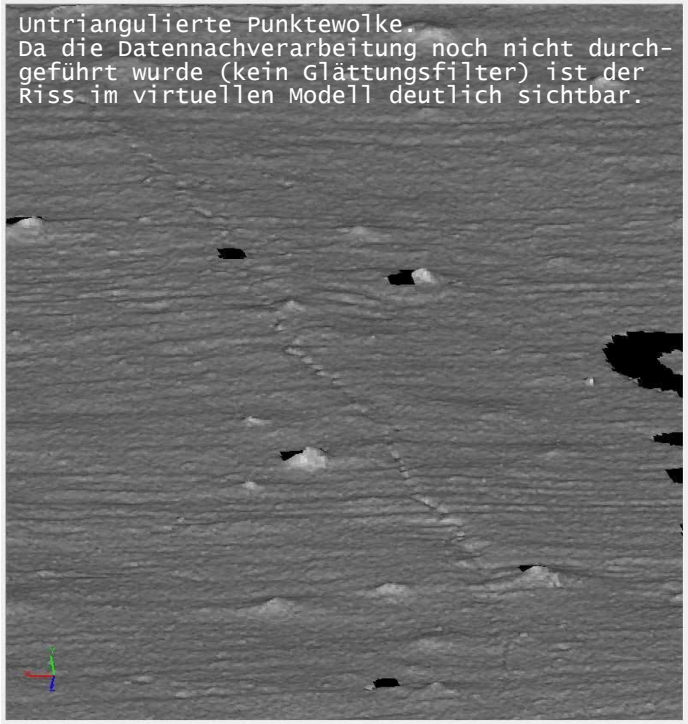
V9_PK049-051-053_140801_971RFKALIUMSULFAT

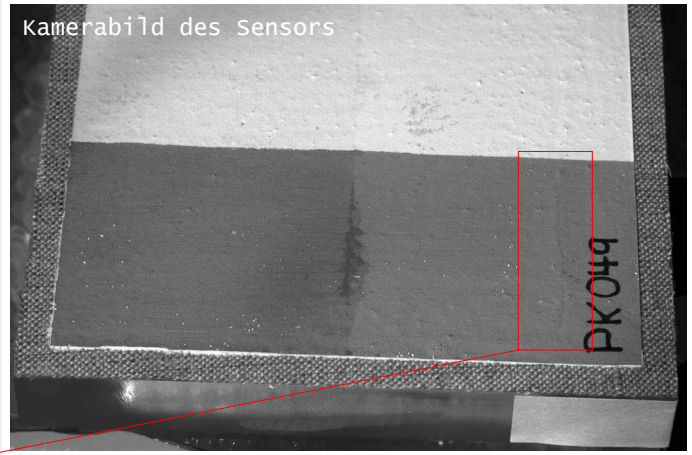
PK_049 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)
PK_049 bei 96,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	PK_049 (Gouache)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 96,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 01.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 173| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_077 ('PK_049') zur Bildgebung und Quantifizierung des Risses – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst







Feat.	Maß	Ist
Länge_Schieblehre_01	Länge	17.667

Feat.	Maß	Ist
Breite_Schieblehre_01	Länge	0.133
Breite_Schieblehre_02	Länge	0.097
Breite_Schieblehre_03	Länge	0.138
Breite_Schieblehre_04	Länge	0.104
Breite_Schieblehre_05	Länge	0.119
Breite_Schieblehre_06	Länge	0.133
Breite_Schieblehre_07	Länge	0.053
Breite_Schieblehre_08	Länge	0.128
Breite_Schieblehre_09	Länge	0.107
Breite_Schieblehre_10	Länge	0.120
Breite_Schieblehre_11	Länge	0.108
Breite_Schieblehre_12	Länge	0.131
Breite_Schieblehre_13	Länge	0.090
Breite_Schieblehre_14	Länge	0.079
Breite_Schieblehre_15	Länge	0.094
Breite_Schieblehre_16	Länge	0.064
Breite_Schieblehre_17	Länge	0.110

Mittelwert: 0,106
(Kratzerbreite in mm)

Objekt: PK_049 (Gouache) Benennung: Hygroskopizität: 53,5 %RH - 1,3 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:02	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 30.07.2014
3D_artscan	Seite 4 von 4

Abb. 174| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_067 ('PK_049') mit dem Riss im Bildschichtengefüge – veranschaulicht über das Weißlicht-Kamerabild und die Punktewolke in der 'Viewer-Ansicht'.
Quelle: Selbst

Oberflächenverformung in Form einer Beule

Weiter kann bei 'PK_053' im Experiment V_096 beim Soll-Ist-Vergleich eine Beule identifiziert, lokalisiert und quantifiziert werden.[564,565] Die Falschfarbendarstellung erlaubt den Rückschluss auf eine lokal begrenzte Verformung in positive Normalenrichtung mit 0,175 mm (►Abb. 175|). Die Ursache der Beulenbildung wird dem moderaten Anstieg der relativen Feuchte (Δ7,8 %RH), ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, zugeschrieben.

Werden in die Betrachtung die Ergebnisse des folgenden Experimentes mit einbezogen, also bei 'PK_053' im Versuch V_097, so nimmt die Merkmalsausprägung unter quantitativen Gesichtspunkten auf ein Maximum von 0,200 mm zu, wobei eine erneute moderate Befeuchtung vorliegt (Δ8,6 %RH, ►Abb. 176|).[566] Beim Vergleich der Beulenbildung von V_096 und V_097 kann ein absoluter Anstieg der relativen Feuchte um 0,9 %RH berechnet werden. Ebenso erlaubt der Abgleich der Falschfarbendarstellungen der beiden Experimente, dass damit eine Vergrößerung der Beule um 0,025 mm einhergeht. Einen weiteren, eindeutigen Beleg über die Korrelation von relativer Feuchte und Beulengröße ist über ein früheres Experiment vorzuweisen – V_083.[567] Hier lag, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, eine extreme Befeuchtung bis kurz unter den Taupunkt vor (Δ 44,6 %RH). Dieses äußerte sich in einer signifikanten Beule, die mit bis zu 0,400 mm von den Soll-Daten abwich (►Abb. 177|).

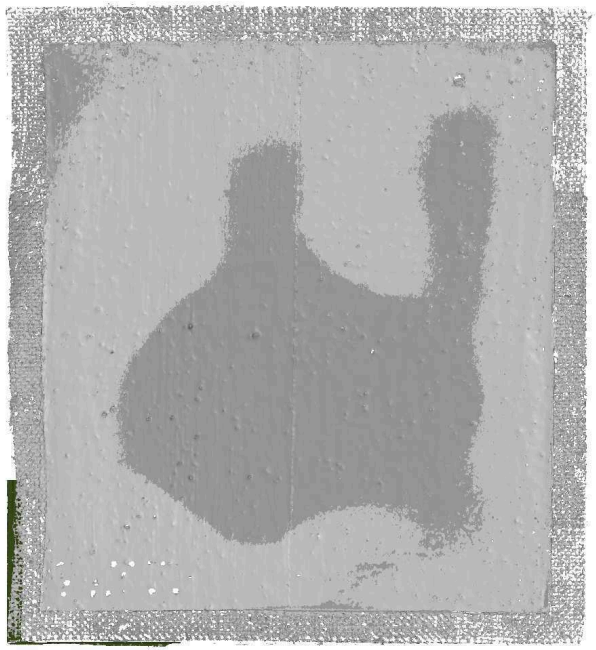
564 Vergleiche: V_096, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_304 bei 59,9 %RH, Konditionierung: Δ7,8 %RH), Protokollseite 1

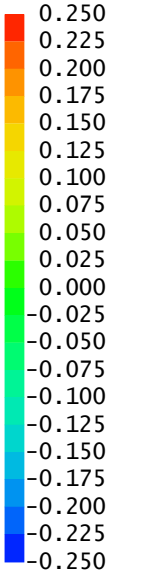
565 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges besteht eine eindeutige Übereinstimmung mit dem Schadensbild: Beule (Kategorie 04).

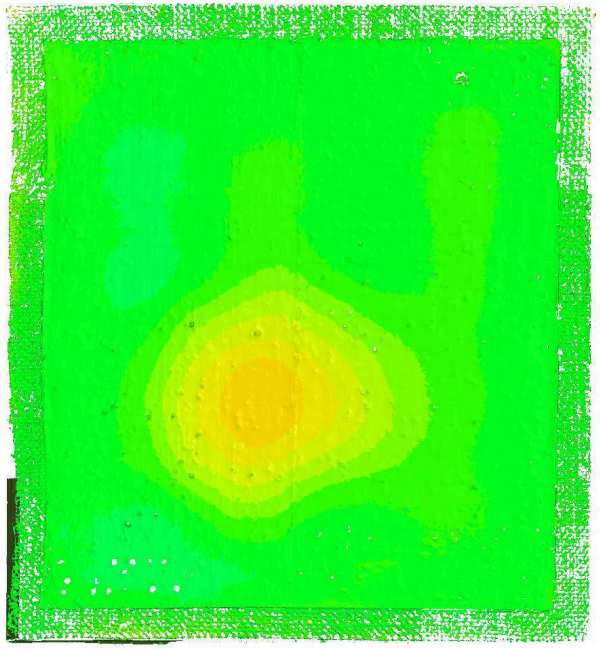
566 Vergleiche: V_097, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_305 bei 60,7 %RH, Konditionierung: Δ8,6 %RH), Protokollseite 1 f.

567 Vergleiche: V_083, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_292 bei 96,7 %RH, Konditionierung: Δ44,6 %RH), Protokollseite 1 f

Versuch: V_096
PK_053 (Öl) bei 52,1 %RH (M_296)/ 59,8 %RH (M_304)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 7,7 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid







Standard-Abweichung: 0.0935521
Mittlere Abweichung: 0.0191348
Kleinste Abweichung: -4.3000550
Größte Abweichung: 3.9434000

==========
Bewegte Objekte:
==========

V6_ PK037-042-047_140722_60ORHNATRIUMBROMID



PK_053 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)

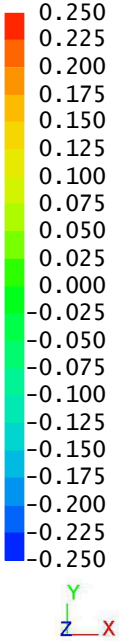
PK_053 bei 59,8 %RH (Ist-Daten)

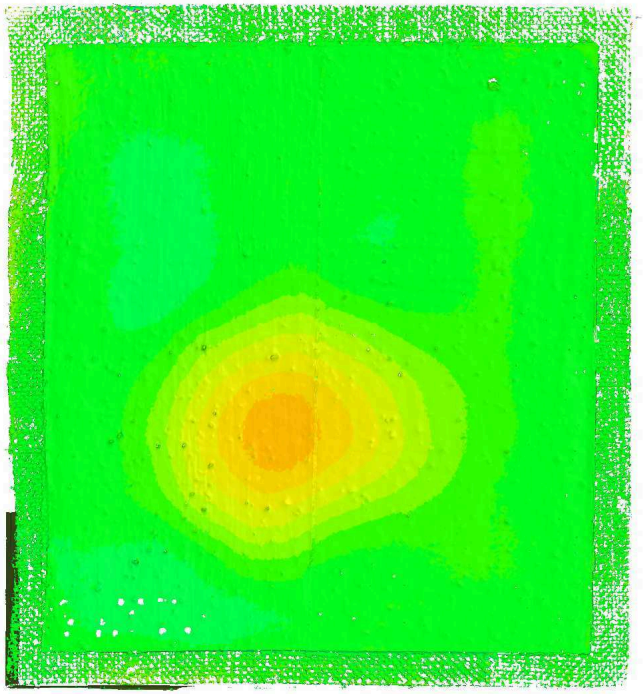
Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 59,8 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01		Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 02.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 175| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_096 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Beule – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_097
PK_053 (Öl) bei 52,1 %RH (M_296)/ 60,7 %RH (M_305)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 8,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Ammoniumnitrat







Standard-Abweichung: 0.0538498
Mittlere Abweichung: -0.0004558
Kleinste Abweichung: -4.4523183
Größte Abweichung: 4.1899879

==========
Bewegte Objekte:
==========

V10_PK049-051-053_140802_615AMMONIUMNITRAT

PK_053 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)

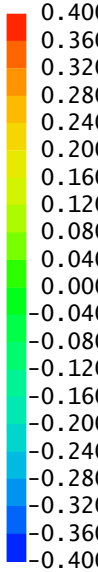
PK_053 bei 60,7 %RH (Ist-Daten)

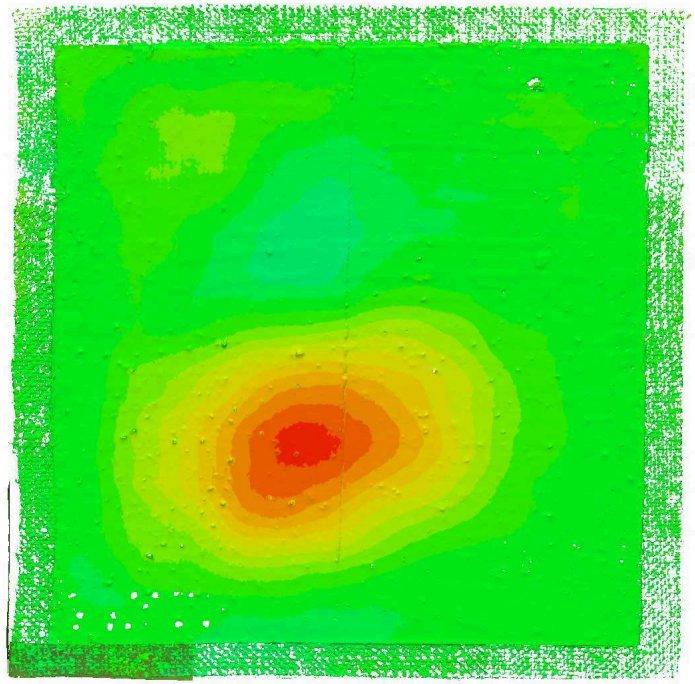
Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 60,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 02.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 176| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_097 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Beule – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_083
PK_053 (Öl) bei 52,1 %RH (M_296)/ 96,7 %RH (M_292)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 44,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Kaliumsulfat







Standard-Abweichung: 0.0813557
Mittlere Abweichung: -0.0008379
Kleinste Abweichung: -4.0722334
Größte Abweichung: 4.4835469

==========
Bewegte Objekte:
==========

V9_PK049-051-053_140801_971RFKALIUMSULFAT



PK_053 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)

PK_053 bei 96,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 96,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 01.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 177| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_083 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Beule – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Oberflächenverformung in Form einer Delle

In einem weiteren Experimenten wurde an 'PK_053' untersucht, ob im Vergleich zu den vorherigen Versuchen eine Trocknung zu einer gegenteiligen Merkmalsausprägung führt – einer Delle im Bildschichtengefüge. Hierzu wird auf das Experiment V_082 verwiesen. Dabei wird 'PK_053', ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, einer extremen Trocknung bis auf 2,8 %RH unterzogen (Δ49,3 %RH).[568] In der Folge belegte die Falschfarbendarstellung eine signifikante Differenz zwischen den Soll- und den Ist-Daten. Diese wird mit bis zu 0,360 mm in positive Normalenrichtung angegeben – was hinsichtlich der Merkmalsausprägung einer Beule und nicht der erwarteten Delle entspricht (►Abb. 178|).[569] Das nachgewiesene Objektverhalten ist nicht erklärbar.

Eine Delle kann an 'PK_053' messtechnisch über das Experiment V_098 vorgewiesen werden.[570,571] Die Falschfarbendarstellung gewährt den Rückschluss auf eine lokale Verformung des Bildschichtengefüges in negative Normalenrichtung (►Abb. 179| und Abb. 180|). Die Farbcodierung quantifiziert die Soll-Ist-Differenz mit -0,225 mm. Über einen virtuellen Messschieber und Schnittlinien kann diese Angabe auf -0,277 mm präzisiert werden. Als Objektbelastung liegt eine geringfügige Befeuchtung vor (Δ2,7 %RH). Zugleich wird augenfällig, dass sich im Abgleich mit der Bildgebung des vorherigen Experimentes (V_082) das Zentrum der Soll-Ist-Abweichung zur Probekörpermitte hin verschoben hat. Alle folgenden Experimente am besagten Probekörper verifizierten dieses Verhalten, wobei als Belastung immer eine leichte Befeuchtung vorliegt.[572]

Insbesondere die Ergebnisse der letzen Experimente am Untersuchungsgegenstand 'PK_053' sind aufgrund des drastischen Veränderungsmerkmales in Abhängigkeit zu der geringen klimatischen Belastung überraschend. Im gravierendsten Fall konnte bei 'PK_053' im Versuch V_107 bei einer unwesentlichen Befeuchtung von 1,8 %RH, eine Dellenbildung mit -0,225 mm nachgewiesen werden.[573] Dieses Ergebnis wird der Größenordnung nach, durch das verifizierende Experiment V_116 bestätigt. Dort verursachte eine geringe Befeuchtung von 3,1 %RH eine Dellenbildung von -0,225 mm.[574]

568 Vergleiche: V_082, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_294 bei 2,8 %RH, Konditionierung: Δ49,3 %RH), Protokollseite 1

569 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges besteht eine eindeutige Übereinstimmung mit dem Schadensbild: Beule (Kategorie 4).

570 Vergleiche: V_098, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_306 bei 54,8 %RH, Konditionierung: Δ2,7 %RH), Protokollseite 1

571 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges besteht eine eindeutige Übereinstimmung mit dem Schadensbild: Delle (Kategorie 9).

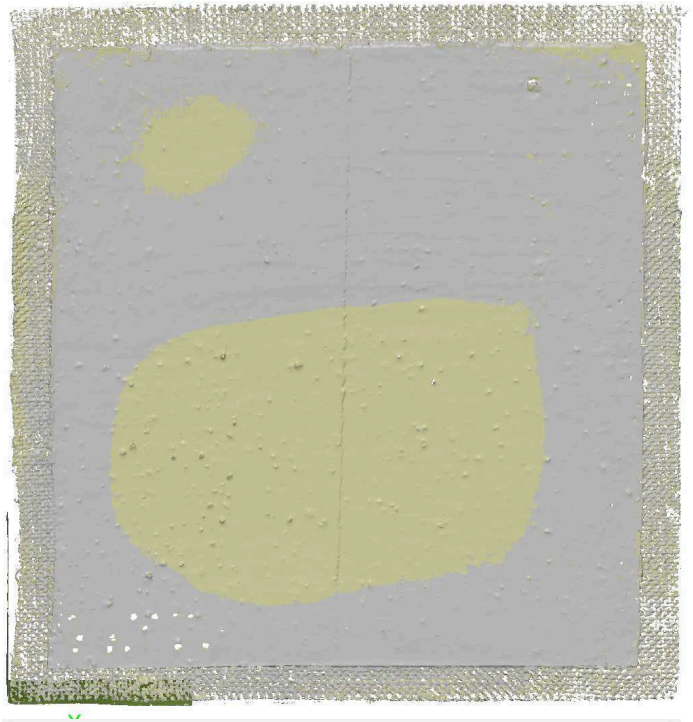
572 Vergleiche hierzu die auf dem elektronischen Datenträger beigefügten Protokolle der Versuchsreihe 11: V_105, V_106, V_107; Versuchsreihe 12: V_114, V_115, V_116.

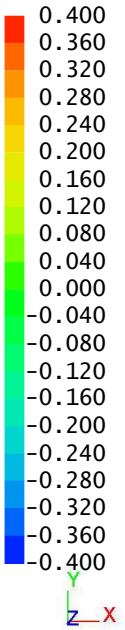
573 Vergleiche: V_107, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_304 bei 53,9 %RH, Konditionierung: Δ1,8 %RH), Protokollseite 1

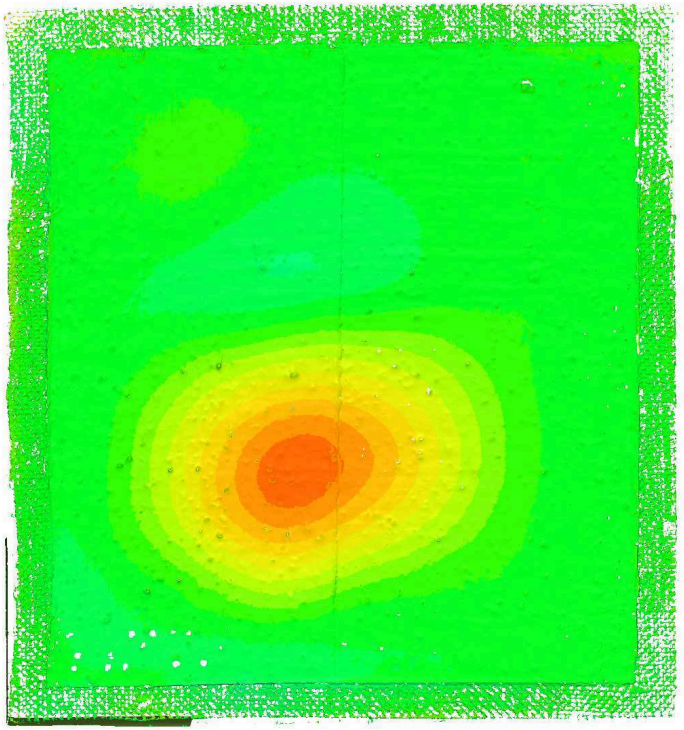
574 Vergleiche: V_116, .PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_324 bei 55,2 %RH, Konditionierung: Δ3,1 %RH), Protokollseite 1

Eine Begründung für das nachgewiesenen, teils divergente Objektverhalten von Beulen- und Dellenbildung, kann hierorts nicht gegeben werden. Ebenso lässt sich auch bei den übrigen Experimenten an den ‘Probekörpern Textil’ (‘PK_049’ und ‘PK_051’) im Gesamten, ein entsprechend eindeutiges und reproduzierbares Verhaltensmuster bei Befeuchtung und Trocknung nicht belegen. Grundsätzlich erlauben die erzielten Ergebnisse jedoch den Rückschluss, dass sich die Untersuchungsmethode zur Lokalisierung und Quantifizierung von Deformationen des Bildschichtengefüges eignet – explizit von Beulen und Dellen.

Versuch: V_082
PK_053 (Öl) bei 52,1 %RH (M_296)/ 2,8 %RH (M_294)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 49,3 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Silikagel







Standard-Abweichung: 0.0847697
Mittlere Abweichung: -0.0019225
Kleinste Abweichung: -4.9169802
Größte Abweichung: 3.5330559

==========
Bewegte Objekte:
==========

V9_PK049-051-053_140801_13RFSILIKAGEL

PK_053 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)

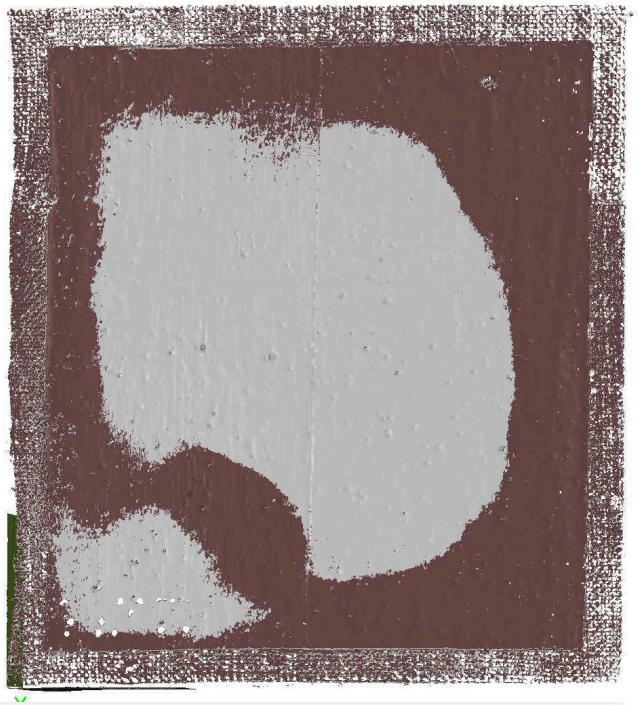
PK_053 bei 2,8 %RH (Ist-Daten)

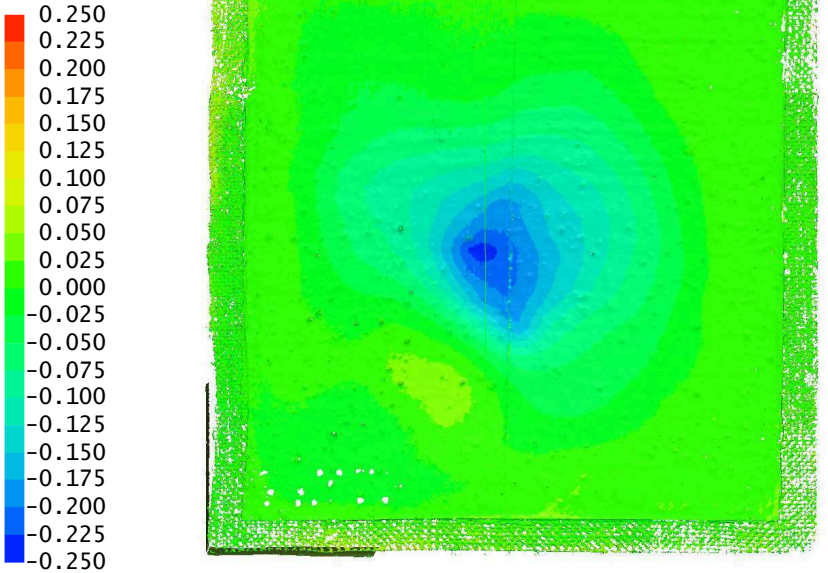
Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 2,8 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 01.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 178| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_082 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Beule – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_098
PK_053 (Öl) bei 52,1 %RH (M_296)/ 54,8 %RH (M_306)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 7,7 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat

Position der Schnittlinie wie auf der folgenden Seite abgebildet.





Standard-Abweichung: 0.0595539
Mittlere Abweichung: 0.0004202
Kleinste Abweichung: -4.6009566
Größte Abweichung: 4.5078137

==========
Bewegte Objekte:
==========

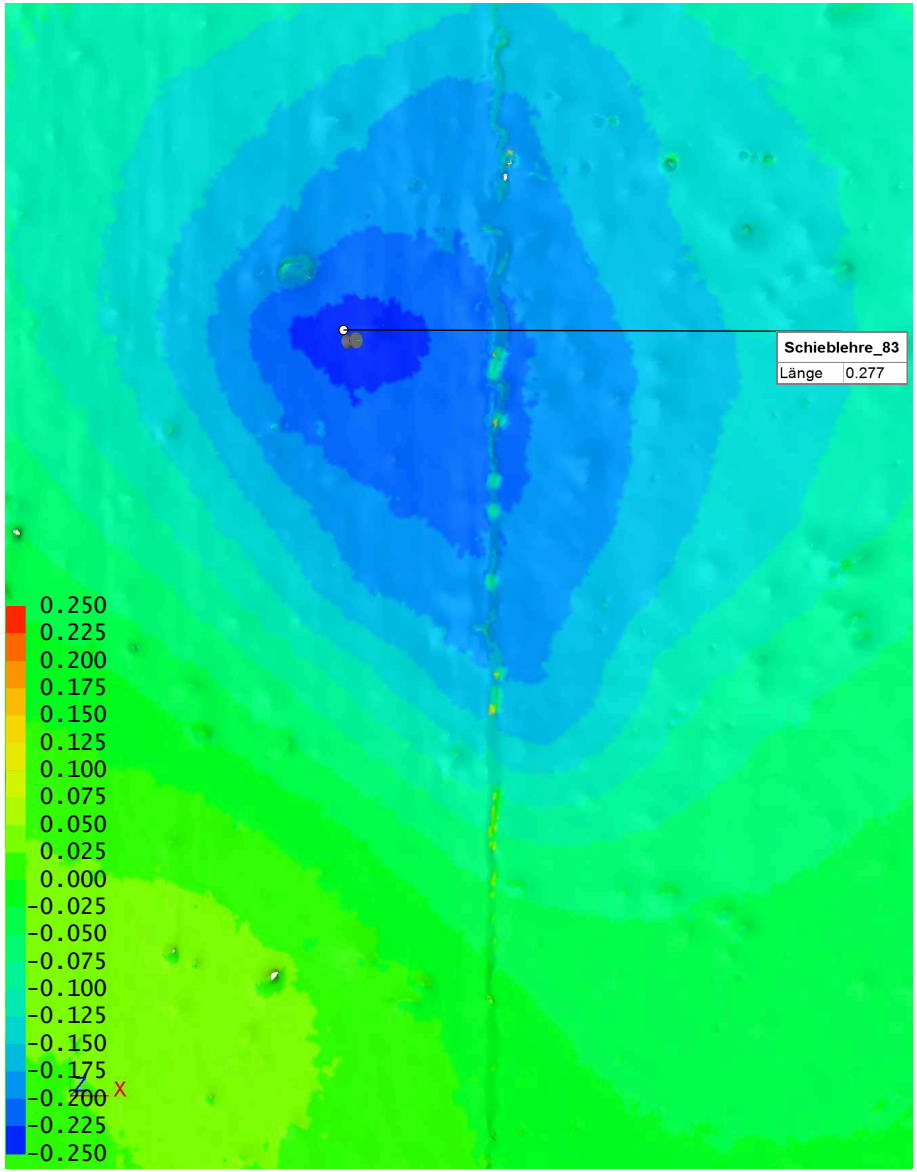
V10_PK049-051-053_140803_555RFMGNESIUMNITRAT

PK_053 bei 52,1 %RH (Soll-Daten)

PK_053 bei 54,8 %RH (Ist-Daten)

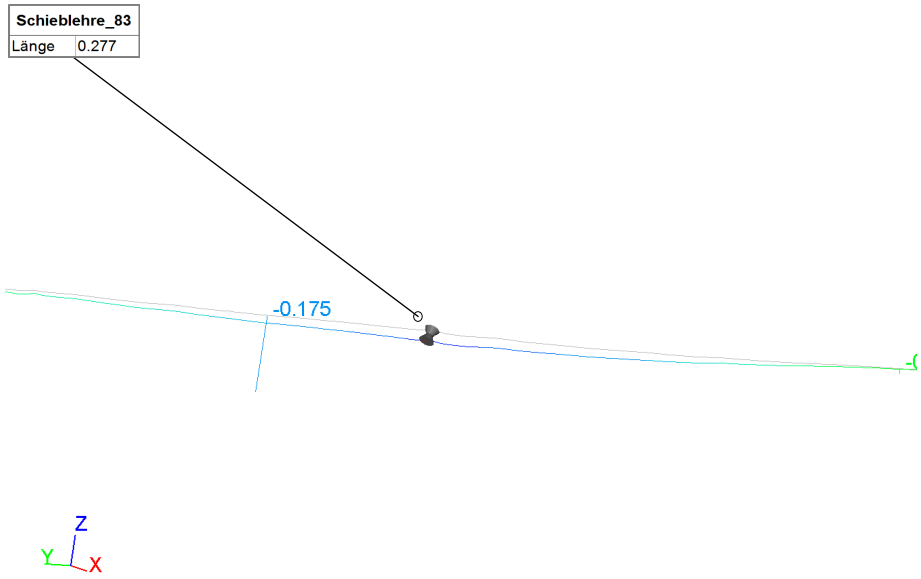
Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 54,8 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 03.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 3

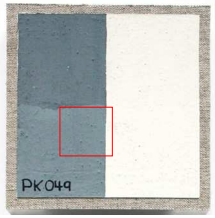
Abb. 179| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_098 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Delle – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst



Nebenstehend:
Detail der Oberflächenverformung mit fein abgestuften Falschfarbendarstellung. Zusätzlich ein Messschieber zur Quantifizierung der Diskrepanzen zwischen den beiden virtuellen Modellen.

Unten:
Der Schnittvergleich im Bereich der maximalen Differenz belegt die lokal begrenzte Verformung die aufgrund ihrer raumdimensionalen, konkaven Richtungsausprägung in negativer Normalenrichtung auf eine Delle rückschließen lässt.





Objekt:	PK_053 (Öl)	
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 54,8 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 03.08.2014
3D_artscan		Seite 2 von 3

Abb. 180| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_098 ('PK_053') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Delle – veranschaulicht über eine Detailansicht der Falschfarbendarstellung, einen virtuellen Messschieber und eine Schnittlinie.
Quelle: Selbst

Fehlstellenbildung

Über das Experiment V_100 kann am Probekörper 'PK_049' über den Soll-Ist-Vergleich eine Fehlstelle im Bildschichtengefüge nachgewiesen werden.[575,576] Die Falschfarbendarstellung gewährt im rechten Randbereich einen entsprechenden Rückschluss (►Abb. 181|). Darüber hinaus sind die Ränder der Fehlstelle aufgrund ihrer Abweichung in negative Normalenrichtung gegenüber den Soll-Daten blau farbcodiert. Die Fehlstelle kann über virtuelle Messschieber zudem mit 0,543 x 0,446 mm quantifiziert werden. Als Schadensursache sind mehrere Faktoren denkbar: erstens eine mechanische Krafteinwirkung beim Wechsel des Probekörpers zwischen den Befeuchtungsboxen,[577] zweitens ein maltechnischer Fehler, drittens die nachgewiesene Feuchteschwankung von 11,9 %RH, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich.

575 Vergleiche: V_100, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_288 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_308 bei 64,0 %RH, Konditionierung: Δ11,9 %RH), Protokollseite 2

576 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Fehlstelle, was gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entspricht und systematisch der Topografieveränderung untergliedert ist.

577 Beim Wechseln der Untersuchungsgegenstände zwischen den Befeuchtungsboxen wurde darauf geachtet, lediglich die Tablare zu berühren und keinesfalls die Probekörper selbst.

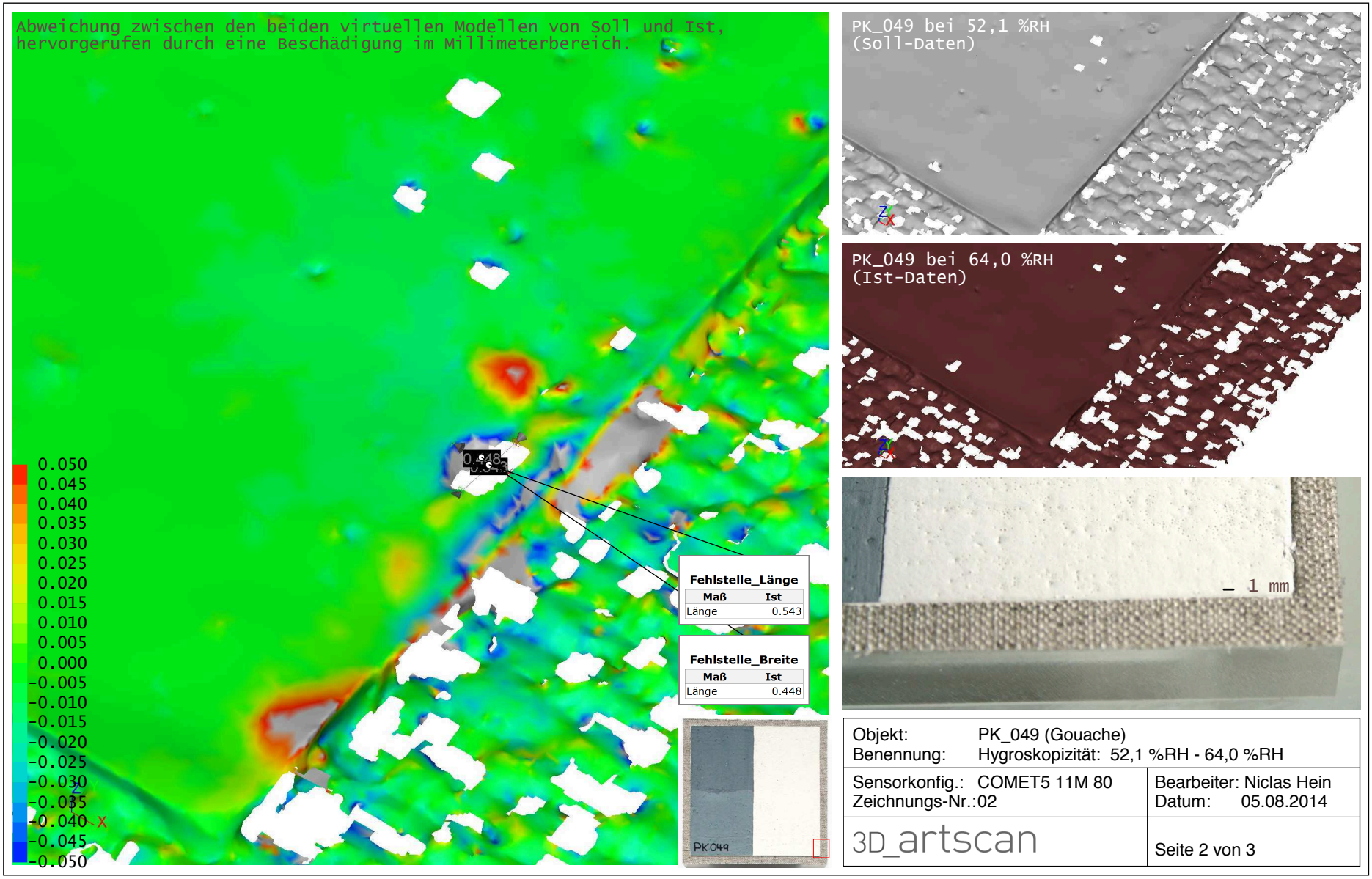


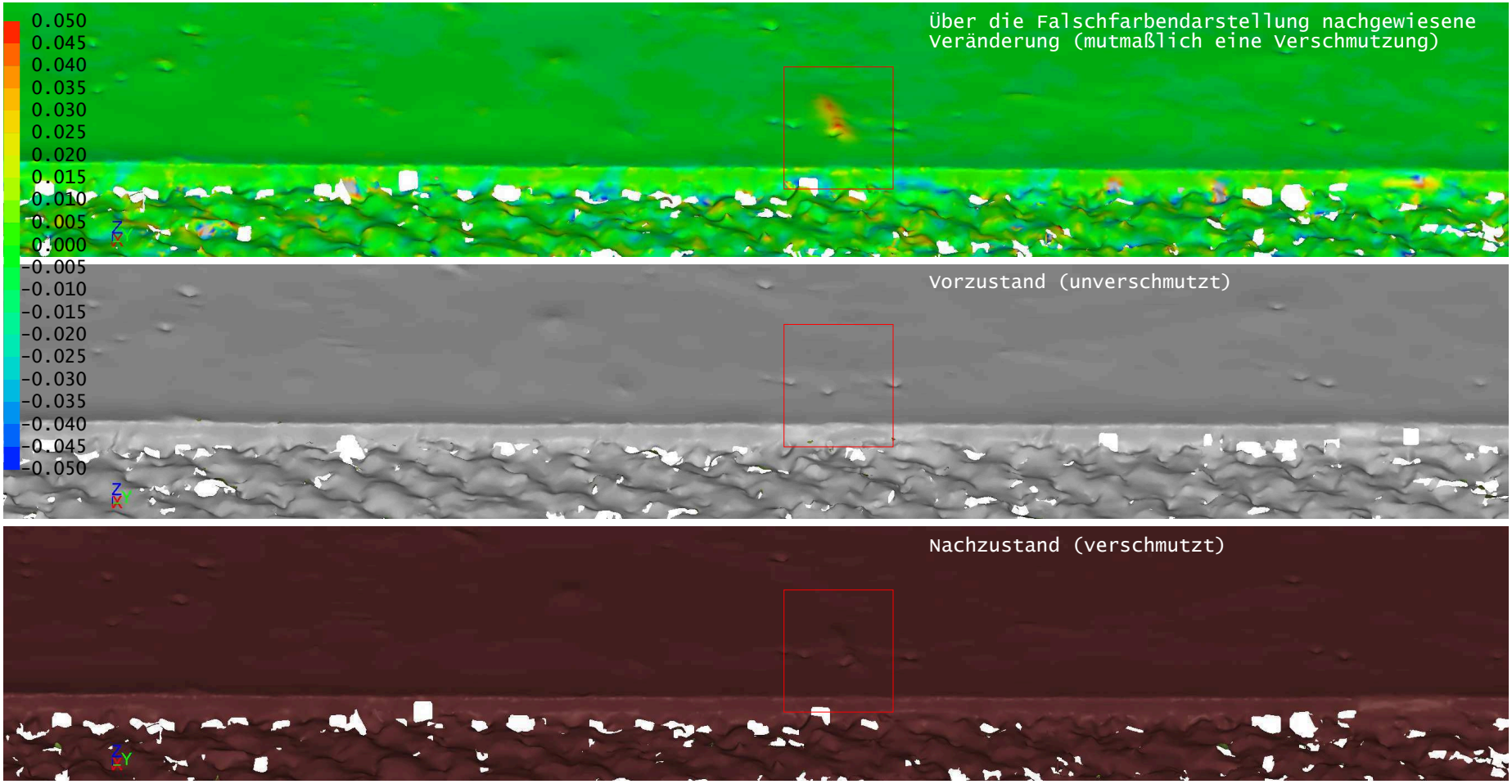
Abb. 181| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_100 ('PK_049') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Fehlstelle – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und einen virtuellen Messschieber.
Quelle: Selbst

Verschmutzung

Anhand des Experimentes V_109 lässt sich abermals bei 'PK_049' über die Falschfarbendarstellung eine partielle Veränderung lokalisieren. Die Farbcodierung weist auf eine Veränderung in positive Normalenrichtung mit 0,050 mm hin (►Abb. 182|).[578] Zugleich erfolgt die Vermessung der Länge über einen virtuellen Messschieber mit 0,633 mm. Als Ursache wird die Ablagerung einer Textilfaser identifiziert.[579] Auch über die 'Viewer-Ansicht' kann diese an den 3D-Datensätzen visualisiert werden. Da sich die Veränderung jedoch im Submillimeterbereich befindet, blieb sie bei der Sichtprüfung unbemerkt. Erst über die teilautomatische Falschfarbendarstellung gelingt der objektive Nachweis. Die Verschmutzung entstand mutmaßlich im Zuge des Wechsels zwischen den Klimaboxen. Indizien für weitere Rückschlüsse bestehen nicht.

578 Vergleiche: V_109, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_288 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_317 bei 61,3 %RH, Konditionierung: Δ9,2 %RH), Protokollseite 1

579 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Verschmutzung, die gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entspricht und systematisch der Topografieveränderung untergliedert ist.



Objekt:	PK_049 (Gouache)		
Benennung:	Hygroskopizität: 52,1 %RH - 61,3 %RH		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum:	06.08.2014
3D_artscan		Seite 2 von 3	

Abb. 182| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_109 ('PK_049') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Fehlstelle – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und einen virtuellen Messschieber.
Quelle: Selbst

22.3 Ergebnisse der statistischen Auswertung

Analog zur oben geschilderten Auswertungsstrategie wird zunächst auf die Ergebnisse der Versuchsreihen, die die klimatischen Extremata umfassen (VR7-VR9), eingegangen. Im Anschluss daran werden die geringfügigen Klimaschwankungen erörtert (VR10-VR12) und abschließend einer Gesamtbetrachtung unterzogen.

Versuchsreihen VR7-VR9

In einem ersten Schritt wird der mittlere Punktabstand für die Probekörper mit textilem Bildträger 'PK_049', 'PK_051' und 'PK_053' betrachtet. Dieser zeigt keine gravierenden Abweichungen. So lassen sich daraus zunächst keine Dimensionsänderungen bzw. Verformungen als Belastungsfolge ableiten – anders als es bei den gleichen klimatischen Belastungen der Holzprobekörper der Fall war. Der maximale Wert der Abweichung über alle Versuche und Probekörper beträgt bei extremer Trockenheit -0,002 mm, bei Befeuchtung 0,001 mm (►Tab. 51|). Mehrheitlich sind jedoch Werte von 0,000 mm auszumachen. Dies suggeriert zunächst, dass keine Veränderung der Probekörper vorhanden ist. Die Betrachtung der Standardabweichung gibt eine widersprüchliche Aussage zum mittleren Punktabstand. Dieser belegt eindeutige Abweichungen. Jedoch präzisiert die Bildgebung weitergehende Rückschlüsse. Exemplarisch ist der Versuch V_096[580] zu nennen, der anhand des mittleren Punktabstandes von 0,000 keine Änderung vorgibt, jedoch in der Standardabweichung und der Bildgebung deutliche Abweichungen zeigt. Wie vermutet gleichen sich negative und positive Werte bei der Berechnung des mittleren Punktabstandes aus. Aufgrund der geringen Aussagekraft der Werte wird von einer weiteren Betrachtung des mittleren Punktabstandes abgesehen.

Eine Betrachtung der Standardabweichung im Mittelwert je Probekörper und Konditionierungsstoff zeigt beim Vergleich der Probekörper untereinander ähnliche Werte für die einzelnen Konditionierungen. So führt eine starke Trocknung mittels 'Silikagel E' bei allen Probekörpern zu der höchsten mittleren Standardabweichung (min. 0,062 mm bei 'PK_049' und max. 0,075 mm bei 'PK_053') (►Tab. 52|). Eine leichte Trocknung mit Kaliumcarbonat-Dihydrat um weniger als 9% RH erzielt im Mittelwert der Standardabweichung bei allen Probekörpern die geringste Abweichung im Vergleich der Konditionierungen (min. 0,042 mm bei 'PK_053', max. 0,050 mm bei 'PK_051'). In den Versuchen wird bei extremer Befeuchtung (ca. 43 %RH) eine geringere Feuchteschwankung erzielt als bei einer extremen Trocknung (ca. 51 %RH). Gemäß der Erwartungen belegt die Standardabweichung geringere Soll-Ist-Differenzen bei extremer Befeuchtung als bei extremer Trocknung. Das Maximum des Mittelwertes beträgt hier 0,064 mm ('PK_053'). Im Vergleich der einzelnen Probekörper reagiert 'PK_053' sowohl auf Trocknung als auch auf Befeuchtung

580 Vergleiche: V_096, ‚PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_304 bei 59,8 %RH, Konditionierung: Δ7,7 %RH), Protokollseite 1 f.

am ausgeprägtesten – grundsätzlich verhalten sich die Probekörper jedoch ähnlich hinsichtlich ihres Veränderungsmaßes.
Eine Untersuchung der Reproduzierbarkeit zeigt insbesondere bei Probekörper 'PK_051' positive Ergebnisse. Hier liegen Differenzen der Versuchsreihen innerhalb einer Konditionierung bei einer maximalen Spannweite von 0,007 mm der Standardabweichung vor. Bei den Probekörpern 'PK_049' und 'PK_053' sind jedoch Schwankungen auszumachen – Spannweite: 'PK_049' max. 0,015 mm und 'PK_053' max. 0,035 mm.
Eine Korrelationsbetrachtung für die einzelnen Probekörper nach Trocknung und Befeuchtung zeigt nahezu überall starke Abhängigkeiten.

Konditionierungsstoff	Versuchsreihe	Mittlerer Punktabstand		
		PK_049	PK_051	PK_053
Silikagel E	VR7	-0,001	-0,001	0,000
	VR8	-0,001	-0,001	-0,001
	VR9	-0,002	-0,001	-0,002
	Median (VR7-VR9)	-0,001	-0,001	-0,001
	Mittelwert (VR7-VR9)	-0,001	-0,001	-0,001
Kaliumcarbonat-Dihydrat	VR7	0,000	0,000	0,000
	VR8	0,000	-0,001	0,000
	VR9	0,000	0,000	0,000
	Median (VR7-VR9)	0,000	0,000	0,000
	Mittelwert (VR7-VR9)	0,000	-0,001	0,000
Kaliumsulfat	VR7	0,000	0,000	0,001
	VR8	0,000	0,000	0,000
	VR9	0,001	0,001	-0,001
	Median (VR7-VR9)	0,000	0,000	0,000
	Mittelwert (VR7-VR9)	0,000	0,000	0,000

Tab. 51| Betrachtung des mittleren Punktabstandes in mm (basierend auf der Bildgebung) sowie Darstellung von Median und Mittelwert je Probekörper für die Versuchsreihen VR7-VR9.
Quelle: Selbst

Konditionierungsstoff	Versuchsreihe	Standardabweichung (mm) PK_049	PK_051	PK_053
Silikagel E	VR7	0,072	0,068	0,081
	VR8	0,057	0,061	0,060
	VR9	0,057	0,064	0,085
	Median (VR7-VR9)	0,057	0,064	0,081
	Mittelwert (VR7-VR9)	0,062	0,064	0,075
	Spannweite (VR7-VR9)	0,015	0,007	0,024
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	24,14%	11,37%	32,24%
Kaliumcarbonat-Dihydrat	VR7	0,046	0,051	0,041
	VR8	0,049	0,052	0,041
	VR9	0,039	0,047	0,042
	Median (VR7-VR9)	0,046	0,051	0,041
	Mittelwert (VR7-VR9)	0,045	0,050	0,042
	Spannweite (VR7-VR9)	0,010	0,005	0,001
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	23,26%	9,15%	2,05%
Kaliumsulfat	VR7	0,059	0,053	0,063
	VR8	0,044	0,051	0,047
	VR9	0,045	0,053	0,081
	Median (VR7-VR9)	0,045	0,053	0,063
	Mittelwert (VR7-VR9)	0,049	0,052	0,064
	Spannweite (VR7-VR9)	0,015	0,003	0,035
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	29,83%	5,52%	54,42%
Korrelation (Änderung |%RH| und Standardabweichung) bei Trocknung		-0,849	-0,948	-0,901
Korrelation (Änderung |%RH| und Standardabweichung) bei Befeuchtung		-0,780	0,258	0,607

Tab. 52| Betrachtung der Standardabweichung sowie Darstellung von Median, Mittelwert und Spannweite je Probekörper für die Versuchsreihen VR7-VR9 sowie Korrelationsberechnung bei Befeuchtung und Trocknung. Quelle: Selbst

Versuchsreihen VR10-VR12

Die Korrelationsbetrachtung der Standardabweichung und der Änderung der relativen Feuchte sollen einen ersten Aufschluss über die Abhängigkeit von Feuchteschwankungen im mittleren Feuchtebereich und dem Veränderungsmaß der Probekörper geben. Die Korrelationsbetrachtung zeigt mit Werten von -0,159 bis 0,356 keine Abhängigkeiten (►Tab. 53|). Die genaue Betrachtung der Standardabweichung ermöglicht eine Begründung für die geringen Abhängigkeiten. So bewegt sich die Standardabweichung trotz zunehmender Befeuchtung durchgängig innerhalb der Versuche und unterschiedlichen Konditionierungen auf ähnlichem Niveau. Also hat das Maß der veränderten Feuchte keinen Einfluss auf die Dimensionsänderungen bzw. Objektverformungen. In diesem Kontext kann somit auch nicht von einem reproduzierbaren Verhalten gesprochen werden, da die Konditionierungen keine wesentlichen Änderungen hervorrufen. Beispielhaft wird Probekörpers 'PK_051', der sich in den Versuchen mit extremen Klimaschwankungen als sehr reproduzierbar erwiesen hat, betrachtet. Über alle Versuche, unabhängig der Konditionierung, beträgt die Spannweite der Standardabweichung 0,007 mm. Eine Spannweite der gleichen Größenordnung kann jedoch auch über die drei Versuchsreihen mit Ammoniumnitrat verzeichnet werden (0,007mm). Daraus lässt sich schließen, dass die Änderung der Standard-

abweichung nicht aus den Feuchteschwankungen selbst hervorgeht, sondern maßgeblich durch die Versuchsreihen innerhalb einer Konditionierung verursacht wird. Dieser Sachverhalt wird zudem durch den Mittelwert der Standardabweichung über alle Versuchsreihen je Konditionierung und Probekörper bestätigt.

Konditionierungsstoff	Versuchsreihe	Standardabweichung (mm)			Änderung %RH
		PK_049	PK_051	PK_053	
Magnesiumnitrat-Hexahydrat	VR10	0,041	0,054	0,060	
	VR11	0,044	0,053	0,052	2,7
	VR12	0,044	0,050	0,050	1,8
	Median (VR10-VR12)	0,044	0,053	0,052	3,1
	Mittelwert (VR10-VR12)	0,043	0,053	0,054	
	Spannweite (VR10-VR12)	0,003	0,004	0,009	
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	7,12%	8,37%	16,89%	
Natriumbromid	VR10	0,040	0,054	0,054	
	VR11	0,041	0,052	0,055	7,7
	VR12	0,049	0,052	0,061	5,5
	Median (VR10-VR12)	0,041	0,052	0,055	7,8
	Mittelwert (VR10-VR12)	0,043	0,052	0,056	
	Spannweite (VR10-VR12)	0,009	0,002	0,007	
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	20,43%	3,82%	12,66%	
Ammoniumnitrat	VR10	0,045	0,055	0,054	
	VR11	0,040	0,054	0,056	8,6
	VR12	0,043	0,048	0,058	11,9
	Median (VR10-VR12)	0,043	0,054	0,056	9,2
	Mittelwert (VR10-VR12)	0,042	0,052	0,056	
	Spannweite (VR10-VR12)	0,005	0,007	0,005	
	Spannweite prozentual zum Mittelwert	11,91%	13,14%	8,14%	
Korrelation (Änderung %RH und Standardabweichung)		-0,159	0,034	0,356	
Spannweite (VR10-VR12)		0,009	0,007	0,010	10,100

Tab. 53| Betrachtung der Standardabweichung sowie Darstellung von Median, Mittelwert und Spannweite je Probekörper für die Versuchsreihen VR10-VR12 sowie Korrelationsberechnung und Spannweite.
Quelle: Selbst

Gesamtbetrachtung der Versuchsreihen VR7-VR12

Die Standardabweichung zeigt bei den Versuchen VR7-VR9 sehr deutlich, dass das Veränderungspotenzial global gesehen weitestgehend reproduzierbar ist. Im Gegenzug zu den extremen Feuchteschwankungen kann im Bereich von ca. Δ10 %RH keine Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Jedoch lassen sich auch hier bereits bei Feuchteschwankungen über 1,8 %RH Veränderungen belegen. Letztlich können über die statistische Auswertung jedoch nur Aussagen zum globalen Veränderungsmaß getroffen werden. Da sich das hygroskopische Verhalten bei den Textilprobekörpern vorrangig lokal äußert, ermöglicht erst die Bildgebung eine Einschätzung des Veränderungsmerkmals und damit des Schadenspotenzials. Exemplarisch wird im engen Feuchtebereich auf die Versuche V_092[581] und V_098[582] verwiesen, die obgleich geringfügiger Klimaschwankungen deutliche lokale Veränderungen aufzeigen.

581 Vergleiche: V_092, ‚PK_049' (Soll-Daten: M_288 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_300 bei 54,8 %RH, Konditionierung: Δ2,7 %RH), Protokollseite 1 f.

582 Vergleiche: V_098, ‚PK_053' (Soll-Daten: M_296 bei 52,1 %RH / Ist-Daten: M_306 bei 54,8 %RH, Konditionierung: Δ2,7 %RH), Protokollseite 1 f.

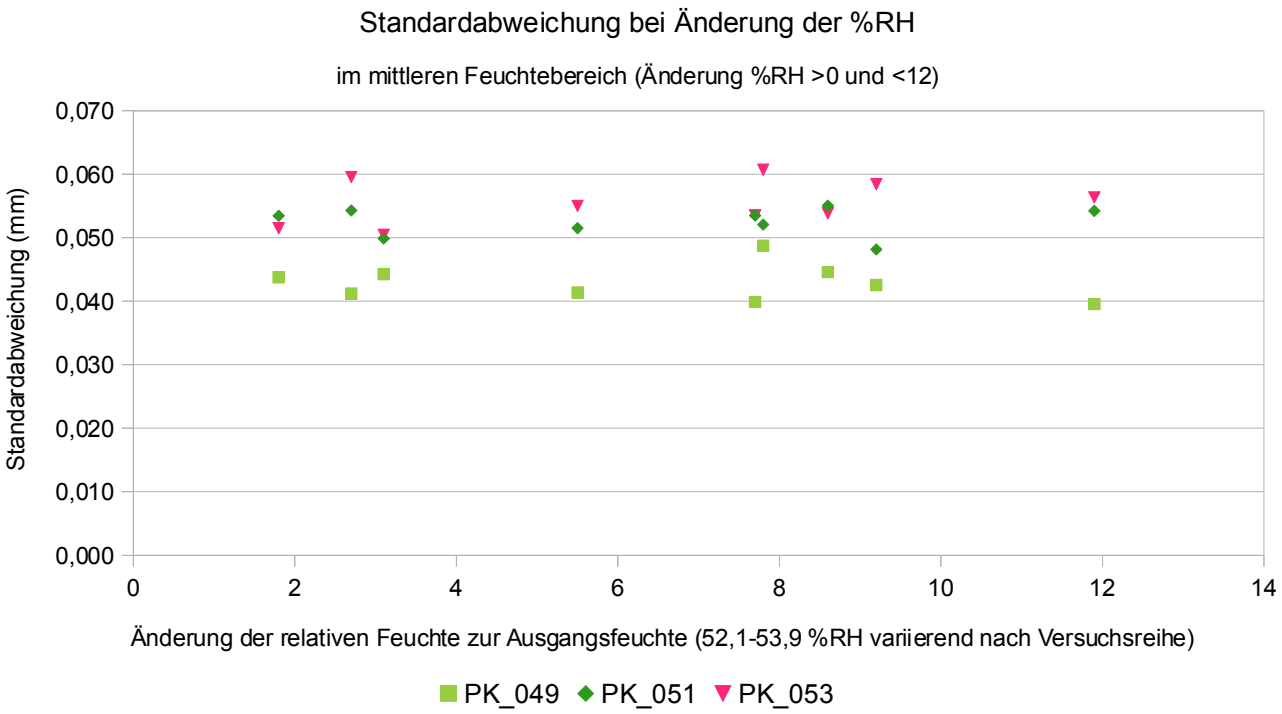


Abb. 183| Standardabweichung in Abhängigkeit zur Änderung %RH im mittleren Feuchtebereich.
Quelle: Selbst

22.4 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR7-VR12)

Die Ergebnisse an den Textilprobekörpern zusammenfassend, kann ein bildgebender Nachweis über die Korrelation von Beulenbildung[583] und Befeuchtungsgrad erbracht werden. So zeigt sich ausgehend vom mittleren Feuchtebereich und einer moderaten Befeuchtung (52,1 → 59,9 %RH, Δ7,8 %RH) eine signifikante Topografieveränderung (0,175 mm). Überraschend sind ebenso die Ergebnisse zum Veränderungsmerkmal Beule, die beim selben Probekörper sowohl bei einer Trocknung[584] als auch bei einer Befeuchtung[585] aufzuzeigen sind. Über die Gesamtheit der Experimente kann kein eindeutiges und reproduzierbares Verhaltensmuster nachgewiesen werden – ein bisher unerklärbarer Sachverhalt. Bedeutsam ist jedoch ein unerwartetes Objektverhalten bei geringfügiger Befeuchtung (52,1 → 53,9 %RH, Δ1,8 %RH)[586], die zu einer messtechnisch eindeutig belegten Dellenbildung (-0,225 mm) führt. Aufschlussreich ist weiterhin das Ergebnis des malschichtseitigen Risses[587]. Durch den parallelen Verlauf zum umseitigen Rahmenschenkel kann damit über die Modellbildung das am Original oftmals zu beobachtende Schadensbild des Keilrahmensprungs belegt werden. Die Falschfarbendarstellung offenbart ausgeprägtere Veränderungen entlang der Kantenklaffung im Rissbereich. Mehr noch überzeugen jedoch die Messdaten. Besonders

583 Vergleiche: V_096
584 Vergleiche: V_082
585 Vergleiche: V_098, bzw. V_083
586 Vergleiche: V_107
587 Vergleiche: V_058, V_067 und V_077

positiv ist ebenso die erstmals teilautomatische Lokalisierung einer Fehlstelle[588] hervorzuheben. Die Bedeutsamkeit ergibt sich aus der Geringfügigkeit des Veränderungsmerkmales, quantifiziert mit ca. 0,242 mm². Zugleich beweist sich mit diesem praxisnahen Experiment die Leistungsfähigkeit des 'COMET-System' zugunsten des geplanten Transportschadensmonitoring. Ebenso wie der messtechnisch nachgewiesene Fussel[589] wären beide der genannten Veränderungen aufgrund ihrer Größenordnung bei einer herkömmlichen Untersuchung mutmaßlich auch erfahrenen Restauratoren entgangen.
Da sich bei den Textilprobekörpern Klimaschwankungen vorrangig lokal äußern, ermöglicht die statistische Betrachtung im Zusammenhang mit der klimatischen Belastung lediglich eine Einschätzung des Veränderungspotenzials. Ausschließlich bei den Versuchen mit extremen Feuchteschwankungen können starke Abhängigkeiten von Veränderungsmaß und klimatischer Belastung nachgewiesen werden – auch ist das Verhalten vorwiegend reproduzierbar. In der Gesamtheit reagieren die Probeköper – dem Grad der Feuchteschwankung entsprechend – stärker auf Trocknung als auf Befeuchtung. Im Vergleich der Probekörper untereinander verhalten sich diese hinsichtlich ihres Veränderungsmaßes sehr ähnlich. Anders als bei den ersten Versuchsreihen kann bei den Versuchen im Bereich der geringfügiger und moderater Feuchteschwankung kein reproduzierbares Verhalten aufgezeigt werden. Obgleich auch geringe Feuchteschwankungen zu nachgewiesenen Veränderungen führen, kann keine stringente Abhängigkeit zur Feuchteschwankung belegt werden.

588 Vergleiche: V_100

589 Vergleiche: V_109

23. Experimente zur klimatischen Belastung: Realobjekt (VR13)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente an den Realobjekten in Auszügen vorgestellt.

23.1 Ergebnisse der Konditionierung

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Klimatisierung der Realobjekte zusammengefasst (►Tab. 54|).

Realobjekte (Klimatische Belastung)

Versuchsreihe_13

Messungs Nr.	Probekörper Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_571	RO_001	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,6	55,3	Soll (V_117)
M_572	RO_001	Natriumbromid	27,4	58,9	Ist (V_117), Soll (V_118)
M_573	RO_001	Ammoniumnitrat	24,9	63,3	Ist (V_118), Soll (V_119)
M_574	RO_001	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,5	54,3	Ist (V_119), Soll
M_575	RO_009	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,6	55,3	Soll (V_120)
M_576	RO_009	Natriumbromid	27,4	58,9	Ist (V_120), Soll (V_121)
M_577	RO_009	Ammoniumnitrat	24,9	63,3	Ist (V_121), Soll (V_122)
M_578	RO_009	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,5	54,3	Ist (V_122)
M_579	RO_032	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,6	55,3	Soll (V_123)
M_580	RO_032	Natriumbromid	27,4	58,9	Ist (V_123), Soll (V_124)
M_581	RO_032	Ammoniumnitrat	24,9	63,3	Ist (V_124), Soll (V_125)
M_582	RO_032	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,5	54,3	Ist (V_125)
M_583	RO_033	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,9	54,5	Soll (V_126)
M_584	RO_033	Natriumbromid	24,0	59,5	Ist (V_126), Soll (V_127)
M_585	RO_033	Ammoniumnitrat	24,4	64,1	Ist (V_127), Soll (V_128)
M_586	RO_033	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,5	54,7	Ist (V_128)
M_587	RO_038	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,9	54,5	Soll (V_129)
M_588	RO_038	Natriumbromid	24,0	59,5	Ist (V_129), Soll (V_130)
M_589	RO_038	Ammoniumnitrat	24,4	64,1	Ist (V_130), Soll (V_131)
M_590	RO_038	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,5	54,7	Ist (V_131)
M_591	RO_046	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,9	54,5	Soll (V_132)
M_592	RO_046	Natriumbromid	24,0	59,5	Ist (V_132), Soll (V_133)
M_593	RO_046	Ammoniumnitrat	24,4	64,1	Ist (V_133), Soll (V_134)
M_594	RO_046	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,5	54,7	Ist (V_135)

Tab. 54| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihen VR13 (Realobjekte), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung. Quelle: Selbst

23.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen

Bei der Systemerprobung zur Untersuchung des verfahrenstechnischen Nachweises von strukturellen Veränderungen an den Realobjekten können ebenso mehrfach positive Belege der Eignung vorgewiesen werden.

Fehlstellenbildung

Beispielhaft anzuführen ist die Bildgebung einer neu entstandenen Fehlstelle an 'RO_001'.[590,591] Ihre Identifizierung, bzw. Lokalisierung erfolgt im Rahmen des Soll-Ist-Vergleiches teilautomatisiert über die farbliche Hervorhebung bei der Falschfarbendarstellung (►Abb. 184|). Wird diese geeignet skaliert, so kann anhand der Farbcodierung auf lokale, signifikante Soll-Ist-Differenzen rückgeschlossen werden. Die Fehlstelle befindet sich im Randbereich des vorgeschädigten Areals (Loch im Schichtenverbund). Überdies gelingt die präzise Vermessung der Fehlstelle durch virtuelle Messschieber (0,880 x 1,527 mm (≈1,343 mm2)). Die Ursache der beschriebenen Veränderung ist nicht zweifelsfrei zu benennen. So ist bei der Darlegung der Kausalkette allen voran auf den Vorschaden hinzuweisen. Da im Randbereich der Beschädigung des Schichtenverbundes (Schnitt und Loch) eine Schollenbildung vorliegt, überrascht der Folgeschaden nicht. Vor der klimatischen Belastung wurde das Realobjekt über Kopf gedreht und der Verbund als haftend bewertet. Die leichte Befeuchtung um 3,6 %RH, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, und/oder mögliche mechanische Kräfte beim Wechsel zwischen den Befeuchtungsboxen können letztlich zur Fehlstellenbildung mit beigetragen haben.[592]

Das Experiment erlaubt die Ableitung, dass sich das Verfahren zur Nachweisführung neuer Fehlstellen eignet. Bedingt durch ihre sehr geringe Größe, den Vorschäden und der damit verbundenen Unübersichtlichkeit ist eine optische Beurteilung struktureller Veränderungen schwierigkeitsbehaftet. Dieses gilt sowohl für die Identifizierung des Schadens am Original, als auch in der 'Viewer-Ansicht' bei den 3D-Modellen.

In einem konsekutiven Experiment ist an 'RO_001' bei weiter gehender klimatischer Belastung eine erneute Fehlstellenbildung nachzuweisen (►Abb. 185|).[593] Abermals ermöglicht die Falschfarbendarstellung entsprechende Rückschlüsse. Die hier detektierte Fehlstelle (1,058 x 0,657 mm (≈0,695 mm2)) unterschritt die zuvor detektierte hinsichtlich ihrer Größe, was die Leistungsfähigkeit des Verfahrens erneut unterstreicht.

Schollenbewegung

590 Vergleiche: V_117, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_571 bei 55,3 %RH / Ist-Daten: M_572 bei 58,9 %RH, Konditionierung: Δ3,6 %RH), Protokollseite 3

591 Bei dieser Veränderung besteht keine direkte Merkmalsübereinstimmung mit einem Schadensbild des Schadenskataloges. Es findet hingegen seine Entsprechung in den Grundschadensarten – Kategorie: Fehlstelle.

592 Beim Wechseln der Untersuchungsgegenstände zwischen den Befeuchtungsboxen wurde darauf geachtet, lediglich die Tablare zu berühren und keinesfalls die Realobjekte selbst.

593 Vergleiche: V_119, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_573 bei 63,3 %RH / Ist-Daten: M_574 bei 54,3 %RH, Konditionierung: Δ9,0 %RH), Protokollseite 2

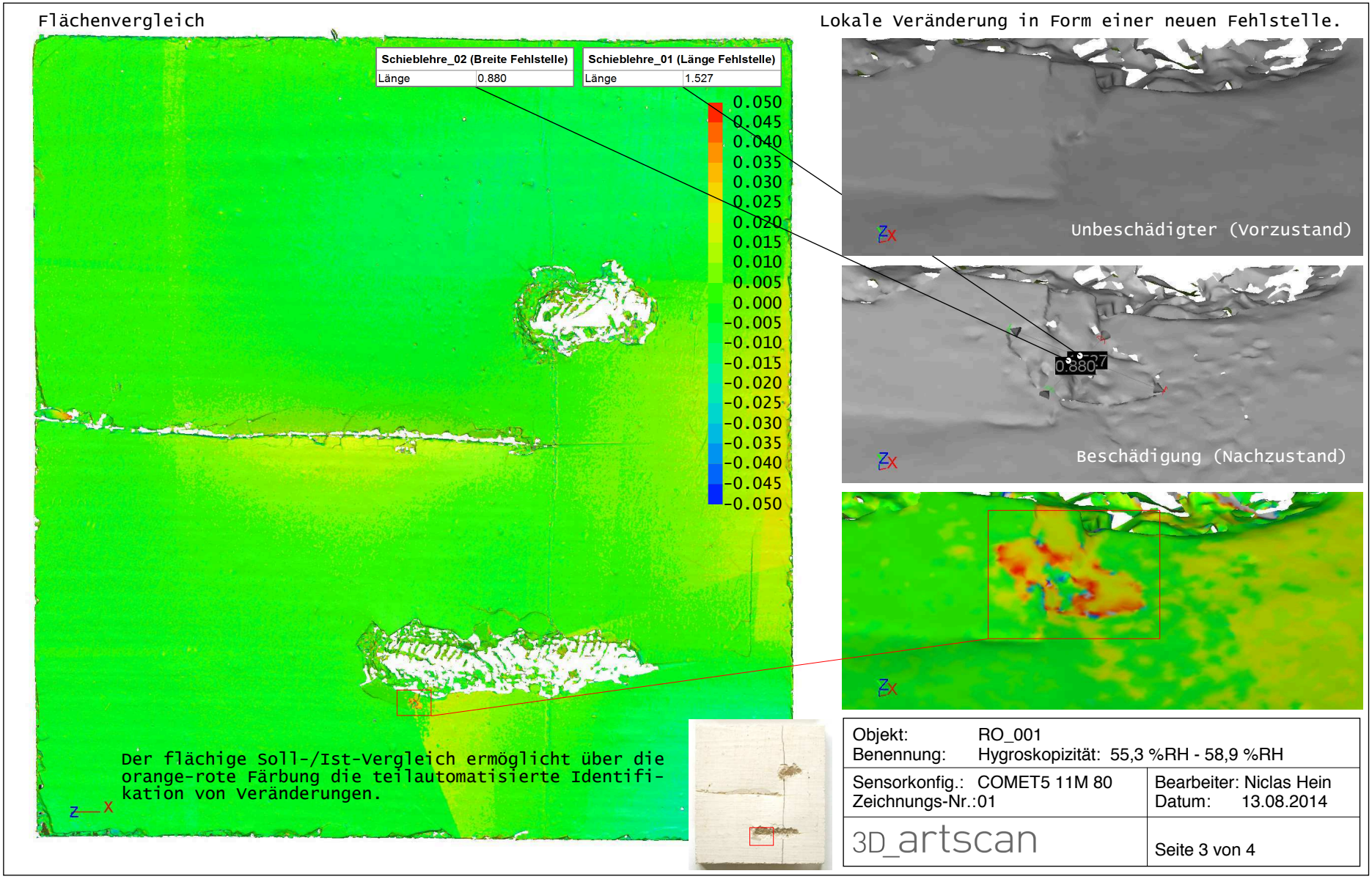


Abb. 184| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_117 ('RO_001') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Fehlstelle – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und virtuelle Messschieber.
Quelle: Selbst

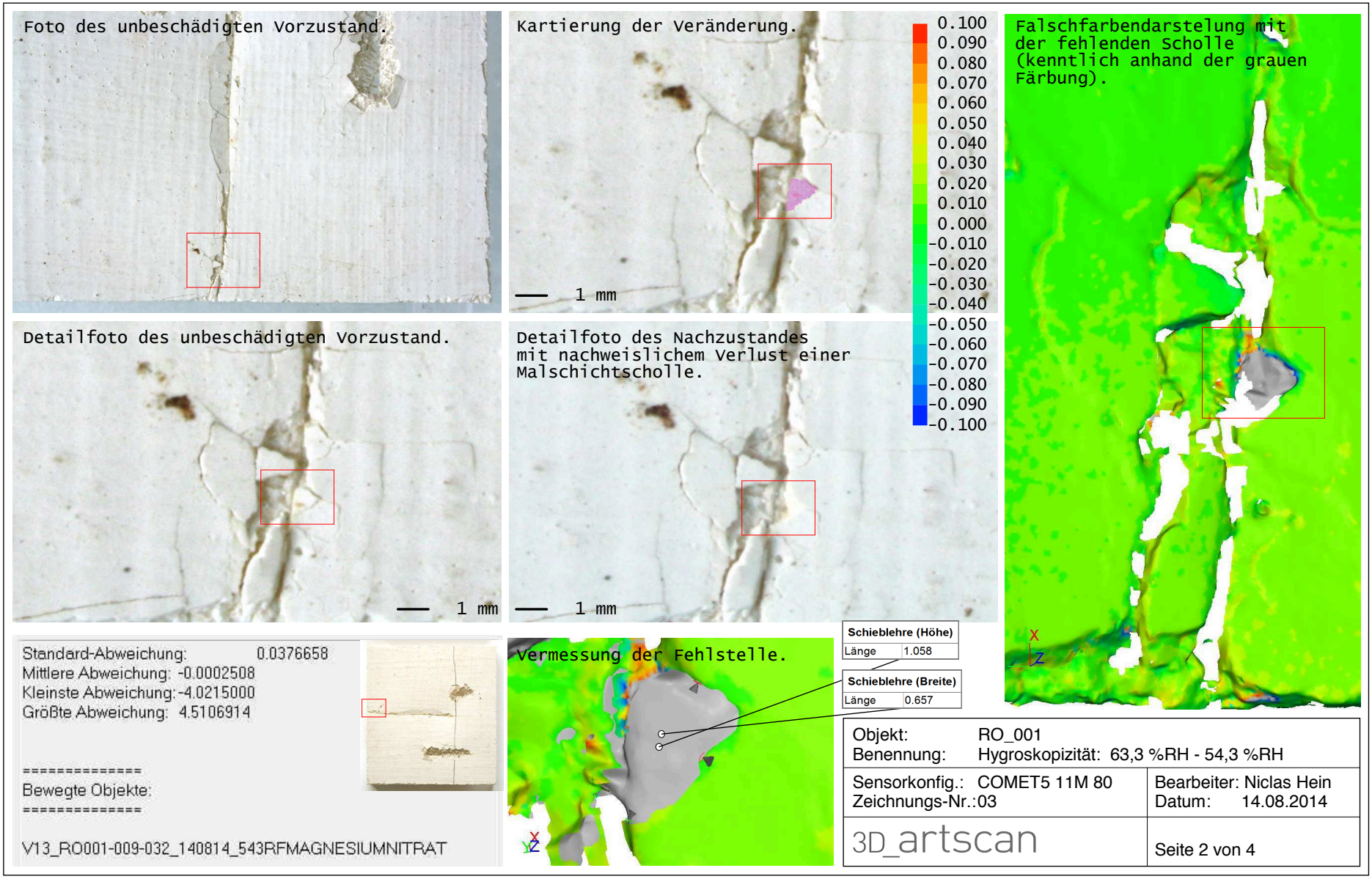


Abb. 185| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_119 ('RO_001') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Fehlstelle – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung, Tageslichtfotos und virtuelle Messschieber. Quelle: Selbst

Neben den bisherigen Ergebnissen, die die Verfahrenseignung beim Verlust von Schollen belegen, kann ebenso ein hygroskopisches Verhalten des Bildschichtengefüges visualisiert werden. Damit sind allgemein Veränderungsprozesse gemeint, die sich aus der klimatischen Belastung ergeben. So kann an 'RO_001' über einen Soll-Ist-Vergleich in Form einer Falschfarbendarstellung eine besonders klimasensitive Scholle identifiziert werden (►Abb. 186|).[594,595] Die Farbcodierung belegt eine partielle Erhebung in positive Normalenrichtung, quantifizierbar mit 0,050 mm. Hierbei wird abgeleitet, dass sich die gelb bis rot hervorgehobenen Bereiche des Schichtengefüges vom Bildträger gelöst haben. Der grüne Bereich lässt hingegen auf einen festen Verbund zum Bildträger rückschließen, da er verhältnismäßig unsensibel auf Klimaschwankungen reagiert. Über Serienschnitte und virtuelle Messschieber kann das Ergebnis der Falschfarbendarstellung verifiziert werden. Auch hier ergibt die Abstandsmessung zwischen den Soll- und den Ist-Daten, im Maximum der aufstehenden Scholle, eine Diskrepanz von 0,052 mm. Weiter kann über den Verlauf der Schnittlinien der 3D-Modelle bestätigt werden, dass sich die Ränder der Scholle weiter aufwerfen als innen liegende Bereiche. Als Ursache für die Schollenbewegung wird der Feuchteanstieg um 3,6 %RH angefügt.

Mit dem erörterten Experiment kann die Verfahrenseignung zum Nachweis kleinster Schollenbewegungen als Folge geringfügigster Klimaschwankungen erbracht werden, was die Quantifizierung inkludiert. Auch wenn diese mit 0,050 mm vergleichsweise klein ausfällt, verdeutlicht das Experiment, welchen Einfluss selbst kleinste Klimaschwankungen (Δ3,6 %RH) auf ein gealtertes und mit Vorschäden belastetes Materialgefüge haben kann.

An das vorhergehenden Experiment (V_117) anknüpfend, zeigte eine abermalige leichte Befeuchtung von 'RO_001' (V_118) um 4,4 %RH, eine Verstärkung der eben beschriebenen Veränderung.[596] Die Farbcodierung der Falschfarbendarstellung offenbart bei der gelockerten Malschicht eine verstärkte Aufwerfung in positive Normalenrichtung, quantifizierbar mit 0,150 mm (►Abb. 200|).

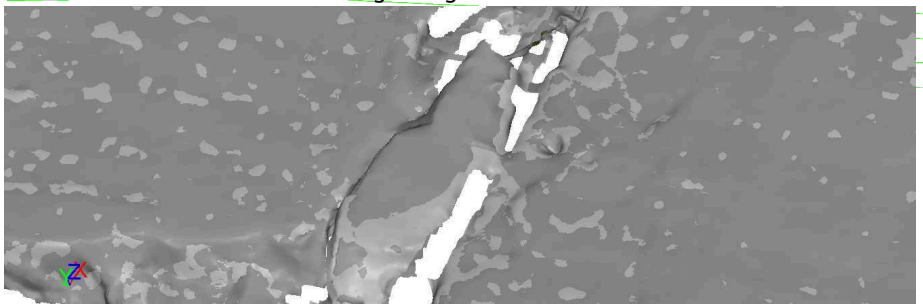
Oberflächenverformungen mit einhergehender Schüsselbildung

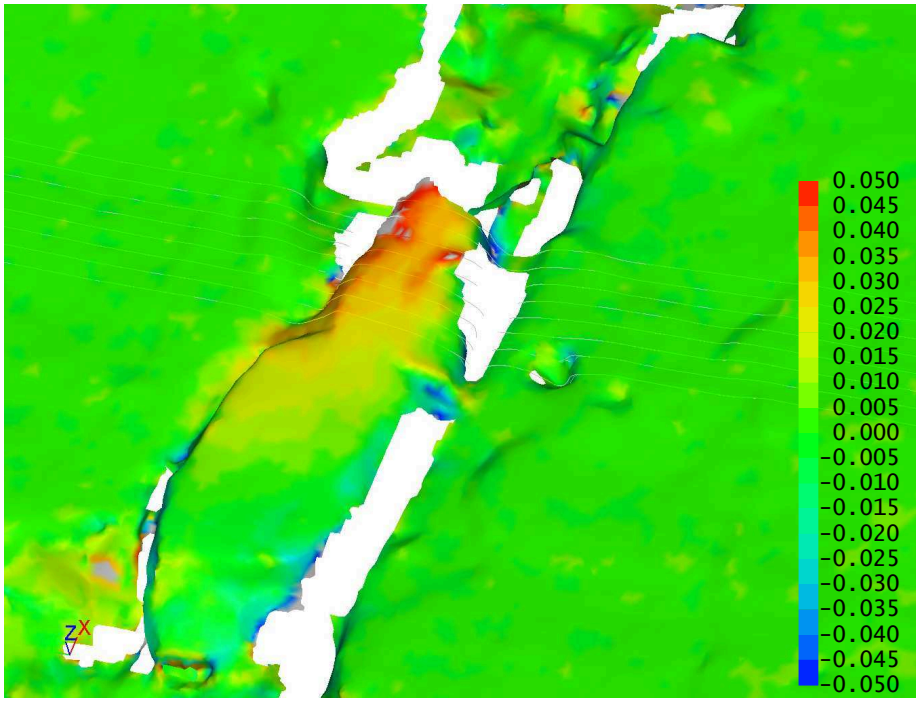
594 Vergleiche: V_117, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_571 bei 55,3 %RH / Ist-Daten: M_572 bei 58,9 %RH, Konditionierung: Δ3,6 %RH). Protokollseite 4

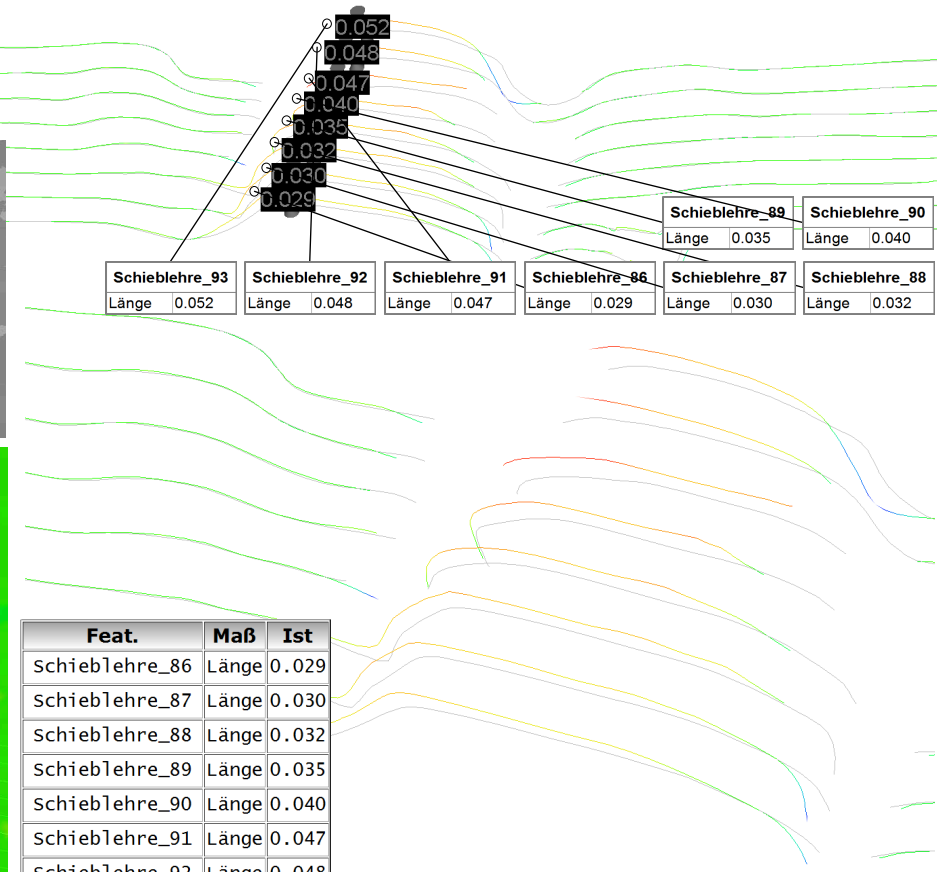
595 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges weist das beschriebene Veränderungsmerkmal, seinem Spezifikum nach, Grundzüge des Schadensbildes Scholle (Kategorie 21) auf.

596 Vergleiche: V_118, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_572 bei 58,9 %RH / Ist-Daten: M_573 bei 63,3 %RH, Konditionierung: Δ4,4 %RH). Protokollseite 2

Die Überlagerung des Ist- mit dem Soll-Datensatz offenbart signifikante, lokal begrenzte Abeichungen. Wie hier gezeigt ist im Rissbereich der Rückschluss auf eine Scholle des Bildschichtengefüges möglich, welche nur noch eine teilweise vorhandene Haftung zum Bildträger aufweist. Das orange-rot hervorgehobene Areal kennzeichnet sich durch eine Delamination und hat sich in Z-Richtung aufgeworfen.







Feat.	Maß	Ist
Schieblehre_86	Länge	0.029
Schieblehre_87	Länge	0.030
Schieblehre_88	Länge	0.032
Schieblehre_89	Länge	0.035
Schieblehre_90	Länge	0.040
Schieblehre_91	Länge	0.047
Schieblehre_92	Länge	0.048
Schieblehre_93	Länge	0.052

Mittelwert der Messschieber: 0,039 mm



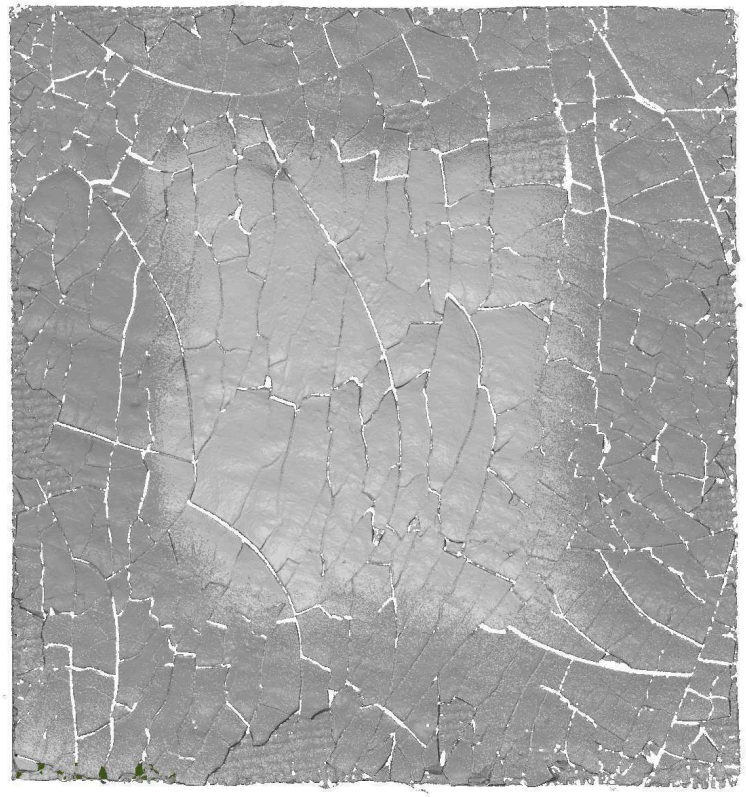
Objekt: RO_001 Benennung: Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 13.08.2014
3D_artscan	Seite 4 von 4

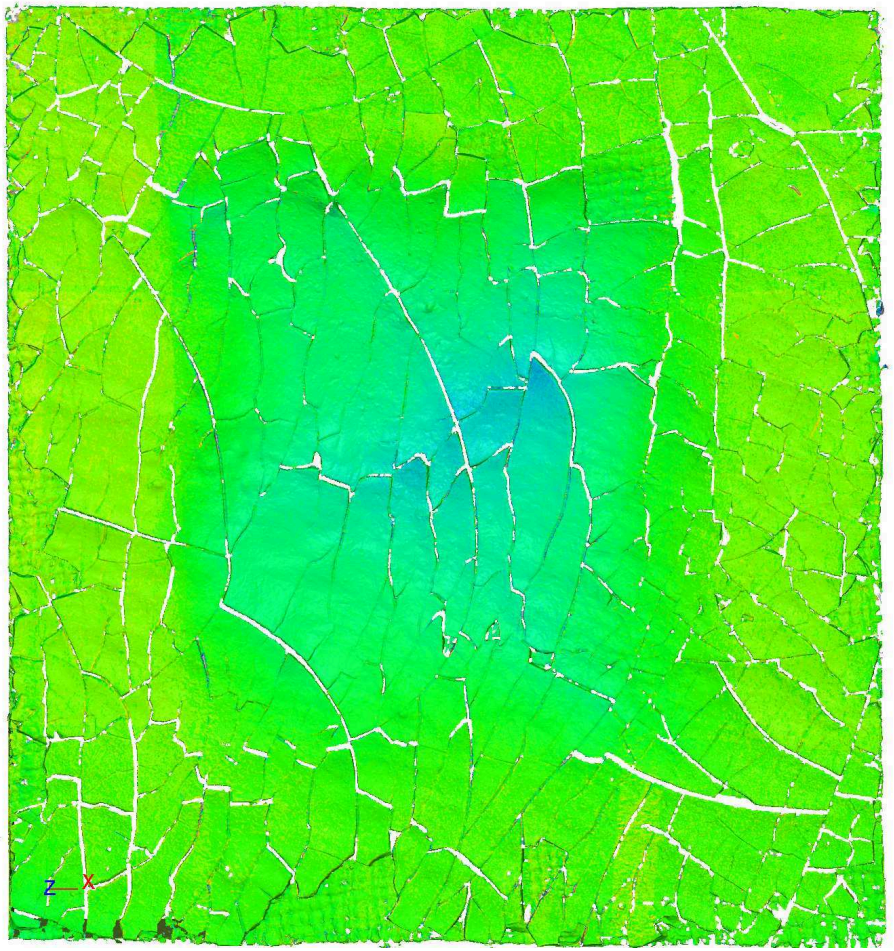
Abb. 186| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_117 ('RO_001') zur Bildgebung und Quantifizierung von Schollenbewegungen – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung, Serienschnittlinien und virtuellen Messschieber.
Quelle: Selbst

Die eben beschriebenen Veränderungsmerkmale können über die Experimente am Untersuchungsgegenstand 'RO_032' verifiziert werden. Weiter offenbaren die 3D-Modell nach ihrer Überlagerung bereits bei der 'Viewer-Ansicht' deutliche Abweichungen. Diese lassen auf eine globale Bewegung des Bildschichtengefüges, bzw. auf Verformungen rückschließen (►Abb. 187| und Abb. 188|).[597,598] Eine Bestätigung erfolgt über die Falschfarbendarstellung. Ausgenommen jenes Bereiches des Bildschichtengefüges, der von den rückseitigen Rahmenschenkeln verdeckt wird, besteht zur Mitte des Realobjektes hin eine Topografieveränderung in negative Normalenrichtung. Vergleichbar ist das beschriebene Merkmal mit einer globalen Wölbung, ähnlich einer Dellenbildung. Über die Farbcodierung kann die Veränderung der Ist-Daten gegenüber den Soll-Daten im Maximum mit einer Verformung um bis zu -0,080 mm quantifiziert werden. Fernerhin belegt die Bildgebung eine ausgeprägte Schüsselbildung des Bildschichtengefüges. Hierbei zeigt die Falschfarbendarstellung, dass die Verformung der Schollen zu ihrem Randbereich hin tendenziell zunimmt und demnach dort eine gesteigerte Sensitivität gegenüber Feuchteschwankungen besteht. Die Schollen in der Mitte sind besonders aussagekräftig. Die Veränderung steht im Zusammenhang zur klimatischen Belastung durch die geringfügige Befeuchtung von 3,6 %RH. Ebenso ist daraufhin zuweisen, dass das Bildschichtengefüge, aufgrund der ausgeprägten Schollenbildung, als sehr empfindlich eingestuft wird – ein Gesichtspunkt, der bei der Beurteilung kausaler Aspekte mit zu berücksichtigen ist.

597 Vergleiche: V_123, .RO_032' (Soll-Daten: M_579 bei 55,3 %RH / Ist-Daten: M_580 bei 58,9 %RH, Konditionierung: Δ3,6 %RH). Protokollseite 2 f.

598 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich prinzipiell um Topografieveränderung, was gemäß der eigenen Definition einer Grundschadensart entspricht. Darüber hinaus gibt es Mehrfachübereinstimmungen mit Merkmalen des Schadenskataloges. Unter vorhandenen Einschränkungen sind diese: Dellenbildung (Kategorie 9) Dachförmig aufstehende Malschichten, Abblättern der Malschichten (Kategorie 8), aber auch Schollen- (Kategorie 21) und Schüsselbildung (Kategorie 22).





Standard-Abweichung: 0.0463076
Mittlere Abweichung: -0.0001782
Kleinste Abweichung: -4.7022730
Größte Abweichung: 4.4666749

==========
Bewegte Objekte:
==========

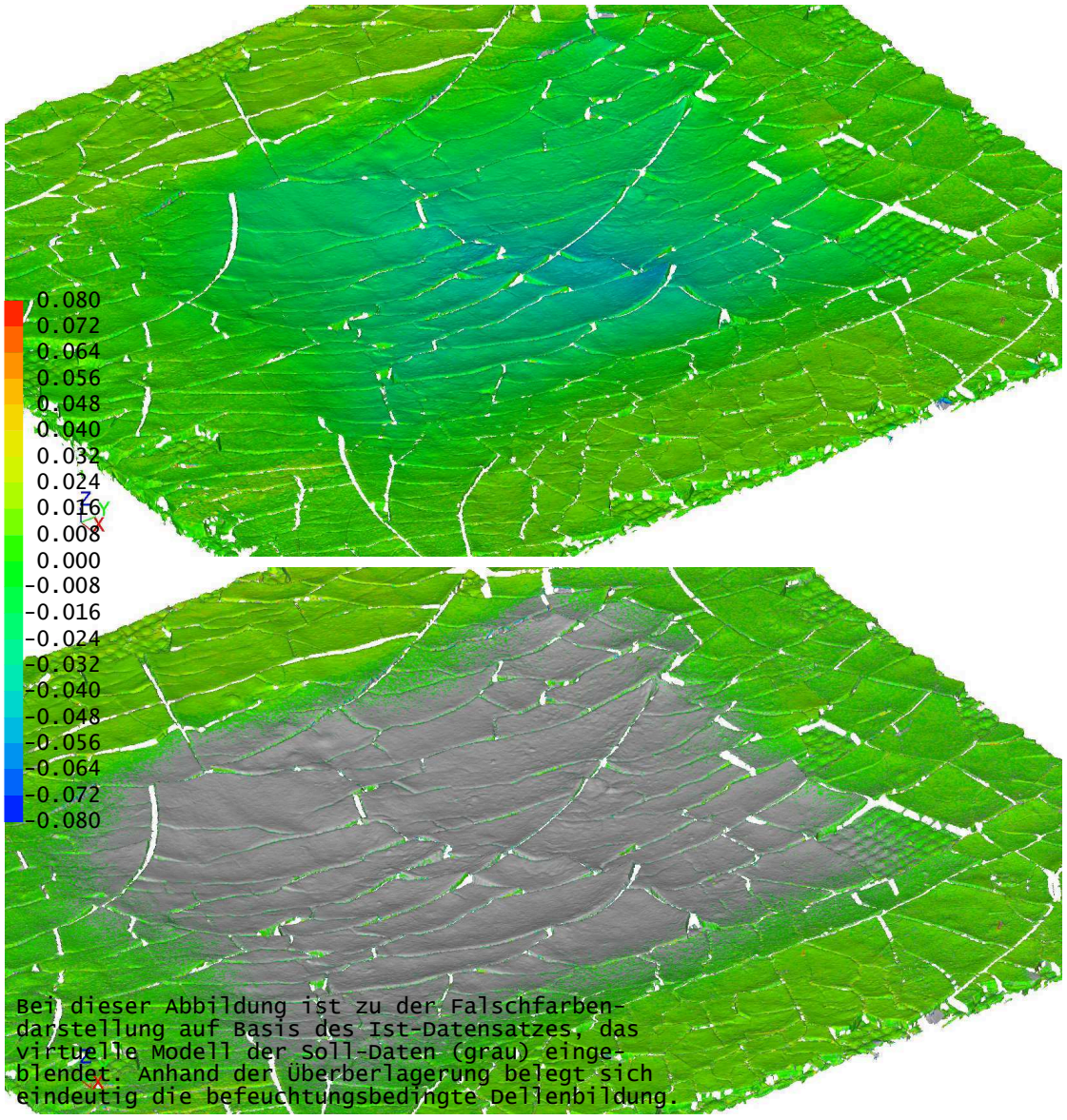
V13_RO001-009-032_140813_553RFNATRIUMBROMD

RO_032 bei 55,3 %RH (Soll-Daten)

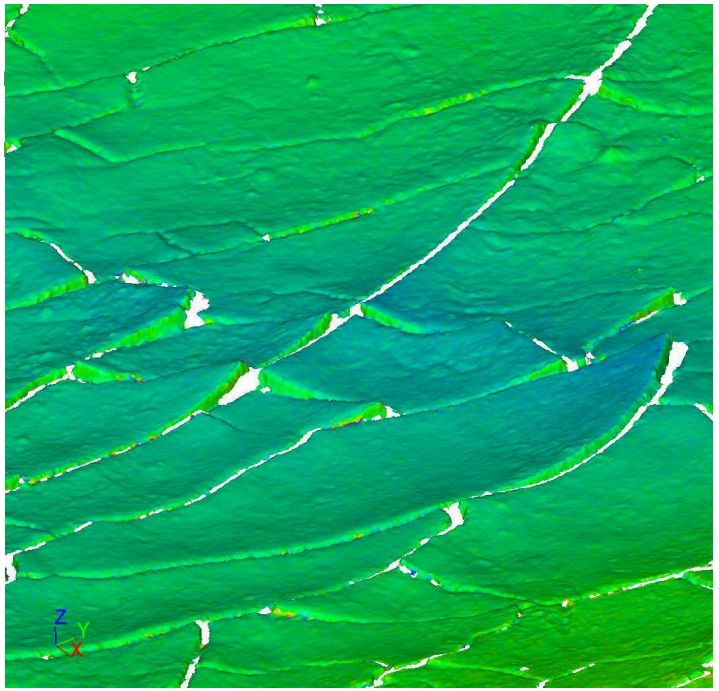
RO_032 bei 58,9 %RH (Ist-Daten)

Objekt: RO_032 Benennung: Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 13.08.2014
3D_artscan	Seite 2 von 3

Abb. 187| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_123 ('RO_032') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Verformung des Bildschichtengefüges – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und die Falschfarbendarstellung. Quelle: Selbst



Die Befeuchtung von 3,6 %RH hat zu einer globalen Verformung des Bildschichtengefüges geführt. Über die Falschfarbendarstellung und die grün-blaue Verfärbung lässt sich eine dellenförmige Wölbung des Bildträgers belegen. In der Mitte des Real-objektes ist diese am ausgeprägtesten. Zudem weisen die einzelnen Schollen des Bildschichten-gefüges jeweils eine gesteigerte Verformung zu ihren Rändern hin auf. Der von den Rahmenschenkeln verdeckte Bereich zeigt hingegen keine signi-fikante Veränderung der Bildschichten.



Objekt:	RO_032	
Benennung:	Hygroskopizität: 55,3 %RH - 58,9 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.08.2014
3D_artscan		Seite 3 von 3

Abb. 188| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_123 ('RO_032') zur Bild-gebung und Quantifizierung einer Verformung des Bildschichtengefüges – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und die Falschfarbendarstellung. Quelle: Selbst

Schollenbewegung und Keilrahmensprung

In einem weiterführenden Experiment wird der bereits zuvor verwendete Untersuchungsgegenstand hinsichtlich der Auswirkung einer erneuten, leichten Befeuchtung mit dem 'COMET-System' untersucht.[599] Die Farbcodierung zeigt, einerseits, wie erwartet, eine globale Verformung des Bildschichtengefüges und andererseits, dass sich einzelne Schollen signifikant aus dem Gesamtverbund des Bildschichtengefüges hervorheben – kenntlich an der orange-roten Farbe (►Abb. 189| und Abb. 190|).[600] Abermals ermöglicht hier die Auswertungsmethode den Rückschluss auf gelockerte Schollen, die in Form von Aufwerfungen besonders klimasensitiv reagieren. Eine Überprüfung am Original bestätigt, dass es sich um Schollen handelt, die lediglich einen partiellen Haftungspunkt am Bildträger aufwiesen. Die Sichtprüfung im Vorfeld lieferte hierüber keine Anhaltspunkte.
Anhand der Falschfarbendarstellung bestehen Rückschlüsse über weitere Veränderungen. Zum einen ist hier die Ablagerung von Staub anzuführen.[601,602] Die Verschmutzung äußert sich über die Farbcodierung in einer lokal begrenzten, linear auftretenden Soll-Ist-Abweichung in positive Normalenrichtung (►Abb. 190|). Zum anderen zeigt sich eine gesteigerte Klimasensibilität entlang vor Rissstrukturen im Bildschichtengefüge. Vorrangig weisen diese einen kantenparallelen Verlauf zu den rückseitigen Rahmenschenkeln auf (►Abb. 191|).[603,604] Abermals erlaubt hierorts die Farbcodierung Rückschlüsse auf ausgeprägtere Veränderungen in der Bildmitte, die mit dem leichten Anstieg der relativen Feuchte (Δ4,4 %RH) korrelieren. Der von den Rahmenschenkeln verdeckte Bereich des Bildschichtengefüges lässt hingegen bei den beiden zuletzt genannten Versuchen (V_123 und V_124) keinen Rückschluss auf etwaige Veränderungen zu. Grundsätzlich kann mit den beiden Experimenten gezeigt werden, dass rekurrierend auf den Schadenskatalog Hinweise auf lokal begrenzte, erhöhte Belastungen in der ungeschützten Bildmitte bestehen. Diese können letztlich auch zur Erklärung der Schadensenstehung von Keilrahmensprüngen dienen. Weiter ist relevant, dass es für die bei V_124 nachgewiesenen Aufwerfungen der zwei Schollen im vorhergehenden Experiment, V_123, keinen bildgebenden Beleg gibt. Anzunehmen ist daher, dass die kumulative Belastung durch Befeuchtung zur nachgewiesenen Objektveränderung führte. Konkret ist damit der gemeinhin in der Konservierung als unkritisch geltende Bereich der mittleren Feuchte gemeint – über die Etappen 55,3 – 58,9

599 Vergleiche: V_124, .RO_032' (Soll-Daten: M_580 bei 58,9 %RH / Ist-Daten: M_581 bei 63,3 %RH, Konditionierung: Δ4,4 %RH). Protokollseite 1 ff..

600 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Schollen (Kategorie 21).

601 Vergleiche: V_124, .RO_032' (Soll-Daten: M_580 bei 58,9 %RH / Ist-Daten: M_581 bei 63,3 %RH, Konditionierung: Δ4,4 %RH). Protokollseite 2

602 Im Abgleich mit der Klassifikation im Schadenskatalog besteht keine direkte Merkmalsübereinstimmung. Vielmehr entspricht die Objektveränderung der Grundschadensart: Verschmutzung.

603 Vergleiche: V_124, .RO_032' (Soll-Daten: M_580 bei 58,9 %RH / Ist-Daten: M_581 bei 63,3 %RH, Konditionierung: Δ4,4 %RH).

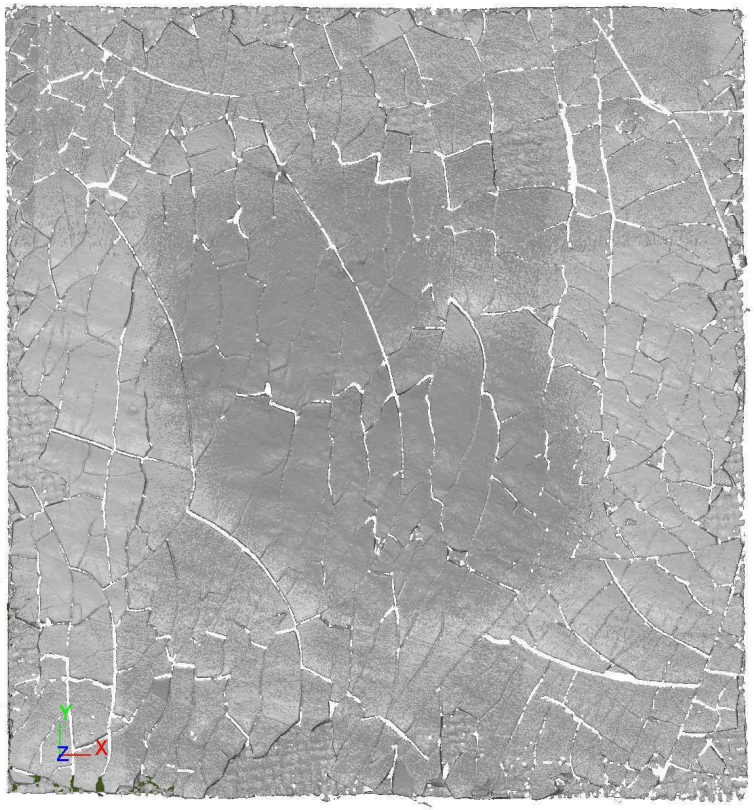
604 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Keilrahmensprung (Kategorie 13).

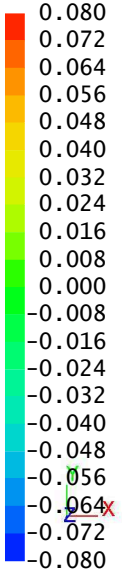
– 63,3 %RH. In beiden Fällen liegt der Anstieg der relativen Feuchte unter den akzeptierten 5 %RH. Auch wenn die Konditionierung des Untersuchungsgegenstandes mit größter Vorsicht durchgeführt wurde, ist jedoch auch eine mechanische Belastung kategorisch nicht auszuschließen – sie wird jedoch als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt.

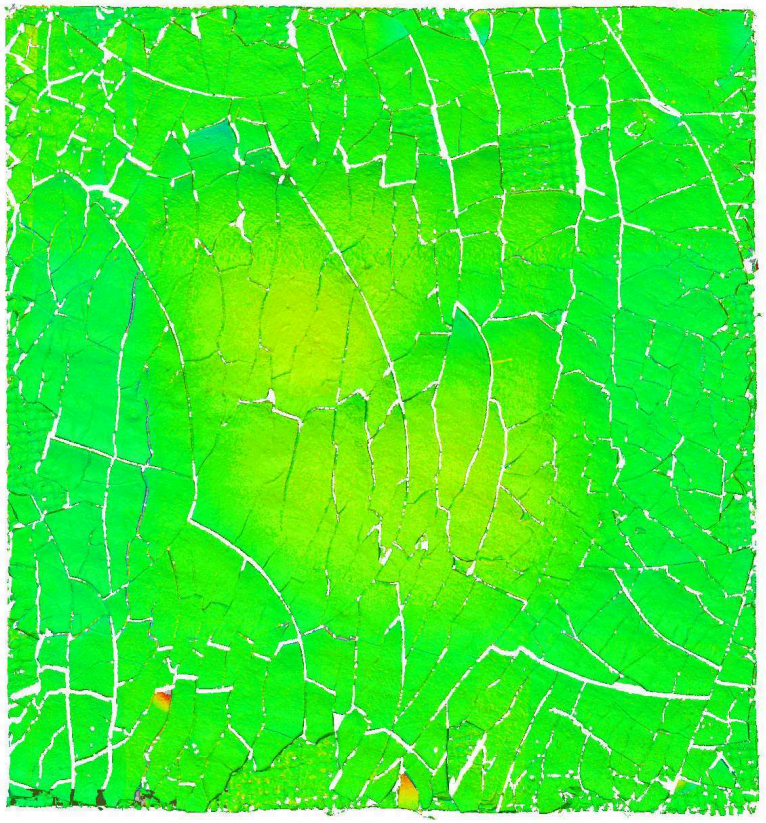
In einem ergänzenden Experiment V_125, kann hinsichtlich der Reaktion des Objektes bei Klimaschwankungen, dem Grundsatz nach ein Objektverhalten vice versa belegt werden.[605] So kennzeichnet sich das oben aufgeführte Experiment V_123 bei Befeuchtung (Δ3,6 %RH) durch Bewegungen des Bildschichtengefüge in negative Normalenrichtung (-0,080 mm). Bei V_125, und vorhandener moderater Trocknung (Δ9,0 %RH), ist beim Soll-Ist-Vergleich eine gegenteilige Veränderung in positive Normalenrichtung (0,075 mm) zu verzeichnen (►Abb. 192| und Abb. 193|).

605 Vergleiche: V_125, ‚RO_032' (Soll-Daten: M_581 bei 63,3 %RH / Ist-Daten: M_582 bei 54,3 %RH, Konditionierung: Δ9,0 %RH). Protokollseite 1 f.

Versuch: V_124
RO_032 bei 58,9 %RH (M_580) / 63,3 %RH (M_581)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 4,4 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Natriumbromid / Ammoniumnitrat







RO_032 bei 58,9 %RH (Soll-Daten)

RO_032 bei 63,3 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	RO_032	
Benennung:	Hygroskopizität: 58,9 %RH - 63,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 3

Abb. 189| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_124 ('RO_032') zur Bildgebung und Quantifizierung einer Verformung des Bildschichtengefüges, mit einhergehender, lokaler Schollenbewegung – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

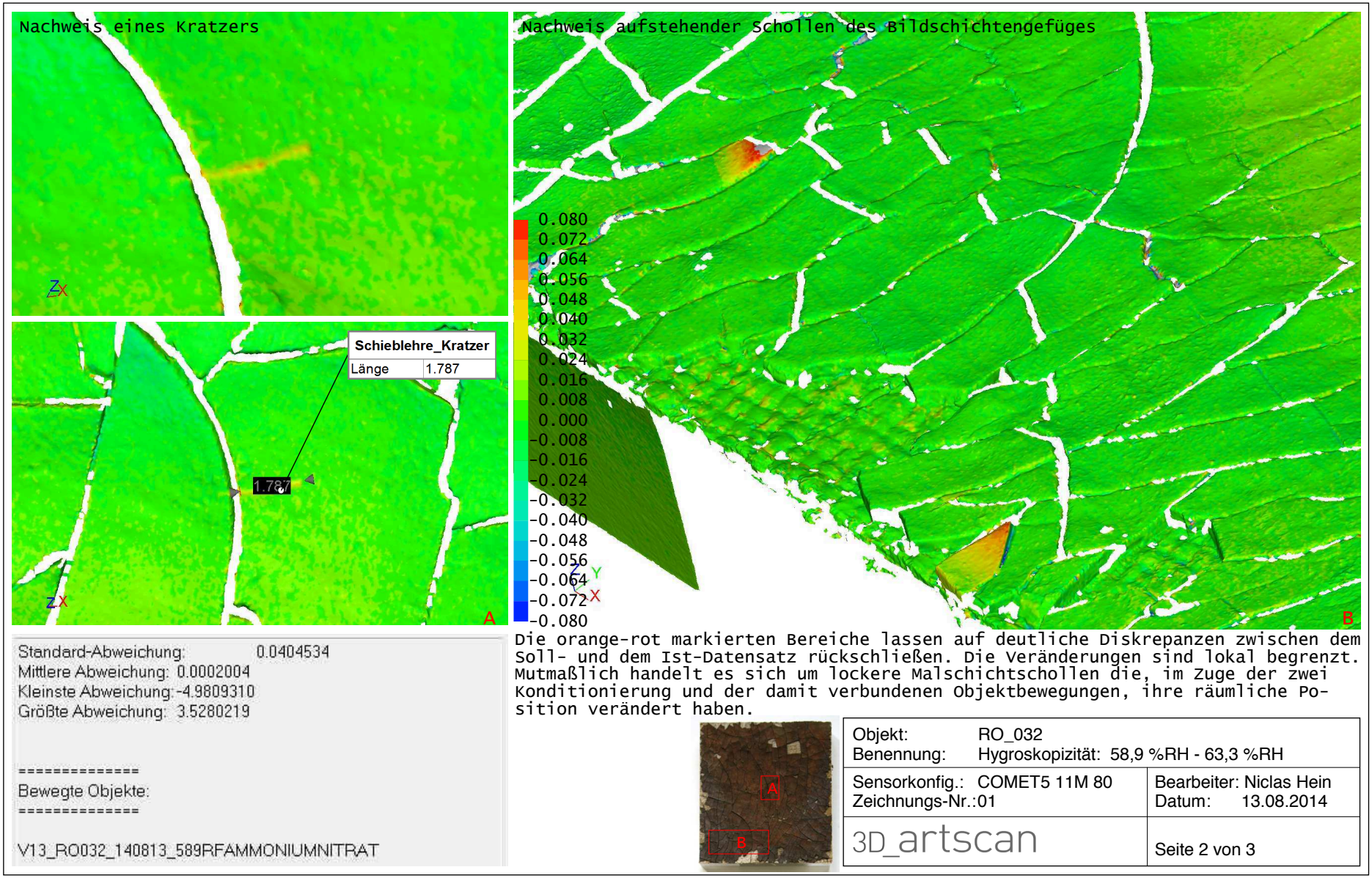
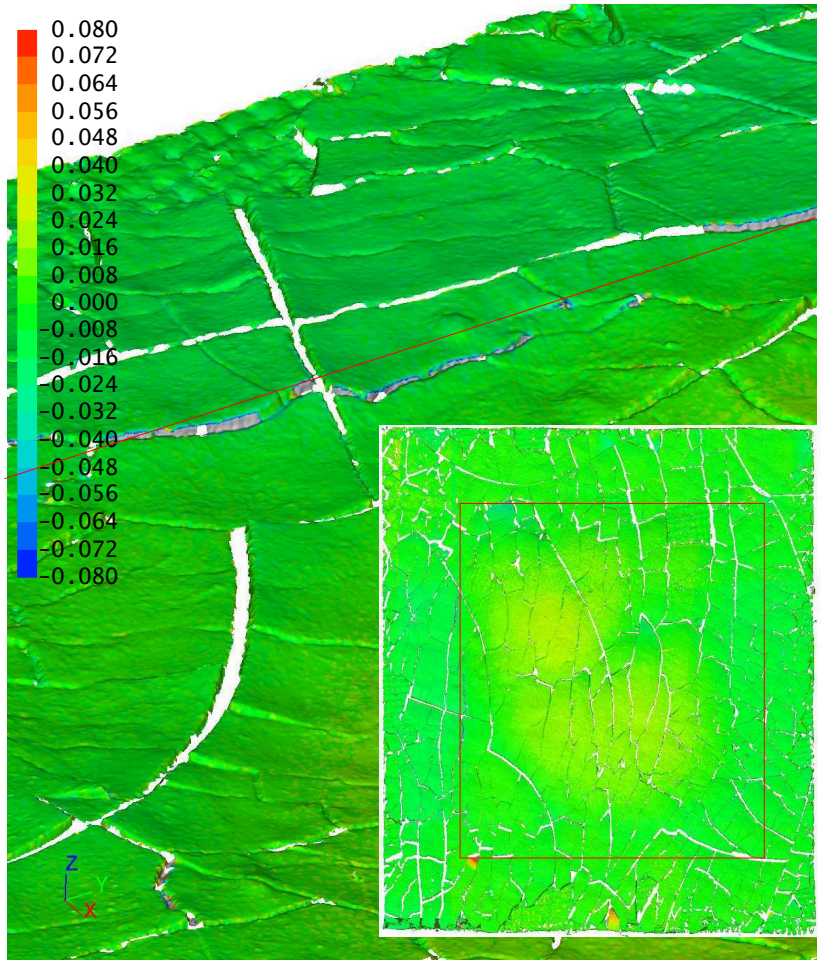
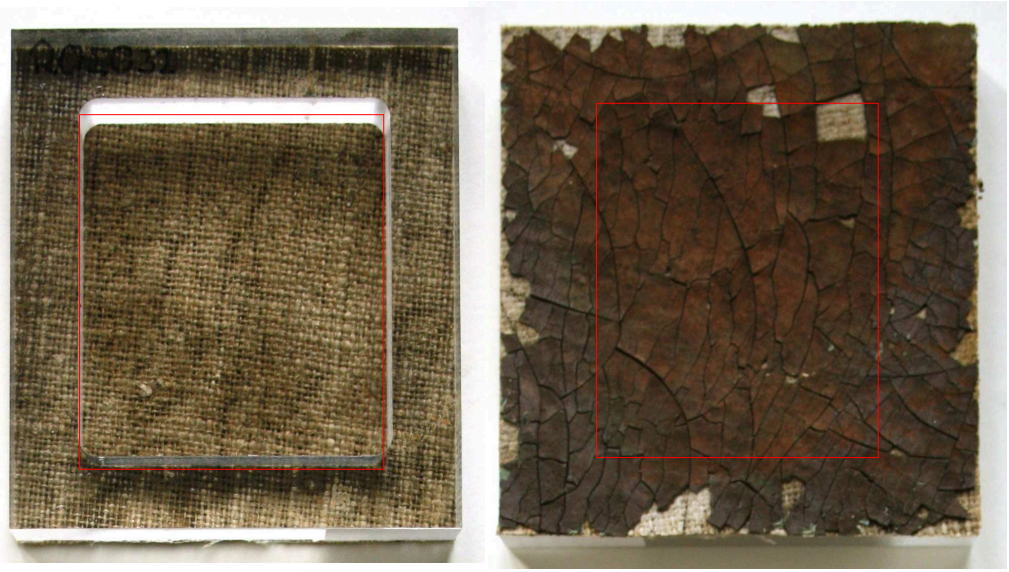


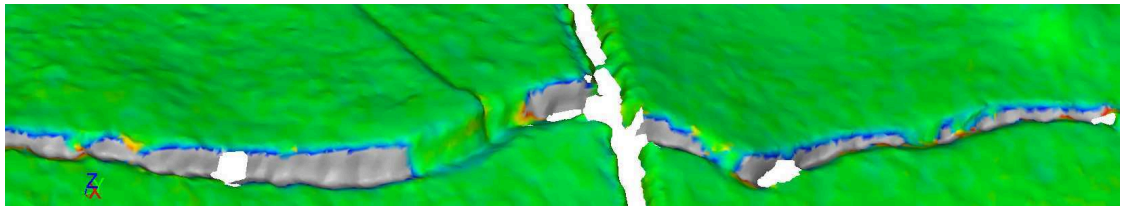
Abb. 190| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_124 ('RO_032') zur Bildgebung und Quantifizierung lokaler Schollenbewegungen, sowie einer Verschmutzung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst



Nachweis globaler Wölbung des Schichtenverbund

Die Versuche 'V_123', 'V_124' und auch der folgende Versuch 'V_125' belegen den Zusammenhang zwischen der Dellenbildung und dem maltechnischen Aufbau des Untersuchungsgegenstandes. Die Form des Acrylglasrahmens hat nachweislichen Einfluss auf die Merkmalsausprägung der Veränderung. So ist entlang des Übergangs von jenem Bereich des Schichtenverbundes der auf dem Acrylglasrahmen fixiert ist, hin zur freien Bildträgerrückseite die Reaktion auf eine Veränderung des Klimas besonders augenscheinlich. Wie nebenstehend abgebildet ist dort eine signifikante Veränderungen des Craquelé festzustellen.



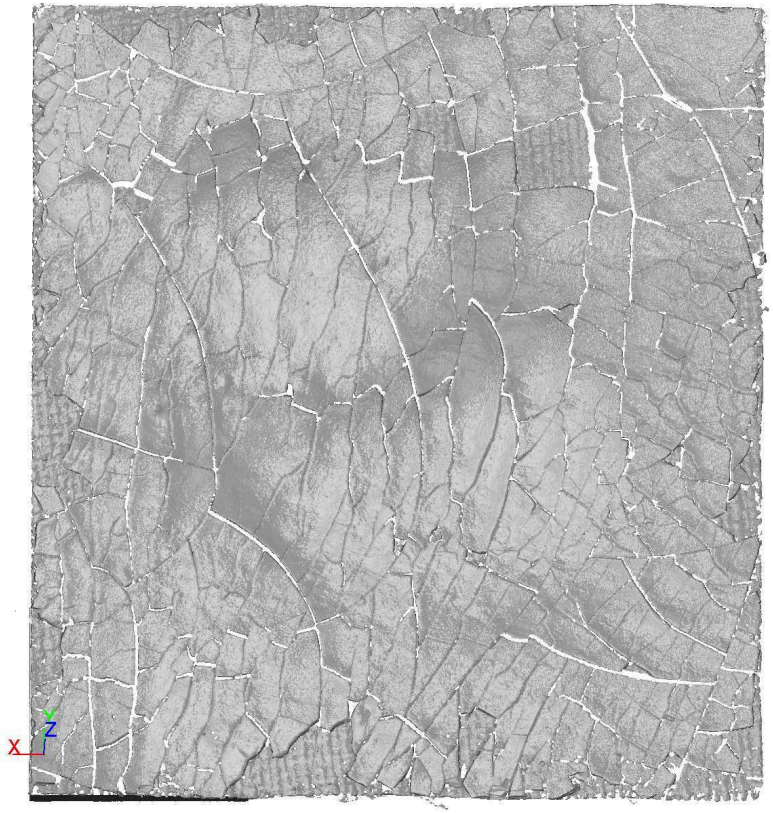


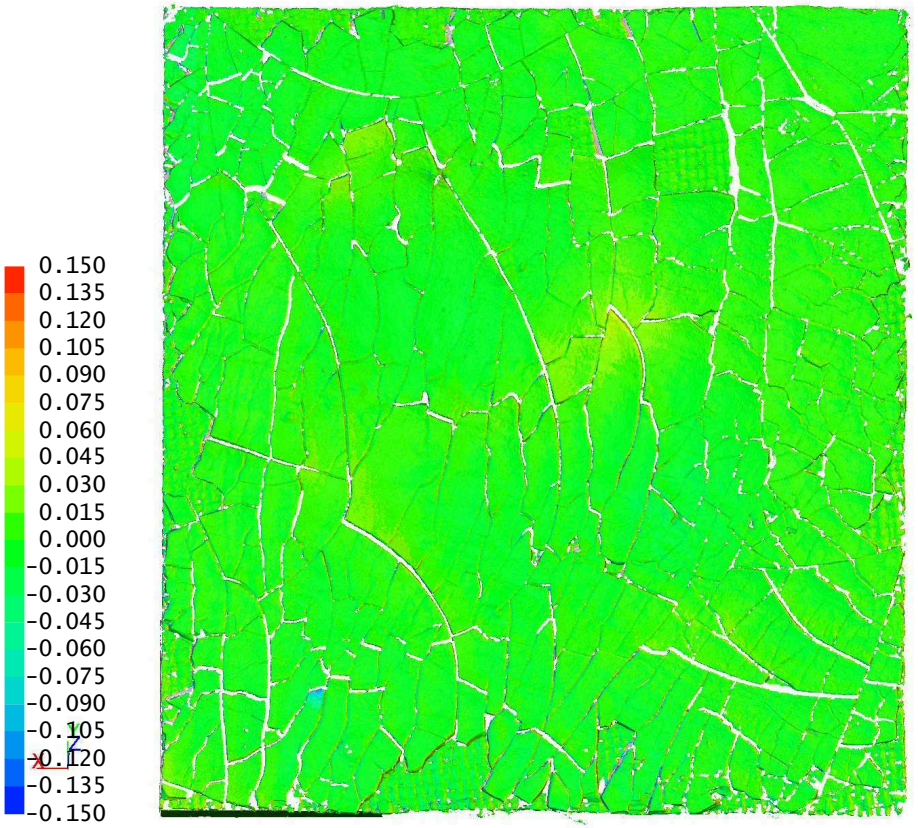
Objekt:	RO_032	
Benennung:	Hygroskopizität: 58,9 %RH - 63,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 13.08.2014
3D_artscan		Seite 3 von 3

Abb. 191| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_124 ('RO_032') zur Bildgebung eines Keilrahmensprungs – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung, im Abgleich mit einem Tageslichtfoto von Vorder- und Rückseite.
Quelle: Selbst

Versuch: V_125
RO_032 bei 63,3 %RH (M_581) / 54,3 %RH (M_582)
Diskrepanz der relativen Feuchte: -9,0 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat

Standard-Abweichung: 0.1354144
Mittlere Abweichung: 0.0024018
Kleinste Abweichung: -4.7060172
Größte Abweichung: 4.9096412





0.150
0.135
0.120
0.105
0.090
0.075
0.060
0.045
0.030
0.015
0.000
-0.015
-0.030
-0.045
-0.060
-0.075
-0.090
-0.105
-0.120
-0.135
-0.150

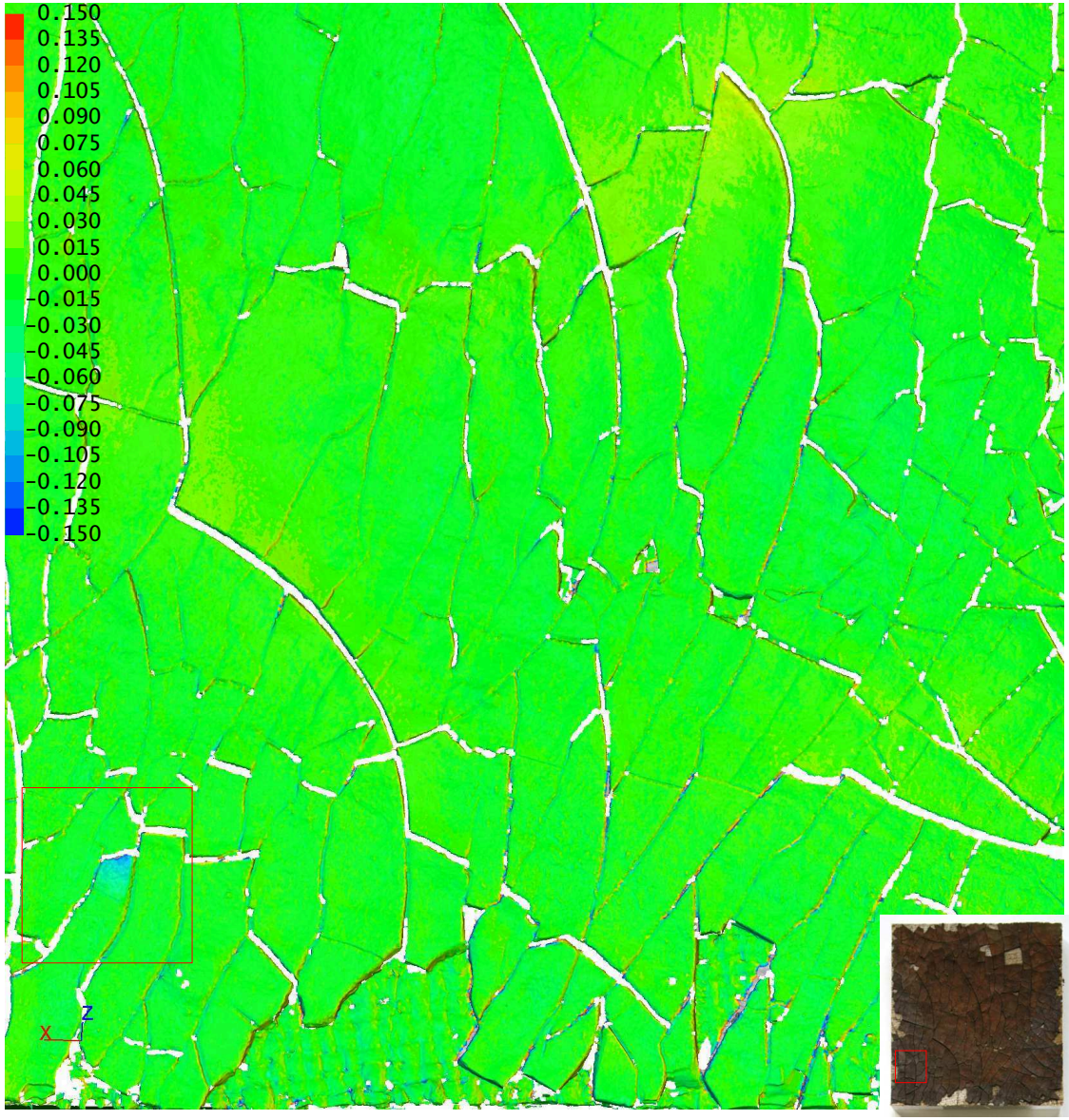
RO_032 bei 63,3 %RH (Soll-Daten)

RO_032 bei 54,3 %RH (Ist-Daten)

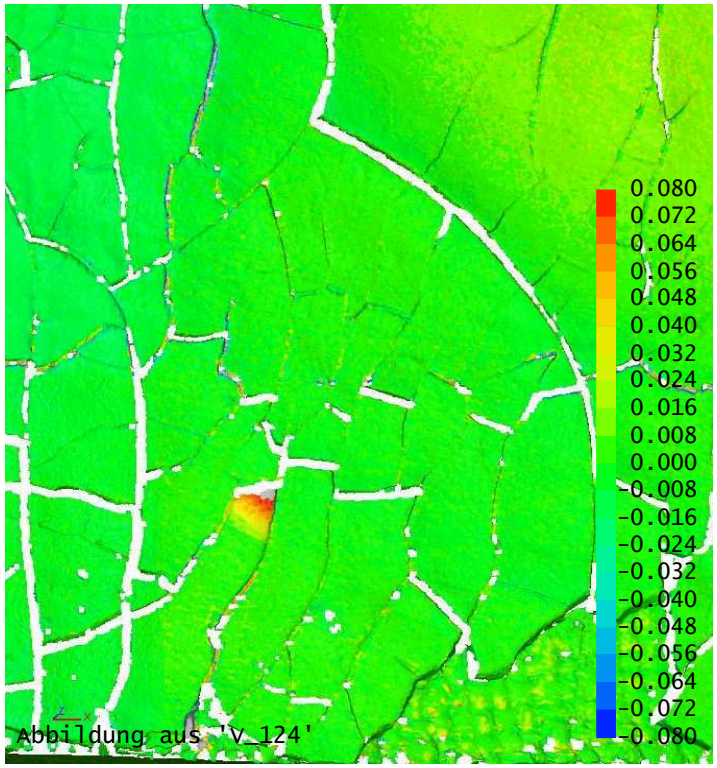
Die beiden gezeigten Abbildungen belegen eine vergleichsweise homogene Veränderung des Realobjektes. Gleichwohl sind die Aufwerfung der Malschichtschollen hin zu ihren Kanten auffällig. Damit besteht ein bildgebender Hinweis auf klimatisch induzierte Verformungen des Bildschichtengefüges.

Objekt: RO_009 Benennung: Hygroskopizität: 63,3 %RH - 54,3 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:03	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 14.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 2

Abb. 192| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_125 ('RO_032') zur Bildgebung der Oberflächenverformung bei moderater Trocknung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst



Analog zum vorherigen Versuch ('V_124') kann die klimatisch bedingte Bewegung der Scholle auch anhand des vorliegenden Versuches nachgewiesen werden. Aufgrund der Trocknung um 9,0 %RH senkt sich die Scholle jedoch um ca. 0,12 mm. Im Vergelich dazu zeigt die untere Abbildung der selben Stelle aus 'V_124' die Aufwerfung durch die Befeuchtung von 4,4 %RH (unten).



Objekt:	RO_009	
Benennung:	Hygroskopizität: 63,3 %RH - 54,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 14.08.2014
3D_artscan		Seite 2 von 2

Abb. 193| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_125 ('RO_032') zur Bildgebung der Schollenbewegung bei moderater Trocknung im Detail – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Oberflächenverformung in Form von Beulen und Dellen

In einer Weiterführung der Experimente kann anhand der Bildgebung von 'RO_033' und der methodischen Auswertung durch den Soll-Ist-Vergleich eine bestehende Diskrepanz zwischen den 3D-Modellen visualisiert werden.[606] Sowohl die 'Viewer-Ansicht', als auch die Falschfarbendarstellung gewähren Aufschluss über eine sich zur Mitte hin steigernde Beulenbildung (►Abb. 194|).[607] Im Maximum besteht eine Topografieveränderung in positive Normalenrichtung mit 0,050 mm. Die Ursache hierfür wird der geringfügigen Befeuchtung um 4,6 %RH zugeschrieben.

Zur Überprüfung einer gegenteiligen Verhaltensweise des Probekörpers 'RO_033' wird in einem darauffolgenden Experiment eine entsprechende Konditionierung in Form einer Trocknung vorgenommen.[608] Hier zeigt sich abermals über die 'Viewer-Ansicht' einerseits und der Falschfarbendarstellung andererseits eine Topografieveränderung (►Abb. 195|). Diese Dellenbildung kann in ihrer maximalen Oberflächenverformung mit -0,090 mm in negative Normalenrichtung quantifiziert werden.[609] Die Ursache für die Topografiveränderung wird der moderaten Trocknung um 9,4 %RH zugeschrieben.

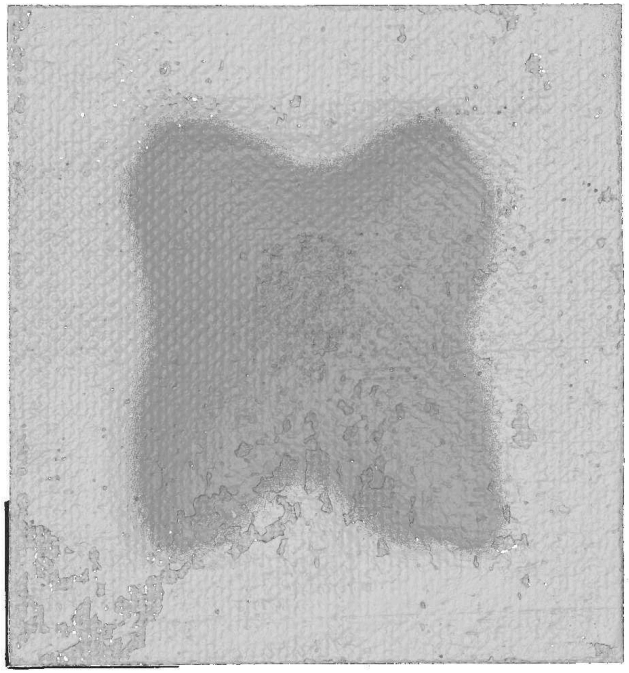
606 Vergleiche: V_127, .RO_033' (Soll-Daten: M_584 bei 59,5 %RH / Ist-Daten: M_585 bei 64,1 %RH, Konditionierung: Δ4,6 %RH). Protokollseite 1

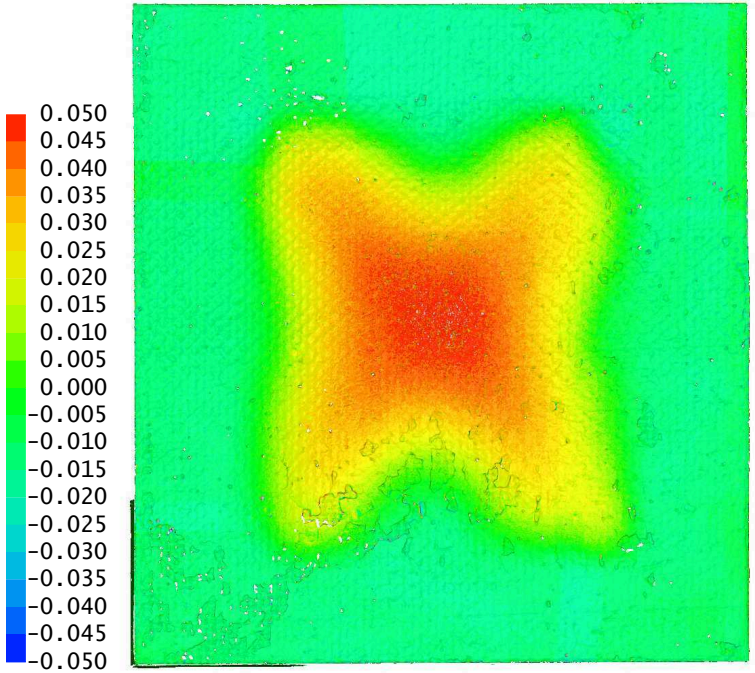
607 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Beule (Kategorie 4).

608 Vergleiche: V_128, .RO_033' (Soll-Daten: M_585 bei 64,1 %RH / Ist-Daten: M_586 bei 54,7 %RH, Konditionierung: Δ9,4 %RH). Protokollseite 1

609 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Delle (Kategorie 9).

Versuch: V_127
RO_033 bei 59,5 %RH (M_584) / 64,1 %RH (M_585)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 4,6 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Natriumbromid / Ammoniumnitrat





Standard-Abweichung: 0.0354753
Mittlere Abweichung: 0.0001591
Kleinste Abweichung: -4.3790208
Größte Abweichung: 4.2850373

==========
Bewegte Objekte:
==========

V13_RO033-038-046_140815_633RFAMMONIUMNITRAT

RO_033 bei 59,5 %RH (Soll-Daten)

RO_033 bei 64,1 %RH (Ist-Daten)

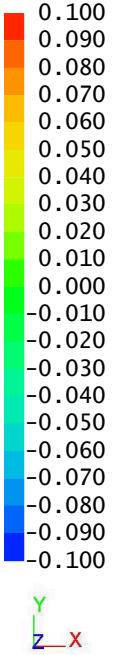
Verformung des Schichtenverbundes aufgrund eines Anstieges der relativen Feuchte. Die Verformung entspricht einer konvexen Beule, wobei der Auflagebereich des Bildträgers auf dem Acryl-glasrahmen davon ausgenommen ist.

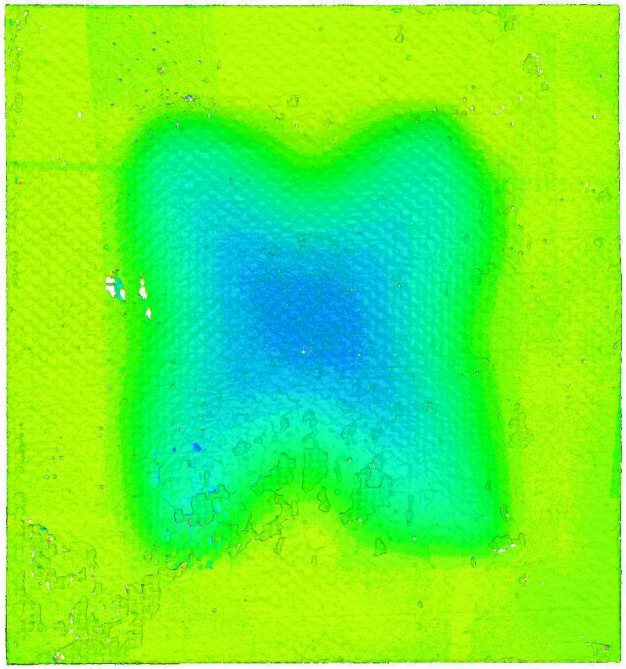
Objekt:	RO_033	
Benennung:	Hygroskopizität: 59,5 %RH - 64,1 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 15.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 1

Abb. 194| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_127 ('RO_033') zur Bildgebung einer Beulenbildung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_128
RO_033 bei 64,1 %RH (M_585) / 54,7 %RH (M_586)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 9,4 %RH (mit induzierter Verschmutzung)
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat







Standard-Abweichung: 0.0464454
Mittlere Abweichung: -0.0002477
Kleinste Abweichung: -4.6325398
Größte Abweichung: 4.3953606

==========
Bewegte Objekte:
==========

V13_RO033-038-046_140816_545RFMAGNESIUMNITRAT

RO_033 bei 64,1 %RH (Soll-Daten)

RO_033 bei 54,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	RO_033	
Benennung:	Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 16.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 195| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_128 ('RO_033') zur Bildgebung einer Dellenbildung – veranschaulicht über die Falschfarben-darstellung.
Quelle: Selbst

Verschmutzungen

Zur weiteren Systemerkundung ist auf dem Realobjekt 'RO_033' eine kleine, schwarze Verschmutzung appliziert worden.[610] Die Verschmutzung ist vom Sensor nicht zu detektieren (►Abb. 196|). Jedoch ist ein Rückschluss auf diese Veränderung möglich, da bei den Ist-Daten, analog zum Umriss der Verschmutzung, Messlücken nachweislich sind.[611] Bei der Falschfarbendarstellung kann demgemäß kein Bezug zwischen den Datensätzen hergestellt werden – der Bereich bleibt entsprechend ungefärbt. Dies verhindert eine weiterführende Auswertung. Einerseits offenbarte sich hierüber die bereits angesprochene Limitierung des Verfahrens bei der Detektion dunkler Oberflächen. Andererseits können diese Informationen, wie auf der beiliegenden Protokollseite gezeigt, durch das Weißlicht-Kamerabild des Sensors über die 2D-Bildgebung berücksichtigt werden.[612]

Bei dem bereits oben erwähnten Realobjekt 'RO_001' wurde im experimentellen Rahmen untersucht, ob ein benutzerseitig aufgetragener, kurzer Kugelschreiberstrich von der Messtechnik nachweisbar ist.[613,614] Dessen Lokalisierung gelingt im Rahmen des Soll-Ist-Vergleiches über die Falschfarbendarstellung, wobei der Strich ebenso am Ist-Datensatz in der 'Viewer-Ansicht' augenscheinlich ist (►Abb. 197| und Abb. 198|). Eine exakte Quantifizierung erfolgt über virtuelle Messschieber: Strichlänge 22,660 mm, Strichbreite 0,237 mm.

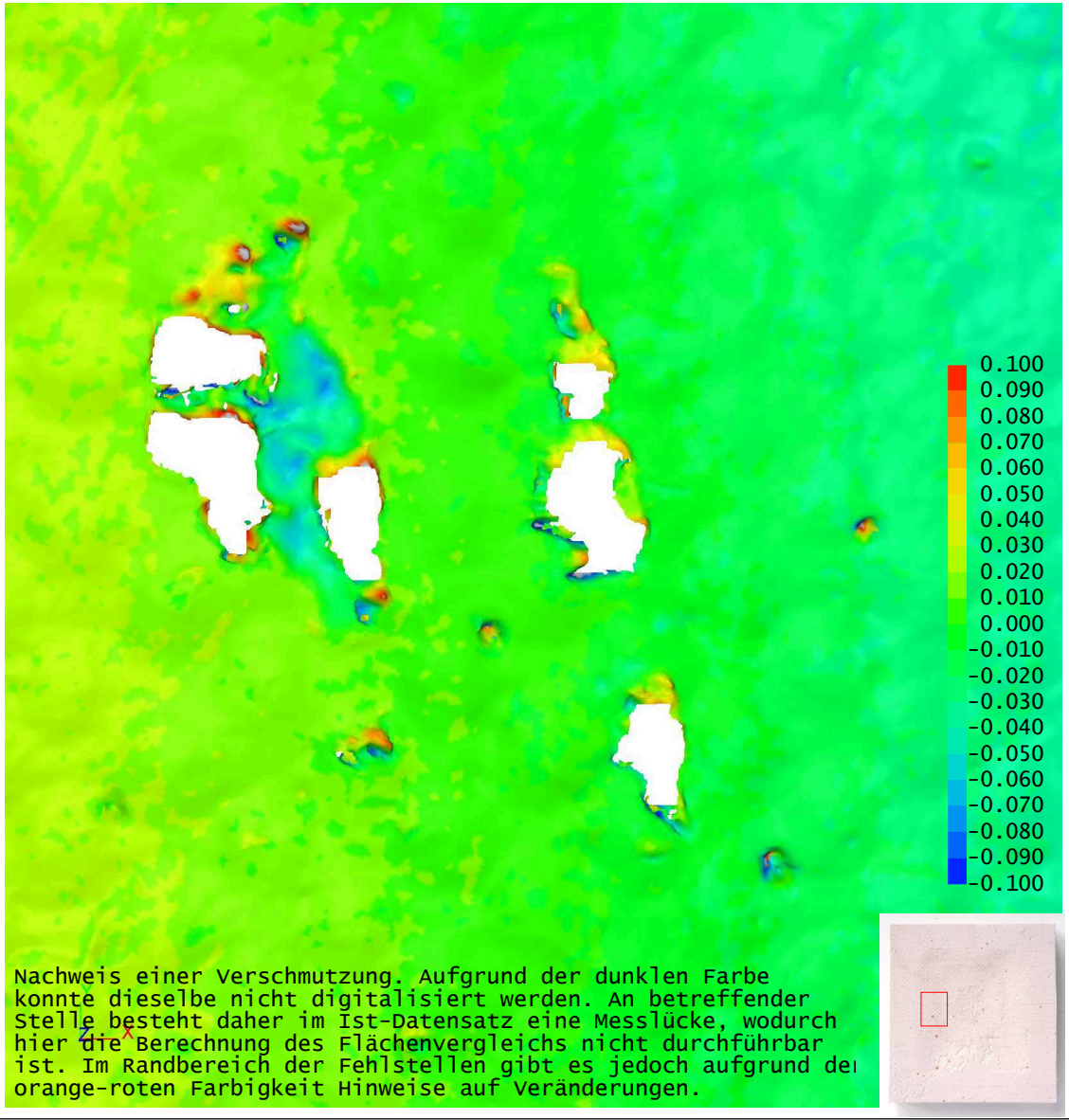
610 Vergleiche: V_128, ‚RO_033' (Soll-Daten: M_585 bei 64,1 %RH / Ist-Daten: M_586 bei 54,7 %RH, Konditionierung: Δ9,4 %RH, Applikation einer kleinen Verschmutzung in Form von schwarzer Schuhcreme). Protokollseite 2.

611 Das Merkmal stimmt mit der Grundschadensart, Kategorie Verschmutzung überein.

612 Vergleiche hierzu den aufgezeigten Lösungsweg in ►Kapitel 16.

613 Vergleiche: V_119, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_573 bei 63,3 %RH / Ist-Daten: M_574 bei 54,3 %RH, Konditionierung: Δ9,0 %RH). Protokollseite 3

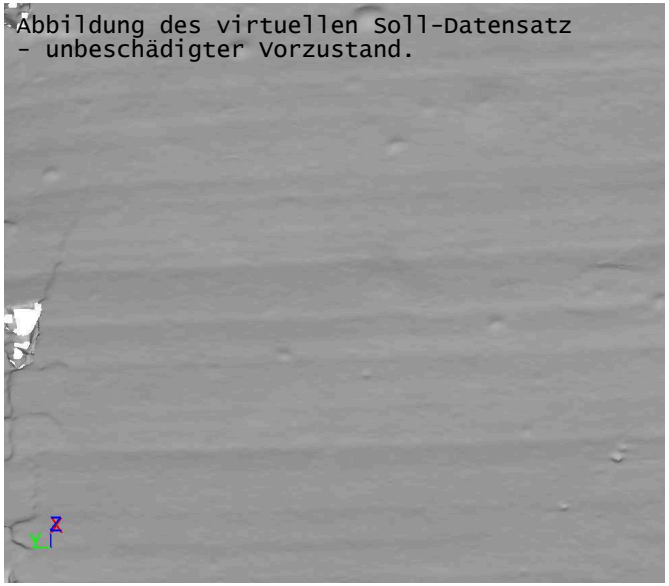
614 Der erstellte Schaden findet seine kategorische Übereinstimmung mit der Grundschadensart, Kategorie: Verschmutzung.

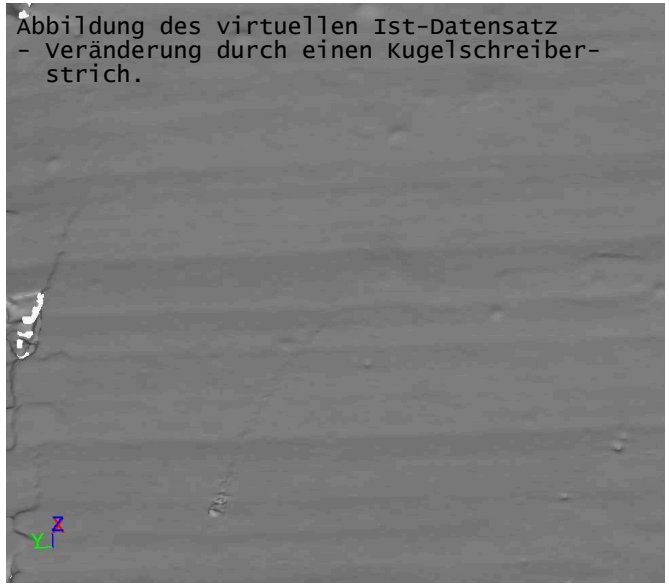


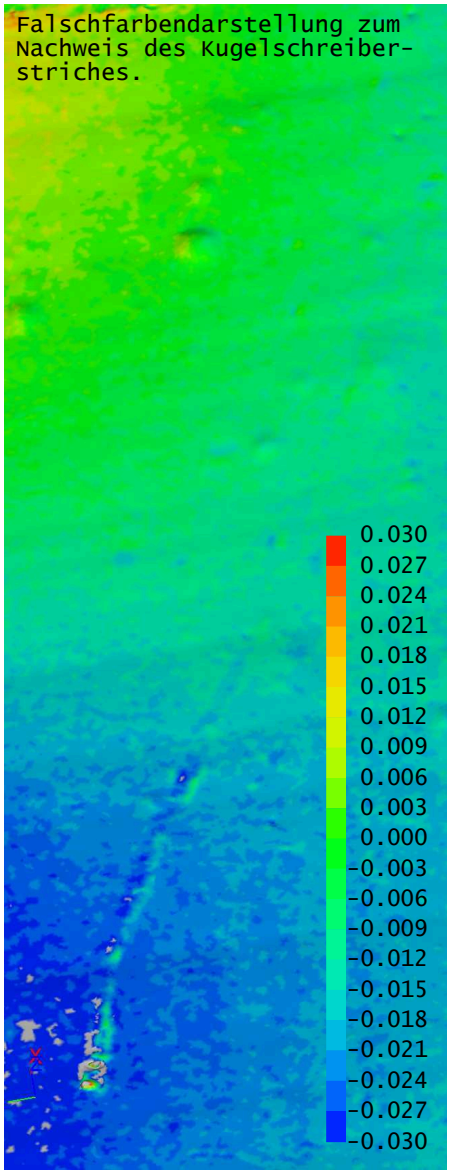


Objekt:	RO_033	
Benennung:	Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 16.08.2014
3D_artscan		Seite 2 von 2

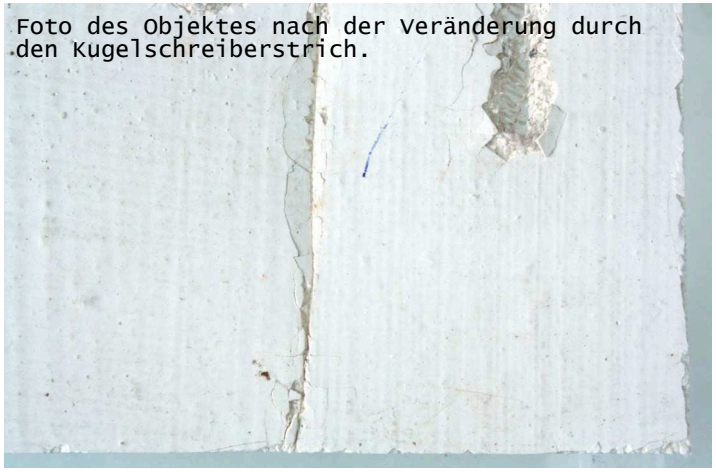
Abb. 196| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_128 ('RO_033') zur Bildgebung einer Verschmutzung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und das Weißlicht-Kamerabild des Sensors.
Quelle: Selbst





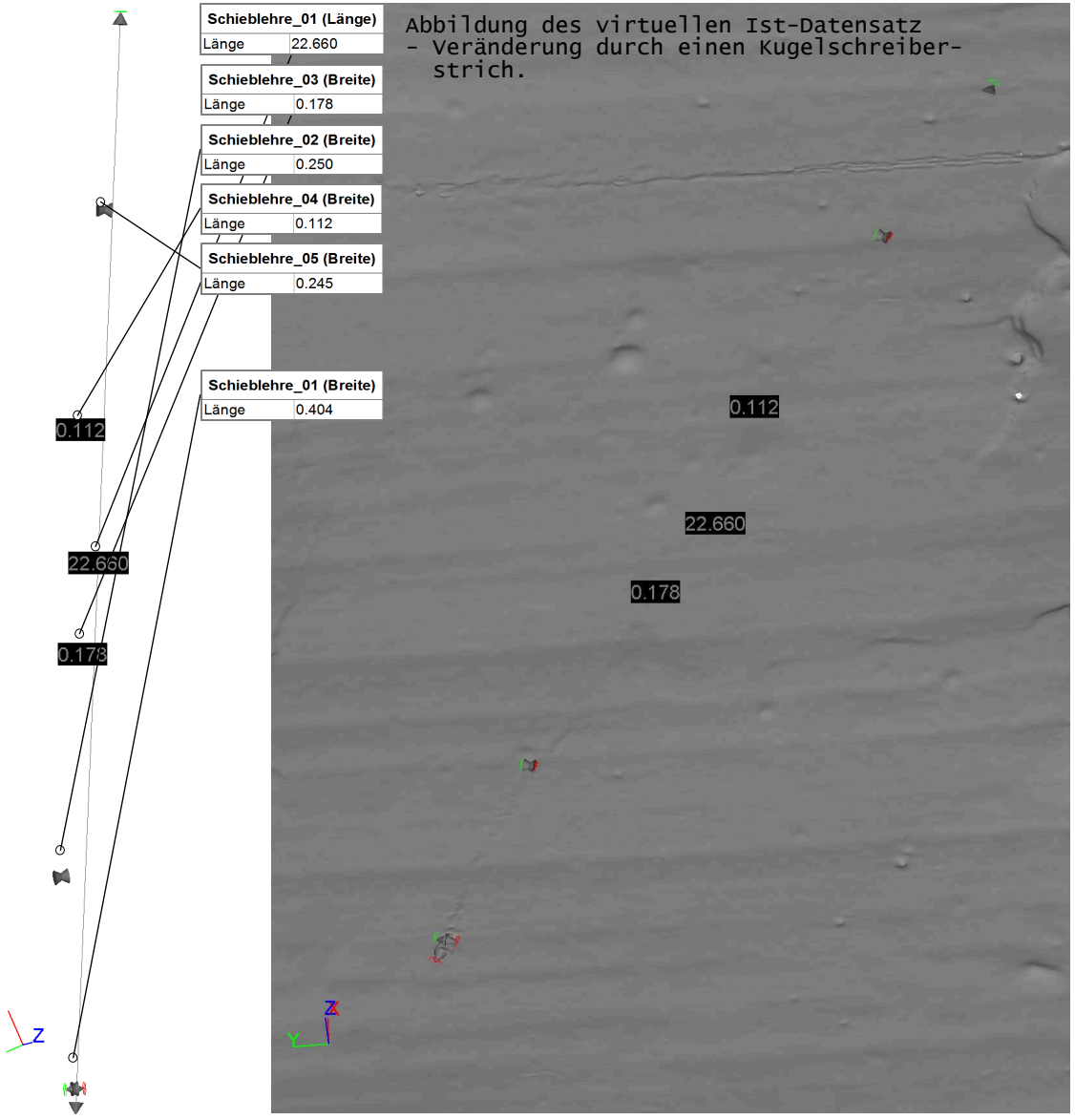






Objekt:	RO_001	
Benennung:	Hygroskopizität: 63,3 %RH - 54,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 14.08.2014
3D_artscan		Seite 3 von 4

Abb. 197| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_119 ('RO_001') zur Bildgebung eines kurzen Kugelschreiberstrichs – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung, die 'Viewer-Ansicht' und Farbfotos.
Quelle: Selbst





Objekt:	RO_001	
Benennung:	Hygroskopizität: 63,3 %RH - 54,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 14.08.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4

Abb. 198| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_119 ('RO_001') zur Bildgebung und Quantifizierung eines kurzen Kugelschreiberstrich – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und vermessen mittels virtueller Messschieber.
Quelle: Selbst

Oberflächenverformungen und Delamination

Weiterhin ist bei 'RO_001' im Laufe der Experimente der Nachweis einer Delamination möglich.[615],[616] Die Falschfarbendarstellung bringt den Beleg einer partiellen Abweichung in Form einer Aufwerfung der oberen rechten Ecke des Bildschichtengefüge in positive Normalenrichtung – im Maximum quantifizierbar mit 0,150 mm (►Abb. 199| und Abb. 200|). Eine Überprüfung am Original zeigt, dass sich die Verklebung zwischen dem textilen Bildträger und dem Acrylglasrahmen gelöst hat. Die Ursachen für die Delamination können vielfältig sein – eine Kombination gilt als wahrscheinlich. Wie bereits oben erwähnt, kann die Möglichkeit eines Objektkontaktes beim Wechsel des Tablares zwischen den Befeuchtungsboxen kategorisch nicht ausgeschlossen werden. Weiterhin kann ebenso die leichte Befeuchtung negative Folgen für den Objektzustand haben. Als sehr wahrscheinlich gilt jedoch eine nachlassende Klebewirkung der 'BEVA-Schicht', die den Acrylglasrahmen mit der Leinwand verbindet.

In der weiteren Folge der Experimente wird, ausgehend vom vorherigen Versuch, eine moderate Trocknung um 9,0 %RH vorgenommen.[617] Der erstellte Soll- Ist-Vergleich und die Falschfarbendarstellung gewähren hier eine Niederlegung des Schichtenverbundes bei gleichzeitiger, lateraler Vergrößerung der Delamination (►Abb. 201|). Rekurrierend auf den zuletzt geschilderten Versuch, lässt die Falschfarbendarstellung dort den Rückschluss auf eine weitere, großflächigere Veränderung zu.[618,619] Mit zunehmender Näherung an den Lochbereich im Bildschichtengefüge ist ein Anstieg desselben in positive Normalenrichtung belegt. Die Ursache für die Topografiveränderung wird hier der moderaten Trocknung um 9,0 %RH zugeschrieben. Auch hier legt das zuletzt geschilderte Ergebnis eine gesteigerte Klimasensibilität des Bildschichtengefüges im Bereich vorhandener Imperfektionen nahe.

615 Vergleiche: V_118, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_572 bei 58,9 %RH / Ist-Daten: M_573 bei 63,3 %RH, Konditionierung: Δ4,4 %RH). Protokollseite 1

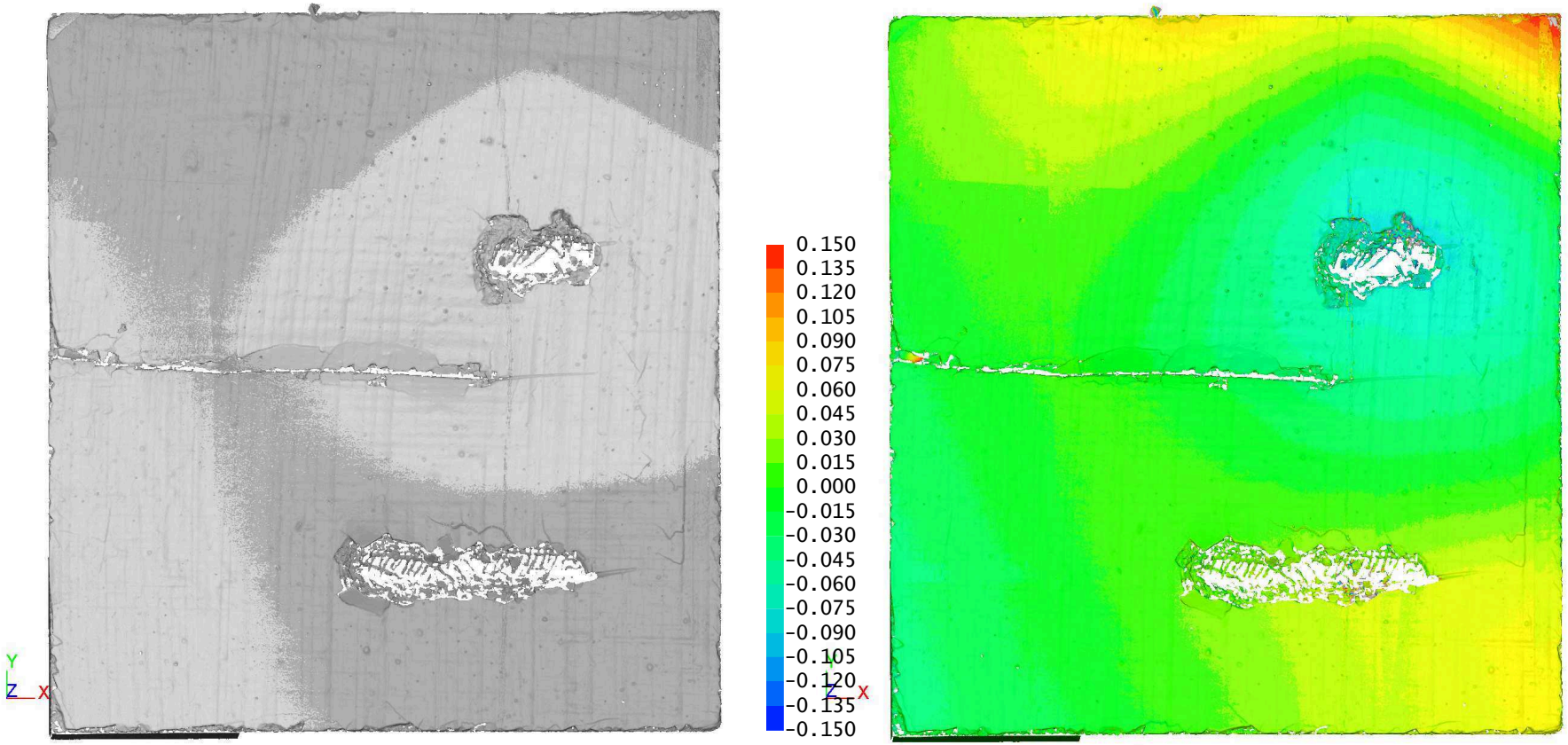
616 Bei der hier beschriebenen Veränderung besteht keine direkte Merkmalsübereinstimmung mit einem Schadensbild des Schadenskataloges. Die Entsprechung findet sich in einer der Grundschadensarten – Kategorie: Schichtentrennung / Delamination.

617 Vergleiche: V_119, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_573 bei 63,3 %RH / Ist-Daten: M_574 bei 54,3 %RH, Konditionierung: Δ9,0 %RH), Protokollseite 1

618 Vergleiche: V_119, ‚RO_001' (Soll-Daten: M_573 bei 63,3 %RH / Ist-Daten: M_574 bei 54,3 %RH, Konditionierung: Δ9,0 %RH), Protokollseite 1

619 Die beschriebene Veränderung findet ihre Übereinstimmung in den Grundschadensarten, Kategorie: Verformung.

Versuch: V_118
RO_001 bei 58,9 %RH (M_572)/ 63,3 %RH (M_573)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 4,43 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Natriumbromid / Ammoniumnitrat



Objekt:	RO_001	
Benennung:	Hygroskopizität: 58,9 %RH - 63,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 13.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 2

Abb. 199| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_118 ('RO_001') zur Bildgebung einer Delamination und eines sich aufwerfenden Bildschichtengefüges – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

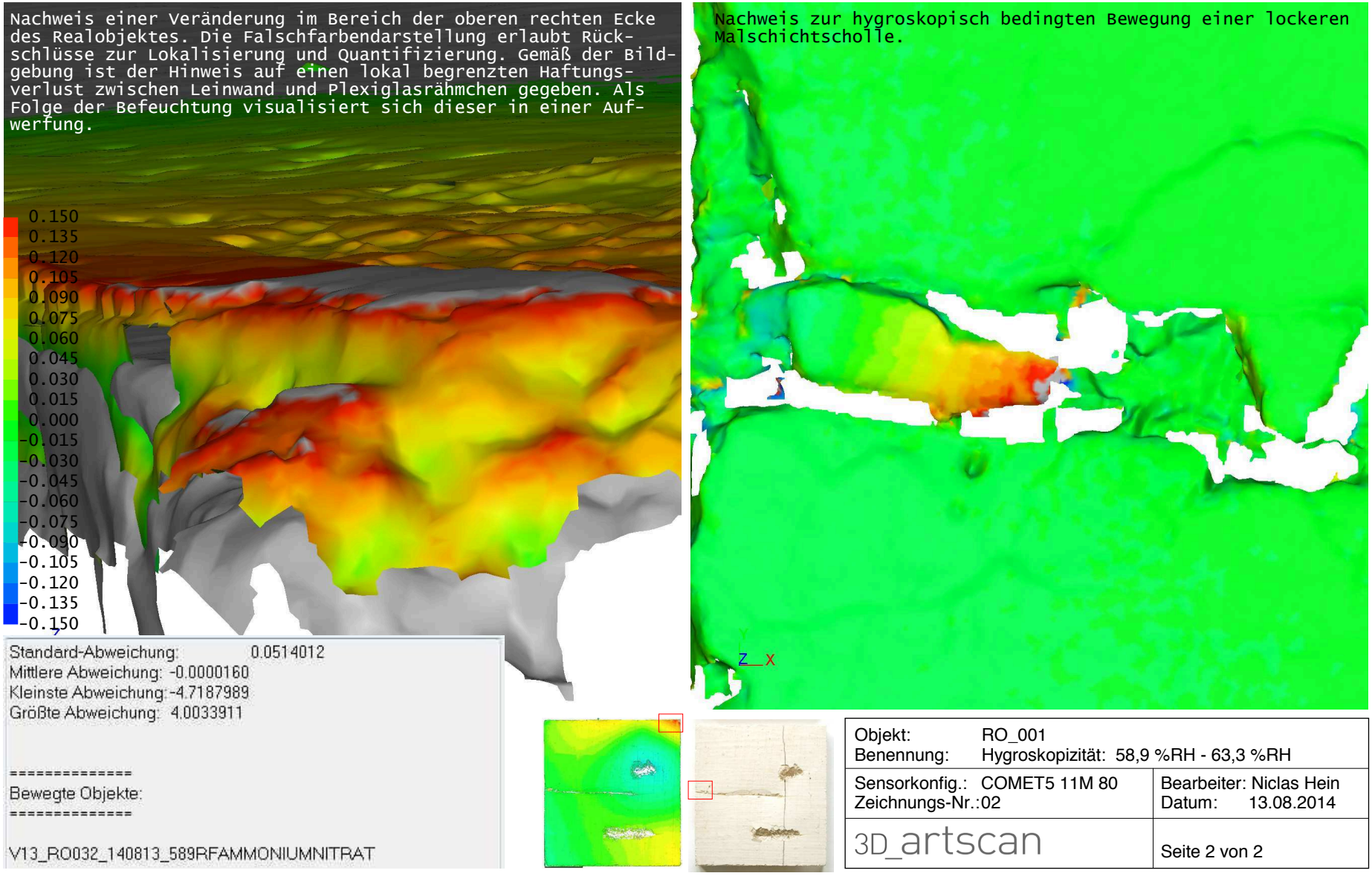
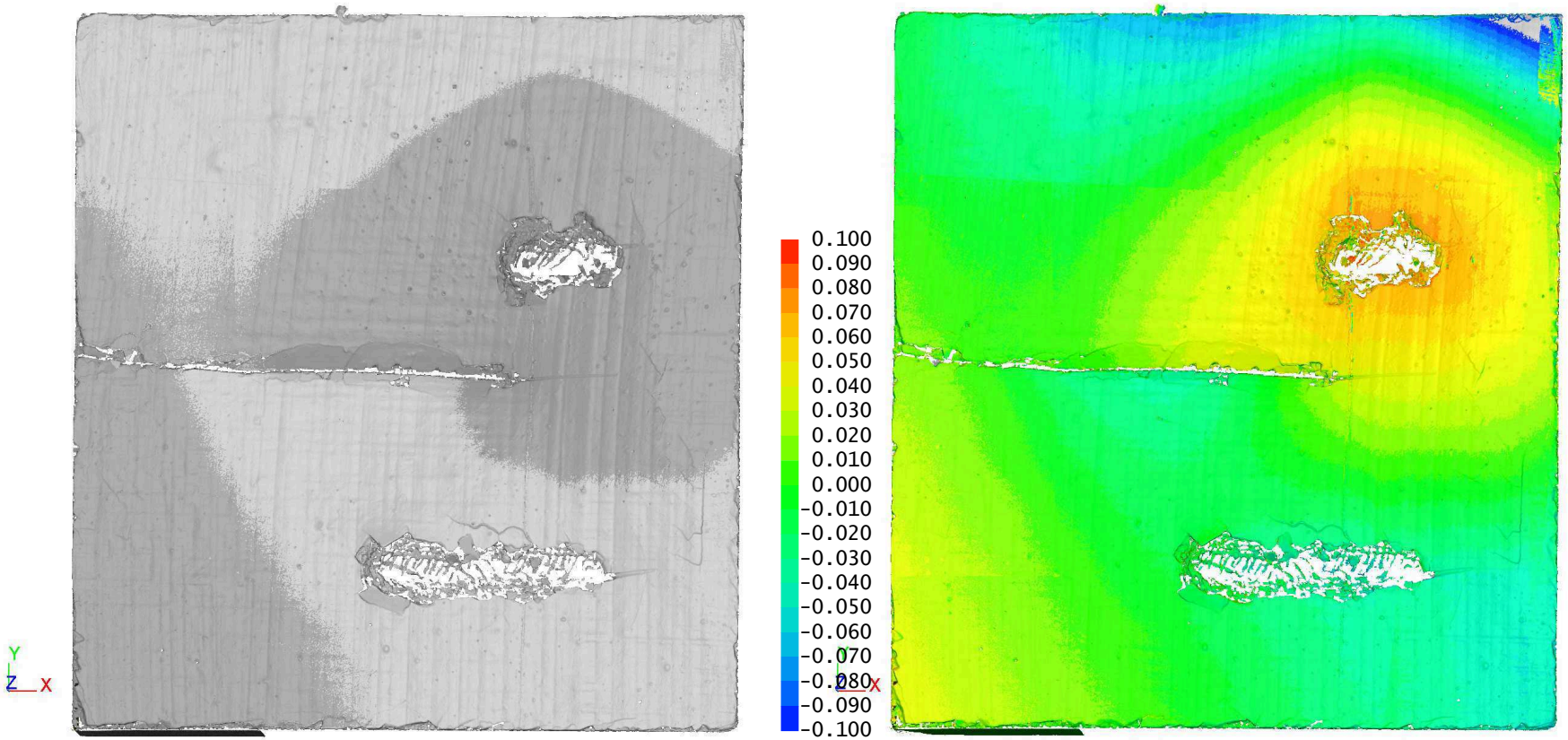


Abb. 200| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_118 ('RO_001') zur Bildgebung einer Delamination und eines sich aufwerfenden Bildschichtengefüges im Detail – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_119
RO_001 bei 63,3 %RH (M_573) / 54,3 %RH (M_574)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 9,0 %RH (mit induzierter Fehlstelle und Kugelschreiberstrich)
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat



Objekt:	RO_001	
Benennung:	Hygroskopizität: 63,3 %RH - 54,3 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 14.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

Abb. 201| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_119 ('RO_001') zur Bildgebung einer Delamination und eines sich niederlegenden Bildschichtengefüges – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Verformungen entlang von Craquelé-Strukturen

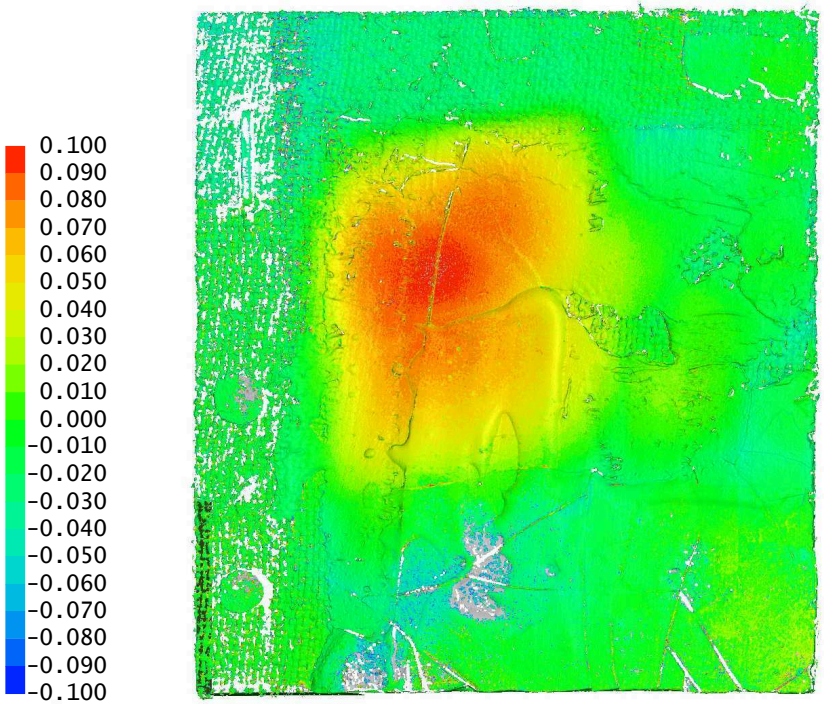
Anhand des Untersuchungsgegenstandes 'RO_038' kann die Digitalisierung vorhandener Craquelé-Strukturen vorgewiesen werden.[620,621] Sowohl bei den 3D-Modellen im 'Viewer', als auch im Anschluss an den Soll- Ist-Vergleich sind dieselben bei der Falschfarbendarstellung augenscheinlich (►Abb. 202| und Abb. 203|). Letztere ermöglicht ebenso Rückschlüsse auf Veränderungen in der Firnisschicht. Entlang der Riss-/Bruchkanten des Craquelés bestehen farbcodierte Anhaltspunkte auf eine lokal begrenzte Veränderungen. Diese können mit bis zu ±0,100 mm quantifiziert werden. Obgleich die Farbcodierung im Bereich des Craquelés den Rückschluss gewährt, dass vorwiegend Soll-Ist-Abweichungen in positive Normalenrichtung bestehen, ist eine eindeutige Aussage über die Richtungsausprägung nicht möglich. Ebenso bestehen Hinweise auf Verschiebungen in negative Normalenrichtung. Entweder ist die Bildgebung hier nicht eindeutig (Lage der Messpunkte im Spalt) und/oder es liegen tatsächlich windschiefe Verschiebungen oder eine Verkeilung der Firnisoberfläche im Spaltbereich vor. Grundsätzlich wird die beobachtete Veränderung der klimatischen Belastung zugeschrieben – einer moderate Trocknung von 9,4 %RH.

620 Vergleiche: V_131, ‚RO_038' (Soll-Daten: M_589 bei 64,1 %RH / Ist-Daten: M_590 bei 54,7 %RH, Konditionierung: Δ9,4 %RH). Protokollseite 1 f.

621 Das nachgewiesene Merkmal stimmt mit dem Schadensbild Sprungnetz, Altersprung, Craquelé (Kategorie 2) des Schadenskataloges überein.

Versuch: V_131
RO_038 bei 64,1 %RH (M_589) / 54,7 %RH (M_590)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 9,4 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat





0.100
0.090
0.080
0.070
0.060
0.050
0.040
0.030
0.020
0.010
0.000
-0.010
-0.020
-0.030
-0.040
-0.050
-0.060
-0.070
-0.080
-0.090
-0.100

Y
Z X

Standard-Abweichung: 0.0518483
Mittlere Abweichung: -0.0006821
Kleinste Abweichung: -4.5247638
Größte Abweichung: 4.0676105

==========
Bewegte Objekte:
==========

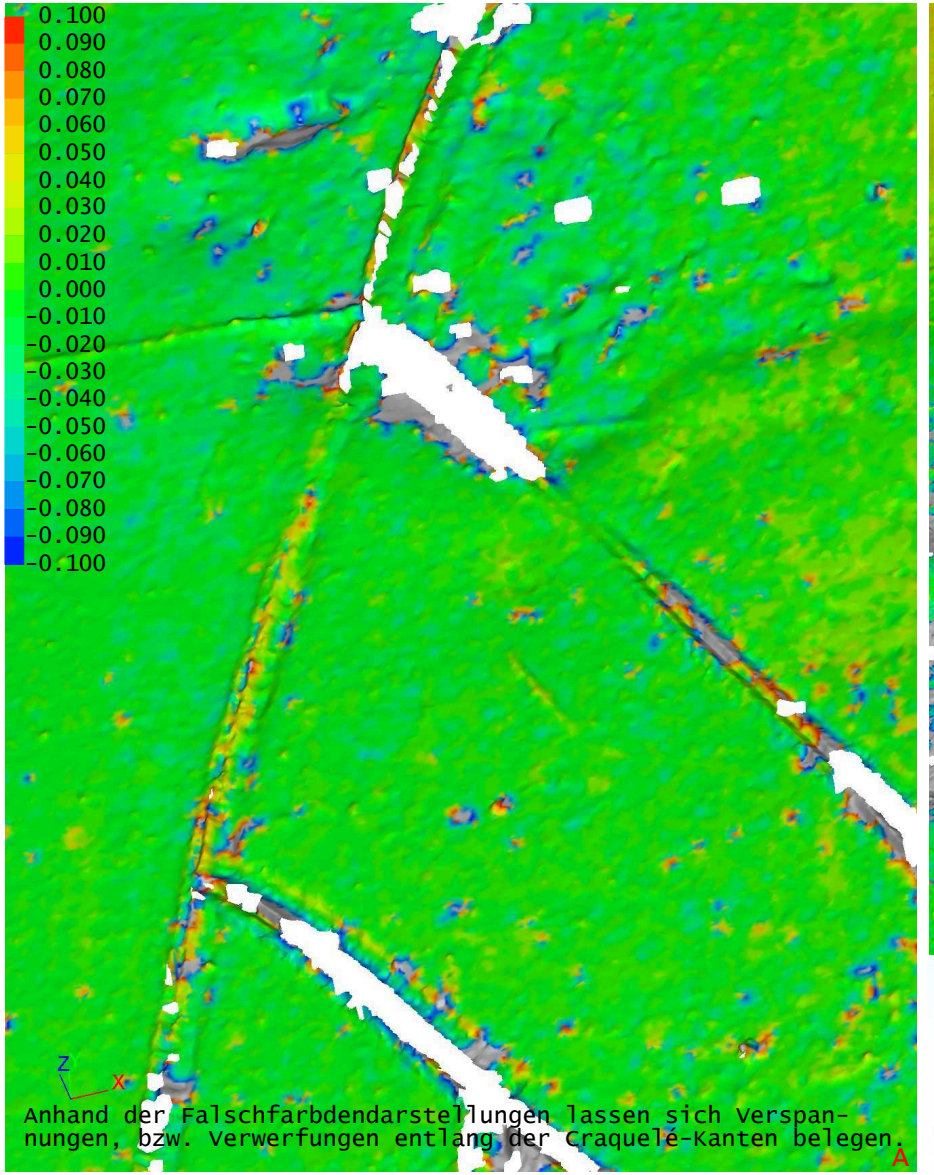
V13_RO033-038-046_140816_545RFMAGNESIUMNITRAT

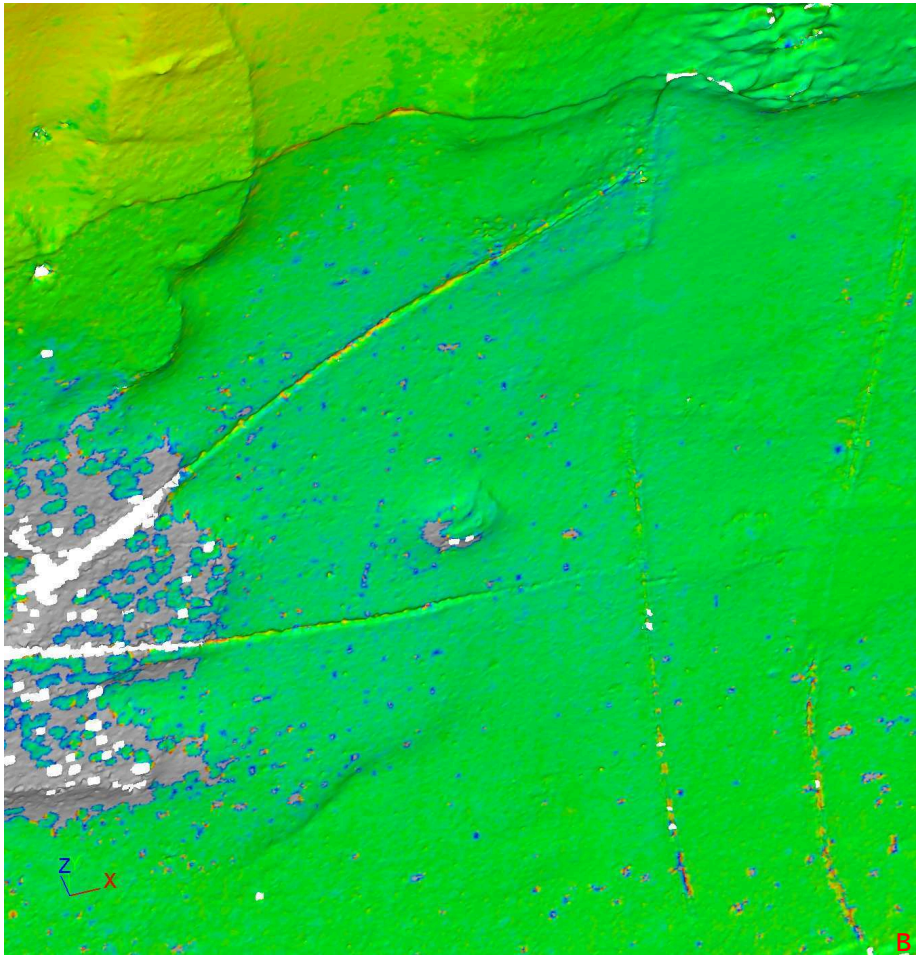
RO_038 bei 64,1 %RH (Soll-Daten)

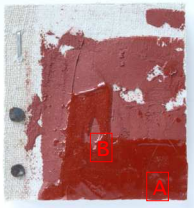
RO_038 bei 54,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt: RO_038 Benennung: Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:03	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 16.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 2

Abb. 202| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_131 ('RO_038') zur Bildgebung von Craqelé-Strukturen – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst







Objekt:	RO_038	
Benennung:	Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 16.08.2014
3D_artscan		Seite 2 von 2

Abb. 203| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_131 ('RO_038') zur Bildgebung von Craqielé-Strukturen im Detail – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Schollenbildung

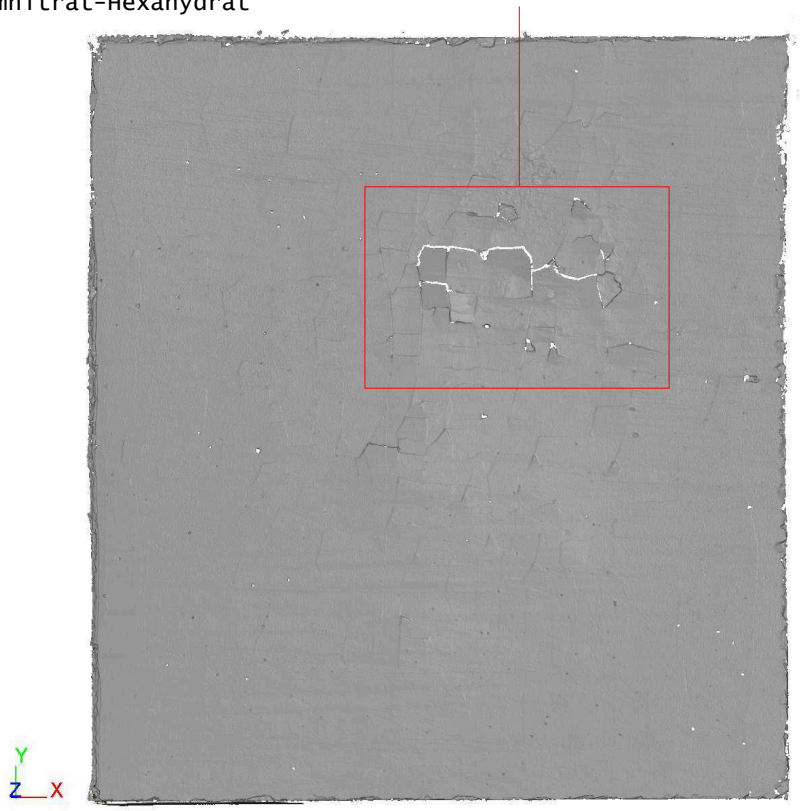
Neben klimatischen Belastungen ist in einem Experiment auf der Malschichtoberfläche des Realobjektes 'RO_046' ein Wassertropfen appliziert worden.[622,623] Dies hat eine signifikante Abweichung der Ist-Daten von den Soll-Daten zur Folge (►Abb. 204| - Abb. 206|). Ein eindeutiger Beleg kann sowohl anhand der 'Viewer-Ansicht', als auch über die Falschfarbendarstellung erbracht werden. Hierbei sind größere, jedoch lokal begrenzte, aufstehende Schollen des Bildschichtengefüges offensichtlich. Die Schollenbildung vollzieht sich in positive Normalenrichtung, wobei das Veränderungsmerkmal so groß ausfällt, dass die Skalierung der Falschfarbendarstellung bis auf $\pm 0{,}500$ mm gesetzt werden muss, um das Maximum der Topografieveränderung abbilden zu können. Die Objektveränderung steht in zweifelsfreiem Zusammenhang mit dem appliziertem Wassertropfen.

622 Vergleiche: V_134, ‚RO_046' (Soll-Daten: M_593 bei 64,1 %RH / Ist-Daten: M_594 bei 54,7 %RH, Konditionierung: Δ9,4 %RH, Applizierter Wassertrofpen). Protokollseite 1 ff.

623 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Topografieveränderungen, was systematisch einer Grundschadensart entspricht. Ebenso besteht eine Merkmalsübereinstimmungen mit dem Schadensbild: Scholle (Kategorie 2).

Versuch: V_134
RO_046 bei 64,1 %RH (M_593) / 54,7 %RH (M_594)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 9,4 %RH (mit appliziertem Wassertropfen (bei M_594))
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat



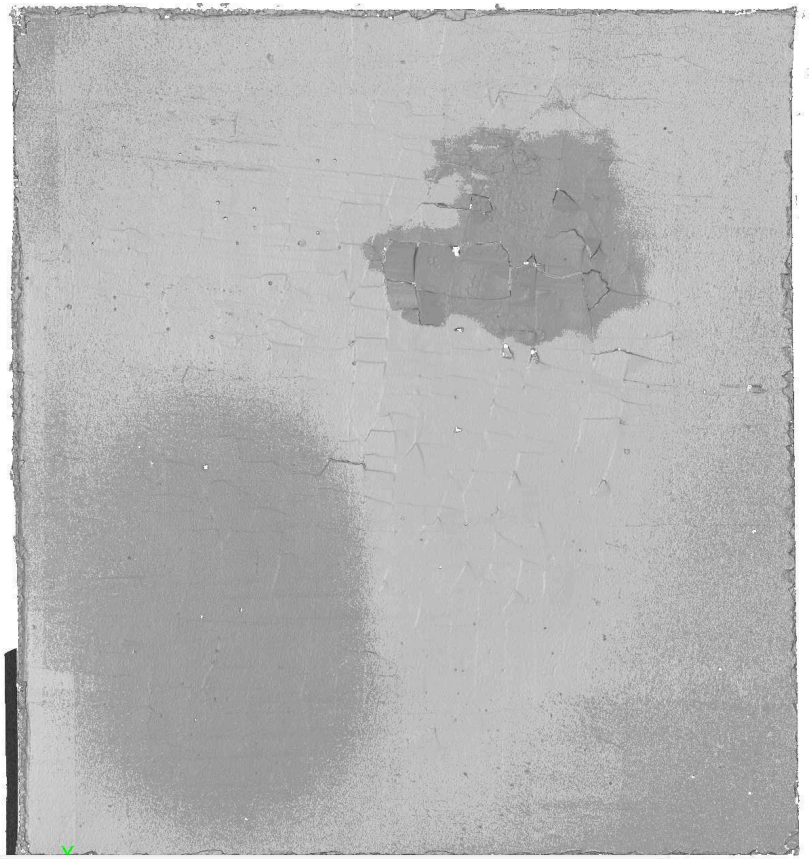


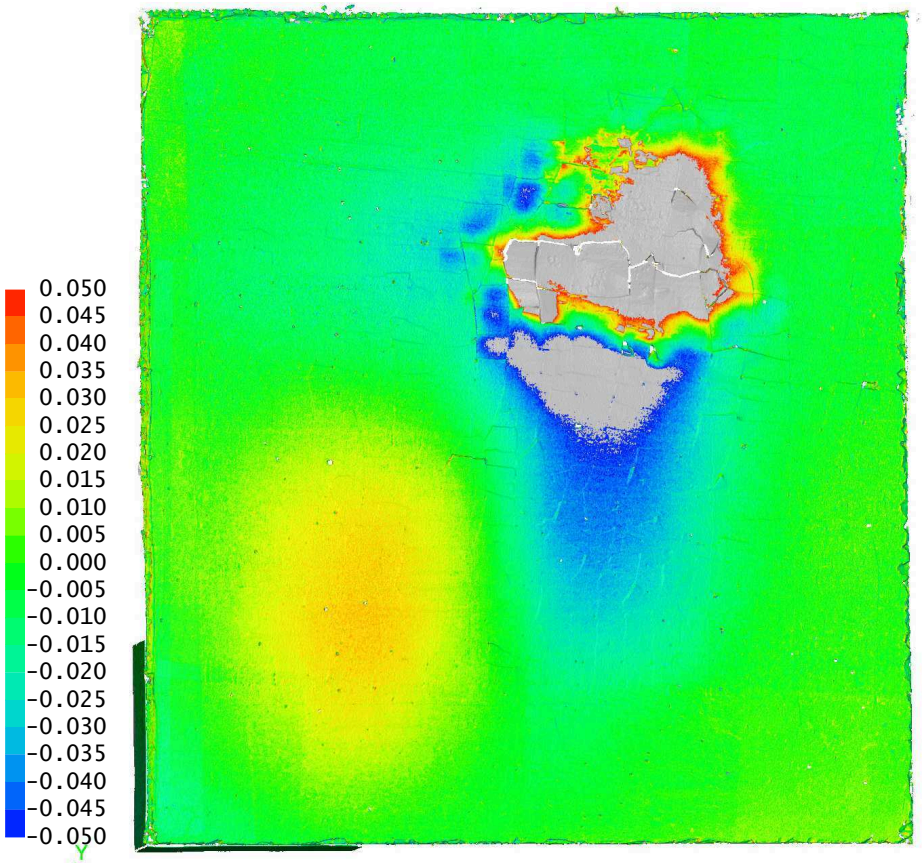
RO_046 bei 64,1 %RH (Soll-Daten)

RO_046 bei 54,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	RO_046	
Benennung:	Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 16.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 3

Abb. 204| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_134 ('RO_046') zur Bildgebung der Oberflächenverformung und Schollenbildung durch einen Wassertropfen – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' von Soll- und Ist-Datensatz.
Quelle: Selbst





Standard-Abweichung: 0.0424058
Mittlere Abweichung: -0.0005136
Kleinste Abweichung: -4.5541850
Größte Abweichung: 4.1677244

==========
Bewegte Objekte:
==========

V13_RO033-038-046_140816_545RFMAGNESIUMNITRAT

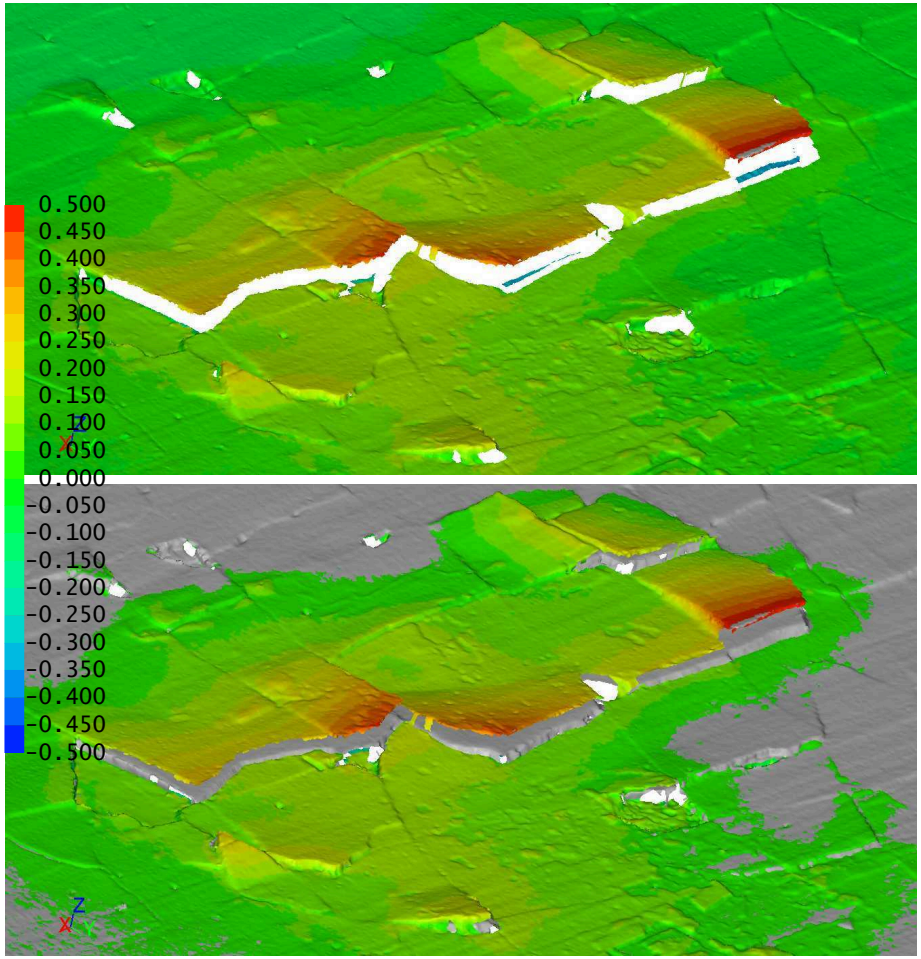
Bei der Berechnung der Flächenabweichung zwischen den Soll- und Ist-Daten reicht der Umfang der Skala nicht aus um ihre Diskrepanzen vollständig zu visualisieren. Folgend wird daher hierfür eine andere Spannweite gewählt.

RO_046 bei 64,1 %RH (Soll-Daten)

RO_046 bei 54,7 %RH (Ist-Daten)

Objekt: RO_046 Benennung: Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:03	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 16.08.2014
3D_artscan	Seite 2 von 3

Abb. 205| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_134 ('RO_046') zur Bildgebung der Oberflächenverformung und Schollenbildung durch einen Wassertropfen – veranschaulicht über die 'Viewer-Ansicht' und die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

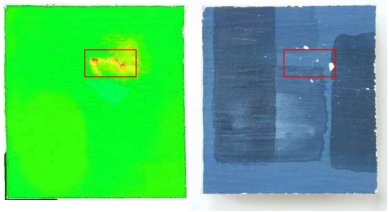




Der applizierte Tropfen hat zu deutlich sichtbaren Schäden auf der Malschichtoberfläche geführt. Die dadurch verursachten Wasserränder können beim Digitalisat ('M_594') nicht nachgewiesen werden - gleichwohl die strukturellen Veränderungen wie die Verwerfungen der Mal- und Grundierschicht.
Die nebenstehende Abbildung zeigt das virtuelle Modell des Ist-Datensatzes nebst eingeblendeter Falschfarbendarstellung zur Visualisierung der Diskrepanz zum Soll-Datensatz. Letzterer ist zusätzlich eingeblendet (grau) wodurch die graduelle Veränderung des Bildschichtengefüges kenntlich ist.

Oben:
Flächiger Soll-/Ist-Vergleich, ausgehend von den Ist-Daten.

Unten:
Flächiger Soll-/Ist-Vergleich, ausgehend von den Ist-Daten mit eingeblendetem Soll-Datensatz.



Objekt:	RO_046	
Benennung:	Hygroskopizität: 64,1 %RH - 54,7 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum: 16.08.2014
3D_artscan		Seite 3 von 3

Abb. 206| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_134 ('RO_046') zur Bildgebung der Oberflächenverformung und Schollenbildung durch einen Wassertropfen – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung und das Weißlicht-Kamerabild.
Quelle: Selbst

23.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR13)

An originalen Gemäldeoberflächen konnte die Sensitivität des Untersuchungsverfahrens zur Detektion der Folgen klimatischer Belastungen belegt werden. Dieses gilt für globale und lokal begrenzte Veränderungen gleichermaßen.[624] So ist die souveräne Lokalisierung sowie eine qualitative und quantitative Beurteilung von Topografieveränderungen möglich. Auch hier zeigt sich an den Gemäldefragmenten, dass eine Trocknung bzw. eine Befeuchtung nachweislich zur erwarteten Reaktion des Schichtenverbundes führt. Dieses gilt für Beulen-[625] Dellenbildung[626] und auch Delaminationen[627] des Bildschichtengefüges.

Bereits als geringfügig einzustufende Schwankung der relativen Feuchte, ausgehend vom mittleren Feuchtebereich (55,3 → 58,9 %RH, Δ3,6 %RH)[628], offenbaren bei einem gealterten Malschichtgefüge eindeutige Schollenbewegungen. Im Zuge dessen gelingt erstmals über eine 3D-Bildgebung die Visualisierung von Veränderungsprozessen[629]. So führt eine kumulative, klimatische Belastung im mittleren Feuchtebereich bei einem vormals intakten Materialgefüge zu einer gelockerten Scholle – der zugrundeliegende Veränderungsprozess wurde sequentiell visualisiert.

Aufgrund klimatischer Belastung und einer damit verbundenen, ausgeprägteren Verformung der Schollen im Randbereich, ist der Nachweis über eine gesteigerte Sensitivität erbracht.[630] Mit der angewandten Untersuchungsmethode kann damit letztlich das Schadensbild Schüsselbildung veranschaulicht werden. Weiterhin kann festgehalten werden, dass das Bildschichtengefüge, in jenem Bereich, der rückseitig nicht durch die Rahmenschenkel geschützt ist, deutlich klimasensitiver ist.[631]

Wie bereits bei den Probekörpern nachgewiesen, sind auch bei den Realobjekten gesteigerte Soll-Ist-Diskrepanzen entlang von Rissstrukturen im Bildschichtengefüge belegt, die auf ein erhöhtes Reaktionsvermögen bei Imperfektionen[632] rückschließen lassen. Diese offenbaren sich als 'Wirkungspunkt' für strukturelle Objektveränderungen. Anzuführen ist in diesem Zusammenhang auch der messtechnische Nachweis über Veränderungen eines Firnis-Craquelés[633]. Die Veränderungen stehen in Abhängigkeit zu einer moderaten Trocknung im mittleren Feuchtebereich (64,1 → 54,7 %RH, Δ9,4 %RH). Obgleich vorhandener Unsicherheiten in Bezug auf die Richtung der Veränderung – hier bestehen Hinweise auf windschiefe Verkeilungen des

624 Vergleiche: V_123 und V_124

625 Vergleiche: V_127

626 Vergleiche: V_128

627 Vergleiche: V_118 und V_119

628 Vergleiche: V_117, V_123 und V_124

629 Vergleiche V_123 und V_124

630 Vergleiche: V_123

631 Vergleiche: V_124

632 Vergleiche: V_119

633 Vergleiche: V_131

Firnisses im Spaltbereich – überzeugt das Verfahren durch die grundsätzliche Bildgebung, seine hochauflösenden Eigenschaften und die Quantifizierung der Veränderung im Bereich eines zehntel Millimeters. Außerdem kann belegt werden, dass sich Soll-Ist-Diskrepanzen auf den Spaltbereich begrenzen und somit hier ein erhöhtes Veränderungspotenzial besteht.
Auch Fehlstellenbildungen[634] sind als Belastungsfolge messtechnisch nachweisbar. Neben der grundsätzlichen Bildgebung belegen die zugrundeliegenden Experimente insbesondere die Vorzüge der entwickelten Auswertungsstrategie. Aufgrund einer vergleichsweise unübersichtlichen, durch Vorschäden geprägten Objekttopografie gelingt die lokal begrenzte Merkmalsidentifikation erst durch die teilautomatische, farbkodierte Hervorhebung im Rahmen der Falschfarbendarstellung.

634 Vergleiche: V_117 und V_119

24. Experimente zur klimatischen Belastung: Gemälde (VR14-VR15)

Für die zugrundeliegende Datenerhebung sind erstmals beide Sensorvarianten verwendet worden.

24.1 Ergebnisse der Konditionierung

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Klimatisierung der Gemälde zusammengefasst (►Tab. 55| und Tab. 56|).

Gemälde (Transportsimulation)

Versuchsreihe_14

Messungs Nr.	Objekt Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_732	G_001	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,7	52,3	Soll (V_212)
M_732a					Soll (V_212a)
M_733	G_001	Natriumbromid	23,5	57,1	Ist (V_212), Soll (213)
M_733a					Ist (V_212a), Soll (213a)
M_734	G_001	Ammoniumnitrat	25,3	64,5	Ist (V_213), Soll (214)
M_734a					Ist (V_213a), Soll (214a)
M_735	G_001	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,9	55,2	Ist (V_214)
M_735a					Ist (V_214a)

Tab. 55| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihe VR14 (Gemälde), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung. Quelle: Selbst

Gemälde (Transportsimulation)

Versuchsreihe_15

Messungs Nr.	Objekt Nr.	Konditionierungsstoff	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	RH., % (gemittelt, gerundet)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.
M_736	G_002	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	23,0	52,5	Soll (V_215)
M_736a					Soll (V_215a)
M_737	G_002	Natriumbromid	22,8	55,5	Ist (V_215), Soll (216)
M_737a					Ist (V_215a), Soll (216a)
M_738	G_002	Ammoniumnitrat	24,6	63,5	Ist (V_216), Soll (217)
M_738a					Ist (V_216a), Soll (217a)
M_739	G_002	Magnesiumnitrat-Hexahydrat	24,2	54,1	Ist (V_217)
M_739a					Ist (V_217a)

Tab. 56| Übersicht der durchgeführten Experimenten für die Versuchsreihe VR15 (Gemälde), unter Angabe von: Messnummer, Untersuchungsgegenstand, Konditionierungsstoff, Klimatisierung und Soll-Ist-Zuweisung. Quelle: Selbst

24.2 Ergebnisse zur Bildgebung über strukturelle Veränderungen

Die bildgebende Auswertung zur Transportsimulation an vollständigen Gemälden folgt dem bisherigen Muster. Unter Berücksichtigung vorhandener Schnittpunkte soll mit den Experimenten ein gesteigerte Praxisnähe erbracht werden. Die Darlegung der Ergebnisse erfolgt auch hier zusammenfassend, wobei das über die Bildgebung nachgewiesene Veränderungsmerkmal als übergeordnetes, gliederndes Element fungiert.

Oberflächenverformung in Form von Beulen und Dellen

Bereits bei einem ersten Experiment an einem vollständigen Original, dem Untersuchungsgegenstand 'G_001' (V_212), digitalisiert mit 'COMET 5 11M 1000', werden signifikante Soll-Ist-Abweichungen offensichtlich. Die Falschfarbendarstellung lässt auf lokal begrenzte Verformungen im Randbereich des randangestückten Bildträgers rückschließen (►Abb. 208|).[635] Über die Farbcodierung können diese eindeutig als Delle bestimmt werden.[636] Das Maximum der Topografieveränderung wird mit 0,675 mm in negative Normalenrichtung quantifiziert. Die Ursache für die attestierte Veränderung wird der leichten Befeuchtung von 4,8 %RH zugeschrieben.

Im weiteren Verlauf wird bei 'G_001' untersucht, ob sich bei umgekehrter klimatischer Belastung – also einer Trocknung – ein gegenteiliges Objektverhalten einstellt und ebendieses messtechnisch nachzuweisen ist. Tatsächlich belegt die Falschfarbendarstellung (V_214) eine lokale Beulenbildung (►Abb. 209|).[637,638] Sie äußert sich in einer partiellen Aufwerfung in positive Normalenrichtung – im Maximum mit 0,450 mm. Örtlich korrespondiert die Beule im linken Randbereich mit der Lage der im vorherigen Experiment beschriebenen Delle. Fernerhin gibt es durch die Farbkodierung gestützte Hinweise, dass die Ränder des Schichtenverbundes einem höheren Veränderungspotenzial unterliegen als innen liegende Bereiche – ersichtlich beim Übergang des Schichtenverbundes zur Randanstückung (►Abb. 210|). Die Ursache für die nachgewiesenen Diskrepanzen wird im Zusammenhang mit der moderaten Trocknung von 9,3 %RH gesehen.

635 Vergleiche: V_212, ‚G_001' (‚COMET 5 11M 1000', Soll-Daten: M_732 bei 52,3 %RH / Ist-Daten: M_733 bei 57,1 %RH, Konditionierung: Δ4,8 %RH). Protokollseite 2

636 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Delle (Kategorie 9).

637 Vergleiche: V_214, ‚G_001' (‚COMET 5 11M 1000', Soll-Daten: M_734 bei 64,5 %RH / Ist-Daten: M_735 bei 55,2 %RH, Konditionierung: Δ9,3 %RH). Protokollseite 1 f.

638 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Beule (Kategorie 4).

Versuch: V_212
G_001 bei 52,3 %RH (M_732) / 57,1 %RH (M_733)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 4,8 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid





Objekt: G_001 Benennung: Transportsimulation: 52,3 %RH - 57,1 %RH		
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:01		Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 26.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4

Abb. 207| Foto der Vorder- und Rückseite von 'G_001'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 212.
Quelle: Selbst

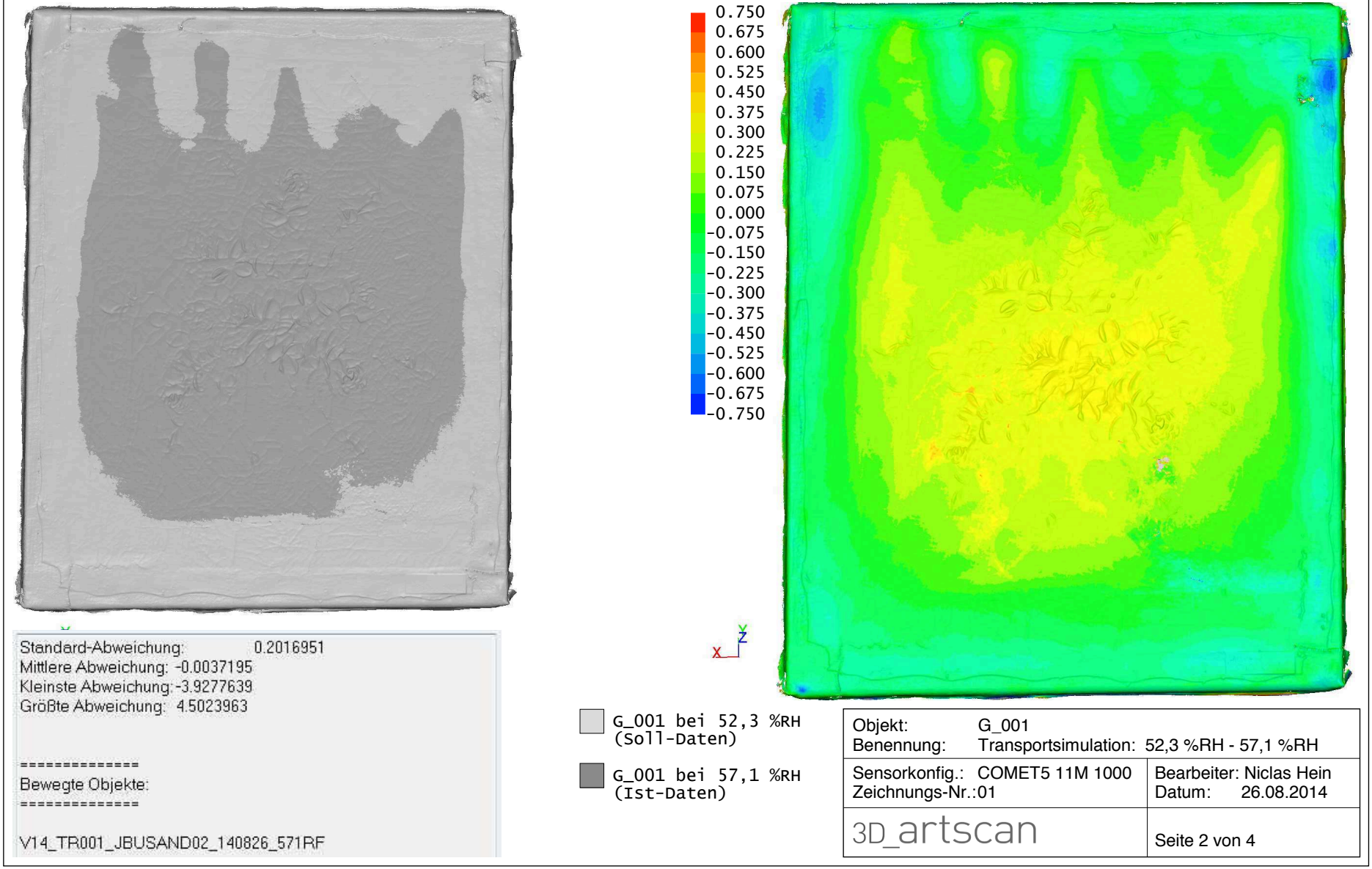
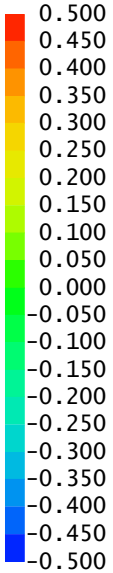
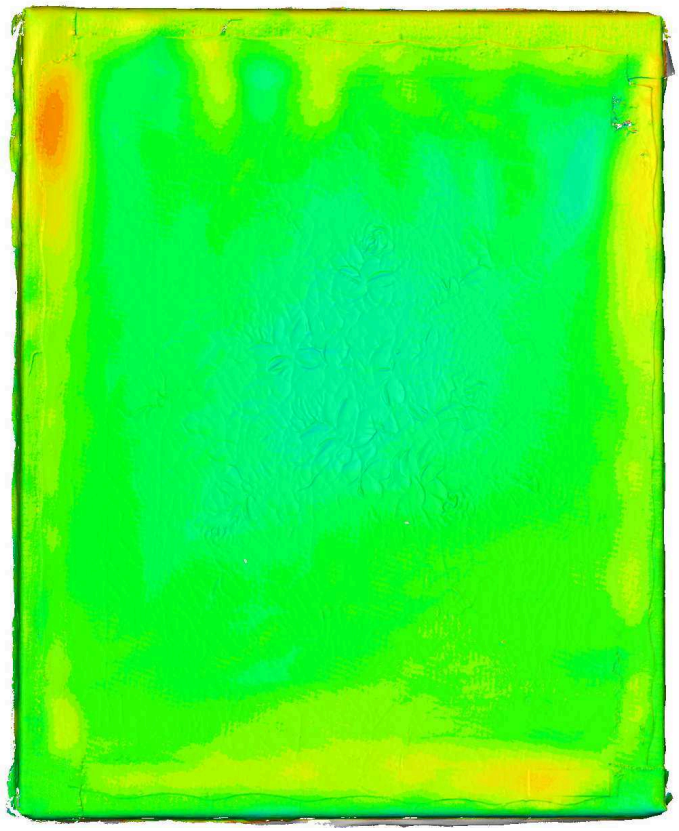


Abb. 208| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_212 ('G_001') zur Bildgebung der Oberflächenverformung in Form einer Dellenbildung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Versuch: V_214
G_001 bei 64,5 %RH (M_734) / 55,2 %RH (M_735)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 9,3 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Ammoniumnitrat / Magnesiumnitrat-Hexahydrat







Standard-Abweichung: 0.1986565
Mittlere Abweichung: 0.0141424
Kleinste Abweichung: -3.6920187
Größte Abweichung: 4.6862897

==========
Bewegte Objekte:
==========

V14_TR001_JBUSAND04_140828_552RF

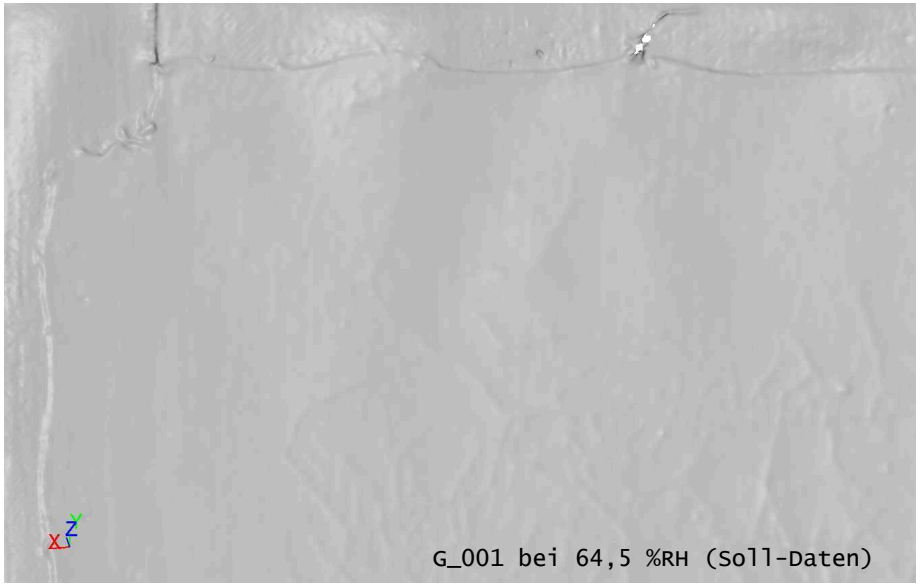


G_001 bei 64,5 %RH (Soll-Daten)

G_001 bei 55,2 %RH (Ist-Daten)

Objekt: G_001 Benennung: Transportsimulation: 64,5 %RH - 55,2 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:03	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 28.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 2

Abb. 209| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_214 ('G_001') zur Bildgebung der Oberflächenverformung in Form einer Beulenbildung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst





Objekt: G_001	
Benennung: Transportsimulation: 64,5 %RH - 55,2 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:03	Datum: 28.08.2014
3D_artscan	Seite 2 von 2

Abb. 210| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_214 ('G_001') zur Bildgebung der Oberflächenverformung in Form einer Beulenbildung im Detail – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Verformungen entlang von Craquelé-Strukturen

Auch im Zuge der hochauflösende Digitalisierung mit 'COMET 5 11M 80' an 'G_001' (V_213a) sind Soll-/Ist-Diskrepanzen belegt.[639] Die Veränderungen stehen im Zusammenhang mit dem Verlauf vorhandener Craquelé-Kanten (►Abb. 211|).[640] Die Farbcodierung quantifiziert dieselben mit 0,050 mm. Als Objektbelastung lag eine moderate Befeuchtung von 7,4 %RH vor wobei ebenso Vorschäden mit zu berücksichtigen sind.

639 Vergleiche: V_213a, .G_001' (.COMET 5 11M 80', Soll-Daten: M_733a bei 57,1 %RH / Ist-Daten: M_734a bei 64,5 %RH, Konditionierung: Δ7,4 %RH). Protokollseite 2

640 Im Abgleich mit den definierten Merkmalen des Schadenskataloges entspricht dieses der Rubrik: Sprungnetz, Altersspung, Craquelé (Kategorie 2)

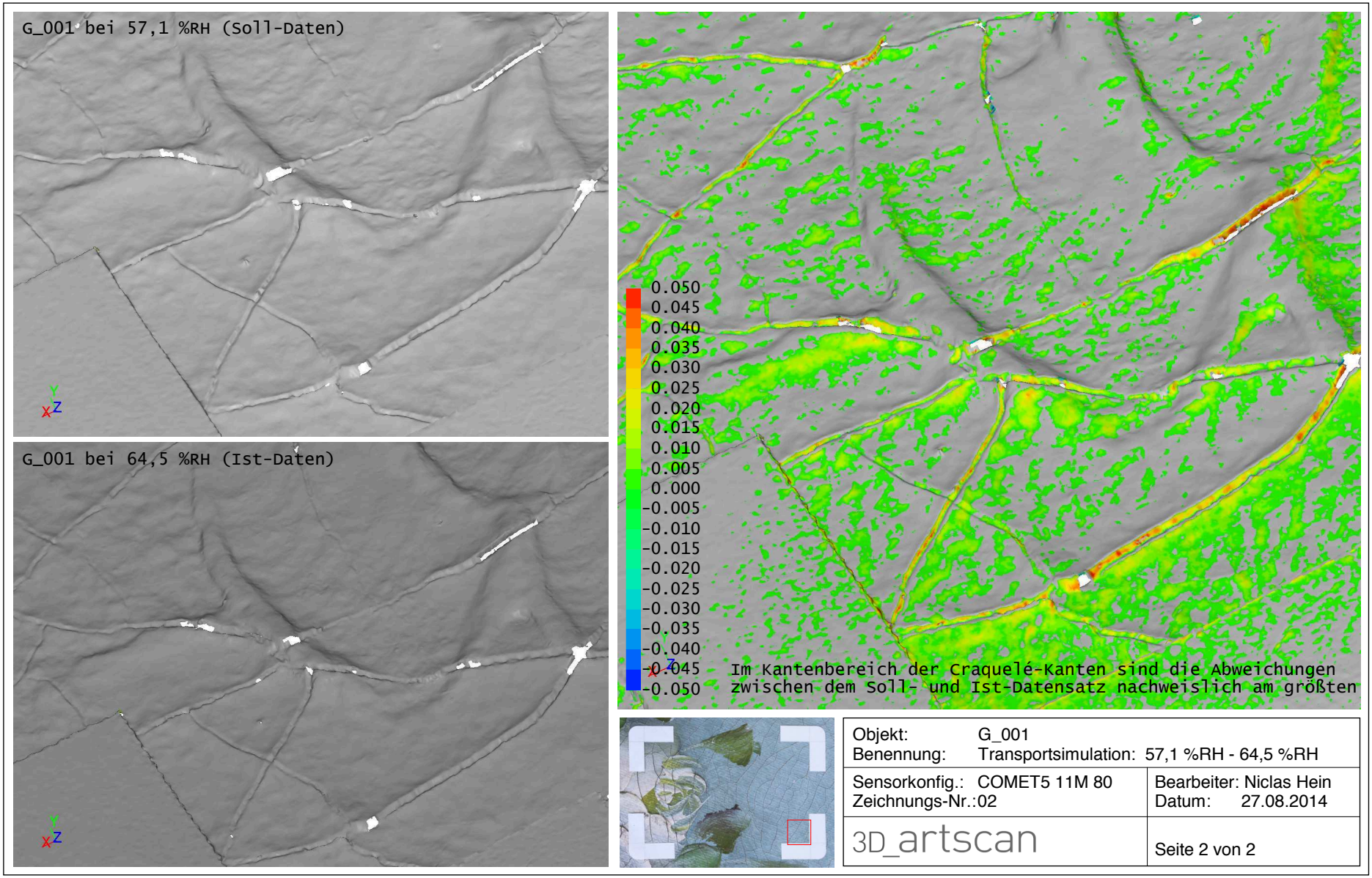


Abb. 211| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_213a ('G_001') zur Bildgebung der Veränderungen entlang der Craquelé-Kanten – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Verformungen entlang von Pastositäten

Abermals auf die bereits oben geschilderteTransportsimulation von 'G_001' (V_212) verweisend, sind, anhand der Bildgebung, weitere Ableitungen zum Materialverhalten bei geringfügigen Klimaschwankungen möglich. So kann, neben einer erhöhten Sensitivität bei vorhandenen Imperfektionen, dieselbe auch bei maltechnischen Besonderheiten nachgewiesen werden.[641] Im Übergangsbereich von flachen Malschicht-Arealen zu besonders pastos aufgetragenen bestehen Hinweise auf lokal begrenzte Diskrepanzen zwischen den Datensätzen.[642] Die Falschfarbendarstellung ermöglicht hier die Lokalisierung einerseits, als auch die Quantifizierung andererseits. Im vorliegenden Fall entspricht dieses einer Soll-Ist-Abweichung von bis zu 0,600 mm in positive Normalenrichtung (►Abb. 212|). Die Ursache der Veränderung steht im Zusammenhang mit der geringfügigen Klimaschwankung von 4,8 %RH im mittleren Feuchtebereich. Eine Untersuchung der entsprechenden Bereiche gaben keine Hinweise auf korrespondierende Delamination, die als Begründung für die ausgeprägtere Sensitivität angeführt werden können.

641 Vergleiche: V_212, ‚G_001' (‚COMET 5 11M 1000', Soll-Daten: M_732 bei 52,3 %RH / Ist-Daten: M_733 bei 57,1 %RH, Konditionierung: Δ4,8 %RH). Protokollseite 3 f.

642 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Topografieveränderung, was systematisch einer Grundschadensart entspricht.

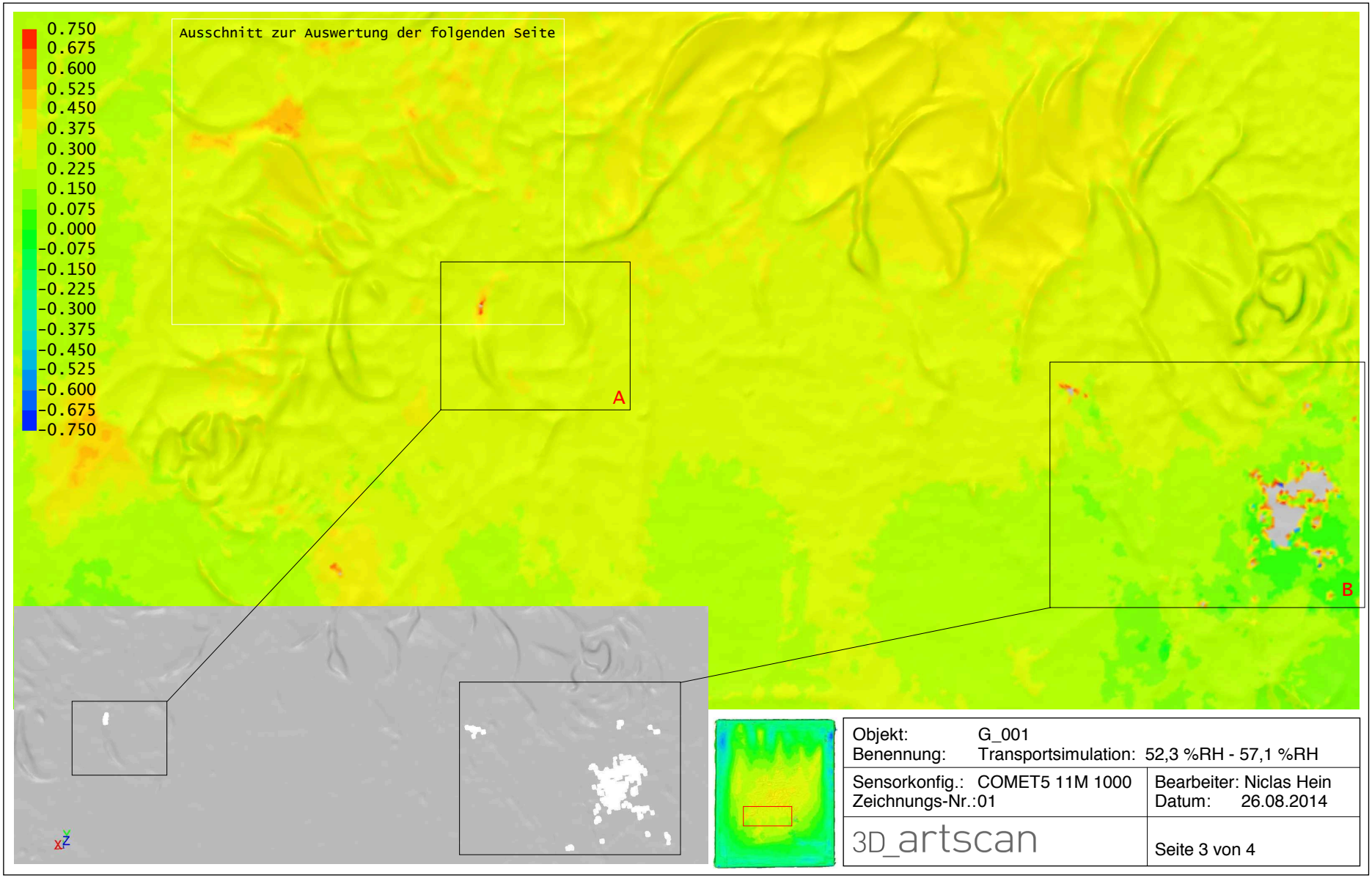


Abb. 212| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_212 ('G_001') zur Bildgebung der Veränderungen entlang der Pastositäten – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Verformungen entlang von Risskanten

Die eben beschriebenen Beobachtung können mit dem hochauflösenden Sensor 'COMET 5 11M 80' auch am Untersuchungsgegenstand 'G_002' festgestellt und damit verifiziert werden (►Abb. 213|). Anhand einer Detailaufnahme ist, neben lokalen Oberflächenverformungen, eine ausgeprägte Soll-Ist-Differenz nachzuweisen die mit den Rissrändern im Schichtenverbund korreliert.[643,644] Die Quantifizierung erfolgte über die Farbcodierung mit ±0,100 mm entlang der Normalenrichtung (►Abb. 214|).[645] Ursächlich für die beschriebene Diskrepanz ist die leichte Befeuchtung um 8,0 %RH. Mit in die Kausalkette einzubeziehen sind auch die Vorschäden.

643 Vergleiche: V_216a, ‚G_001' (‚COMET 5 11M 80', Soll-Daten: M_737a bei 55,5 %RH / Ist-Daten: M_738a bei 63,5 %RH, Konditionierung: Δ8,0 %RH). Protokollseite 1

644 Die beschriebene Veränderung findet ihre Übereinstimmung in den Grundschadensarten, Kategorie: Verformung, wobei zugleich Merkmalsübereinstimmung mit dem Schadenskatalog vorliegen – Schadensbild: Sprungnetz, Altersprung, Craquelé (Kategorie 2)

645 Gleichzeitig bestätigt die hier geschilderte Beobachtung das Ergebnis der Experimente an den Realobjekten und an den Probekörpern.

Versuch: V_215
G_002 bei 52,5 %RH (M_736) / 55,5 %RH (M_737)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 3,0 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Magnesiumnitrat-Hexahydrat / Natriumbromid

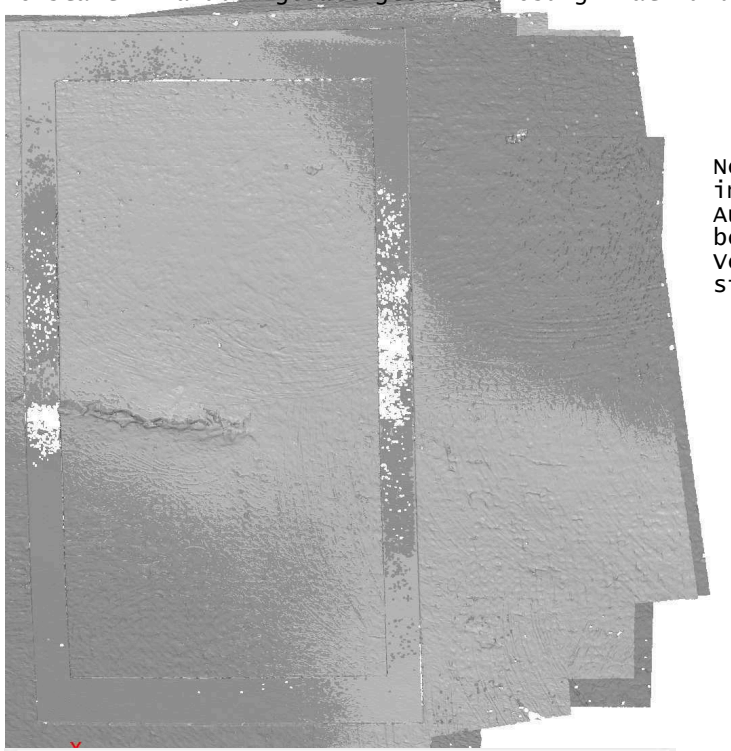




Objekt: G_002 Benennung: Transportsimulation: 52,5 %RH - 55,5 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 30.08.2014
3D_artscan	Seite 1 von 3

Abb. 213| Foto der Vorder- und Rückseite von 'G_002'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von 3.
Quelle: Selbst

Versuch: V_216a
G_002 bei 55,5 %RH (M_737a) / 63,5 %RH (M_738a)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 8,0 %RH
Konstantklima über gesättigter Salzlösung: Natriumbromid / Ammoniumnitrat

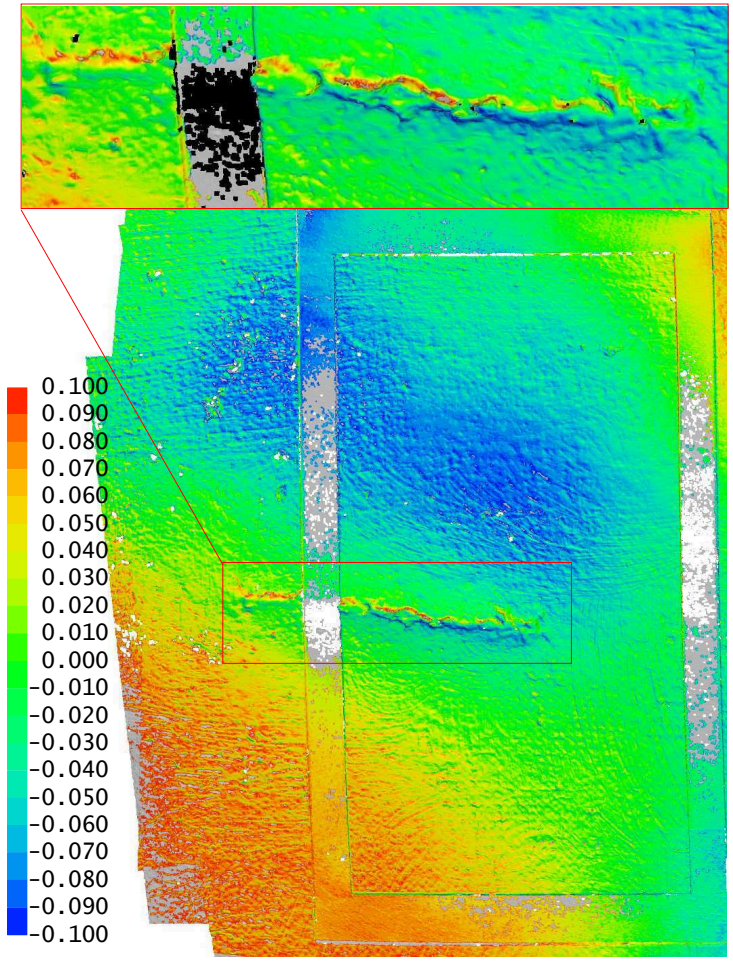


Standard-Abweichung: 0.1059251
Mittlere Abweichung: 0.0000225
Kleinste Abweichung: -4.1203231
Größte Abweichung: 4.2636214

==========
Bewegte Objekte:
==========

V14_TR002_MÜHLE03_140827_XXXRF_DETAIL

Neben globalen Veränderungen im Zentrum des untersuchten Ausschnitt, sind entlang der bestehenden Risskanten die Veränderungen am auffälligsten.



G_002 bei 55,5 %RH (Soll-Daten)

G_002 bei 63,5 %RH (Ist-Daten)

Objekt: G_002 Benennung: Transportsimulation: 55,5 %RH - 63,5 %RH		
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:02		Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 31.08.2014
3D_artscan		Seite 1 von 1

Abb. 214| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_216a ('G_002') zur Bildgebung der Veränderungen entlang der Risskante – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

Verformungen bei Vertiefungen

Im Laufe der Transportsimulation sind bisher unbekannte Phänomene offensichtlich geworden. Diese stehen, wie eben skizziert, in mutmaßlichem Zusammenhang mit mangelnden Kenntnissen über das Verhalten des Künstlermaterials. So sind die über den bildgebenden Soll-Ist-Vergleich angezeigten Diskrepanzen nicht immer eindeutig auch einer tatsächlichen Veränderung zuzuweisen. Nach einer klimatischen Belastung von 'G_002' (V_217) ergibt die Farbcodierung Hinweise auf eine lokal begrenzte Diskrepanz in Form einer Lockerstelle o. Ä..[646,647] Dieses kann allerdings nach einer Überprüfung am Original nicht bestätigt werden (►Abb. 215|). Die Soll-Ist-Differenz wird mit 0,500 mm quantifiziert. Das methodisch nachgewiesene klimasensitive Verhalten (Δ9,4 %RH) ist nicht zweifelsfrei zu klären. Einzig besteht das Indiz, dass sich an besagter Stelle eine lochähnliche Vertiefung befindet. Eventuell stehen die visualisierten Soll-Ist-Diskrepanzen in ähnlichem Zusammenhang, wie dieser bereits oben bei den Pastositäten ausgeführt wurde.

646 Vergleiche: V_217, .G_002' (.COMET 5 11M 1000', Soll-Daten: M_738 bei 63,5 %RH / Ist-Daten: M_739 bei 54,1 %RH, Konditionierung: Δ9,4 %RH). Protokollseite 2

647 Bei den beschriebenen Veränderungen handelt es sich um eine Topografieveränderung, was systematisch einer Grundschadensart entspricht.

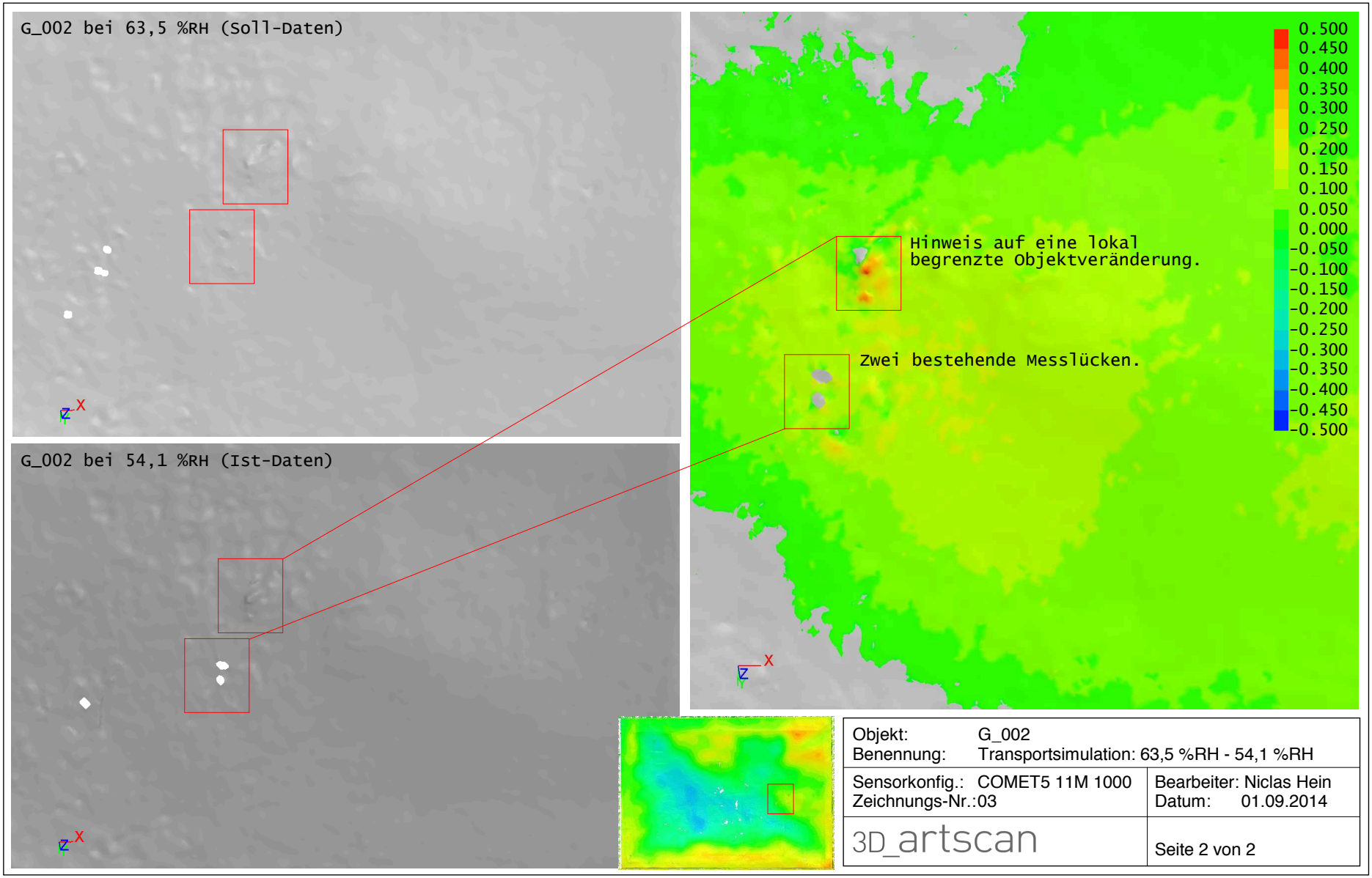


Abb. 215| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_217 ('G_002') zur Bildgebung der Veränderungen im Bereich einer Vertiefung – veranschaulicht über die Falschfarbendarstellung.
Quelle: Selbst

24.3 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR14-VR15)

Die Ergebnisse der Experimente in der Klimakammer belegen die prinzipielle Verfahrenseignung des 'COMET-Systems' zur Detektion klimatisch bedingter Veränderungen an vollständigen Originalen – dieses gilt für beide Sensorkonfiguration. Erstmals gelingt bei wechselnder klimatischer Belastung an Gemälden der dreidimensionale, bildgebende Beleg über ein gegenteiliges Objektverhalten im Sub-Millimeterbereich. Dieses äußert sich in einer Beulenbildung[648] als Folge einer moderaten Trocknung (64,5 → 55,2 %RH, Δ9,3 %RH) und vice versa in einer Dellenbildung[649] bei geringfügiger Befeuchtung (52,3 → 57,1 %RH, Δ4,8 %RH). Hervorzuheben sind ebenso die Ergebnisse über strukturelle Veränderungen entlang von Craquelé-Kanten[650], zurückzuführen auf eine moderate Befeuchtung (57,1 → 64,5 %RH, Δ7,4 %RH). Bisher unbekannt war, dass entlang des Übergangsbereiches von flachen Arealen zu besonders ausgeprägten Pastositäten[651] verstärkt Veränderungen nachgewiesen werden können – selbst bei geringfügigen Klimaschwankungen (52,3 → 57,1 %RH, Δ4,8 %RH). Diese sind nicht nur bei Erhöhungen sondern auch bei lokal begrenzten Vertiefungen[652] des Bildschichtengefüges nachweisbar (63,5 → 54,1 %RH, Δ9,4 %RH). Auch wenn eine abschließende Erklärung nicht erbracht werden kann, scheint die Schichtstärke bei den beschriebenen Veränderungen eine entscheidende Rolle zu spielen. Die Erkenntnisse aus den Experimenten an den Realobjekten aufgreifend, kann ebenso am Original bestätigt werden, dass im Bereich vorhandener Imperfektionen[653] allgemein eine verstärkte Empfindlichkeiten gegenüber Feuchteschwankungen (55,5 → 63,5 %RH, Δ8,0 %RH) besteht. Quantifizierbar in den Sub-Millimeterbereich erfolgen Belege über eine sequentielle 3D-Bildgebung.

648 Vergleiche: V_214

649 Vergleiche: V_212

650 Vergleiche: V_213a

651 Vergleiche: V_212

652 Vergleiche: V_217

653 Vergleiche: V_216a

25. Durchführung von Gemäldetransporten (VR16-VR17)

Erstmals wird das 'Comet-System' in beiden Sensorkonfigurationen mit dem Ziel eingesetzt, die Auswirkungen eines Kunsttransportes an Gemälden zu untersuchen. Damit wird die Laborumgebung verlassen. Auch hier sollen etwaige Objektveränderungen über den Soll-Ist-Vergleich nachgewiesen werden. Die Experimente zielen auf die grundsätzliche Machbarkeit eines Transportschadensmonitoring sowie die Systemerprobung ab. Wie eingangs erwähnt wird hierzu sowohl ein Leinwandgemälde (VR16) als auch ein Holztafelgemälde (VR17) transportiert.

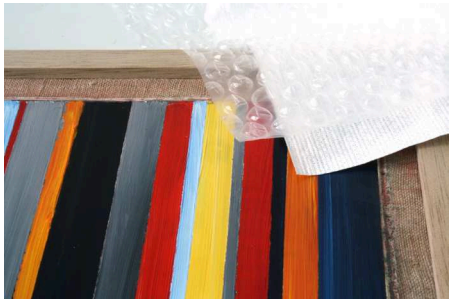


Abb. 216| Schichtenfolge der Gemäldeverpackung.
Quelle: Selbst

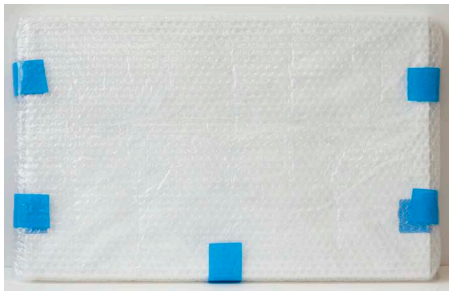


Abb. 217| Das verpackte Gemälde.
Quelle: Selbst

25.1 Gemäldetransport: Leinwandgemälde ('G_003', V_218)

Aufgrund der Objektgröße wird zunächst 'COMET 5 11M 1000' eingesetzt. Das mittelformat-große Leinwandgemälde ('G_003') ist somit über eine Einzelaufnahme zu erfassen (►Abb. 218|). Die Metadaten des Experimentes sind dem Auswertungsprotokoll vorangestellt. Sie umfassen die Messparameter zur Digitalisierung von Vor- und Nachzustand (►Tab. 59| und Tab. 60|).

Die Verpackung des Gemäldes erfolgte über eine durchaus übliche 'Einfachverpackung'. Im musealen Leihverkehr werden für hochwertigere Gemälde im Regelfall jedoch passgenaue, hochkomplexe, anforderungsspezifische Transportboxen verwendet.[654] Die hier verwendete Verpackungsstrategie sah zunächst ein Einschlagen des Gemäldes in einen 'Tyvek-Vlies' vor, sowie eine Umverpackung aus Luftpolsterfolie (►Abb. 216|). Der Verschluss erfolgte mittels Klebeband (►Abb. 217|). Als Transportmittel wurde das Auto gewählt.

Sowohl in der Verpackung als auch außerhalb derselben wurde jeweils ein Datenlogger zur Protokollierung des Klimas beigefügt. Neben den Klimadaten und den Messzeitpunkten (►Tab. 57| und Tab. 58|), sind auch die relevanten Ereignisse dieses Experimentes im Messprotokoll der Datenlogger vermerkt.[655] Diese lassen sich folgend zusammenfassen:

- Digitalisierung (Museum A)
- Beginn der Protokollierung im Atelier (Museum A)
- Verpackung im Atelier (Museum A)
- Beginn Verladung durch Verlassen des Ateliers (Museum A)
- Abstellen im Vorraum (Museum A)
- Verladung Parkplatz (Museum A)
- Beginn Transport (Auto)
- Ende Transport (Auto)
- Verladung Parkplatz (Museum B)
- Ankunft Ausstellungsraum (Museum B)

654 Vergleiche: Green, 1991b, Seite 50; Hackney & Green, 1991, Seite 72

655 Die vollständigen Klimaprotokolle der Datenlogger sind auf dem elektronischen Datenträger im zugehörigen Ordner der Versuchsreihe abgelegt.

- Konditionierung an das Klima des Ausstellungsraumes (Museum B)
- Entpacken im Ausstellungsraum (Museum B)
- Ende der Protokollierung (Museum B)
- Digitalisierung (Museum B)

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Streifengemälde' (zu V_218)
(Logger_03_V16, außerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	21,13	63,00
	Min	20,44	57,72
	Spannweite	0,69	4,77
	Zeitraum	31:10.00	

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Streifengemälde' (zu V_218)
(Logger_03_V16, innerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	21,01	60,47
	Min	20,32	59,88
	Spannweite	0,69	0,59

Tab. 57| Zusammenfassung relevanter Eckdaten der Datenlogger zu V_218.
Quelle: Selbst

Versuchsreihe_16 (V_218)

Gemälde (Transport) Messungs Nr.	Gemälde Nr.	Ortsbezogenes Umgebungsklima	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	Δ Temp., °C	RH., % (gemittelt, gerundet)	Δ RH., %	Spannweite Schwankung RH., % (zwischen Messungen, am Objekt)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.	Zeitraum Datenerhebung (Std.)
M_740	G_003	Museum A	21,0	0,5	57,8	2,2	0,6	Soll (V_218)	31,6
M_741	G_003	Museum B	21,5		60,0			Ist (V_218)	

Tab. 58| Übersicht der durchgeführten Messungen von V_218.
Quelle: Selbst

Ergebnisse und Rückschlüsse zur Verfahrenseignung

Erste Erkenntnisse zur Verfahrenseignung, bzw. zur Detektion von Veränderungen beim Gemäldetransport, ergeben sich aus der Datenerhebung selbst. So führten umfangreiche Reflexionen der leicht glänzenden Gemäldeoberfläche bei der Digitalisierung zu Problemen. Dieses gilt sowohl für die Vor- als auch die Nachzustandsaufnahme. Einhergehend mit den Glanzpunkten bestehen Messlücken, die nur durch einen leicht verkippten Sensor, im Winkel von 15°, zu reduzieren sind (►Abb. 220|). Überdies korrelierten die Messlücken mit den schwarzen und dunkelblauen Malschichtbereichen (►Abb. 218| - Abb. 220|). Auch andere Sensorpositionen, bzw. eine Rotation des Objektes, führt zu keiner nennenswerten Verbesserung der Vollständigkeit. Zur Verdeutlichung des Messlücken-Umfangs ist auf Basis des unvollständigen 3D-Modells, mittels digitaler Bildbearbeitung, eine Kartierung vorgenommen worden. Die Messlücken sind dort rot hervorgehoben. In einem weiteren Schritt ist das Weißlicht-Kamerabild des Sensors hinter die, in die Ebene projizierte 3D-Aufnahme hinterlegt und passgenau ausgerichtet worden. Bestehende Messlücken werden so durch die Kamerabildinformationen ausgeglichen. Ergänzend ist in einem weiteren Schritt des graustufen Kamerabildes durch ein Farbfoto des Gemäldes getauscht worden. Letzteres verdeutlicht die dunkle Farbigkeit des Gemäldes im Bereich der Messlücken. Auf der betreffenden Protokollseite ist das Blau kaum vom Schwarz zu unterscheiden (►Abb. 222|).

Die eigentliche Aus- und Bewertung des Transportes erfolgt nach der ‘Best-Fit-Ausrichtung’. Bereits anhand der ‘Viewer-Ansicht’ und der dort gezeigten, unterschiedlich graugefärbten, sich überlagernden Soll- und Ist-Datensätze, zeigt sich eine globale Verformung (►Abb.

219|). Am angegebenen Ort wird zudem auch die Standard-Abweichung mit 0,06541 mm aufgeführt. Besonders aufschlussreich ist jedoch erst die Falschfarbendarstellung, durch die eine konkave Verformung offenkundig wird (►Abb. 223|). Im Zentrum des Gemäldes besteht demnach beim Ist-Datensatz eine globale Dellenbildung, die ihr Maximum bei -0,100 mm in negative Normalenrichtung aufweist.[656] Zudem zeigt die Falschfarbendarstellung der Tendenz nach eine diagonale Verkippung zwischen den Soll- und Ist-Daten. Eine im Protokoll eingezeichnete rote Linie verdeutlicht die Achse der Verkippung. Es ist davon auszugehen, dass sich der Zierrahmen vergleichsweise statisch verhält. Demnach dürfte dieser eigentlich keine farbcodierten Abweichung aufweisen. Folglich ist die nachgewiesene Verkippung ein Indiz für Unzulänglichkeiten bei der 'Best-Fit-Ausrichtung'. Diese wirken sich global auf den Soll-Ist-Vergleich aus und müssen bei der Beurteilung lokaler Objektveränderungen mit berücksichtigt werden. Im Extremfall können lokale Objektveränderungen, die kleiner sind als das Maß der Verkippung nicht nachgewiesen werden. Die fehlerhafte Ausrichtung wird anhand der Verkippung des Zierrahmens unter Berücksichtigung der Farbcodierung mit ±0,075 mm eingeschätzt.

Ungeachtet dessen können über die Falschfarbendarstellung auch lokale Veränderungen bildgebend nachgewiesen werden. So kennzeichnet sich der Übergangsbereich ausgeprägter Pastositäten blau-farbcodiert: -0,225 mm (►Abb. 223|). Ferner sind ebenso rotcodierte Veränderungen dokumentiert (►Abb. 224| und Abb. 225|). Auch besteht im unteren Bereich des Bildschichtengefüges der Hinweis auf eine lokal begrenzte Beulenbildung mit ca. 1,000 mm Durchmesser und eine Aufwerfung von ca. 0,225 mm. Weiter befinden sich dort in unmittelbarer Umgebung orange hervorgehobene Bereiche, die, hinsichtlich ihrer Verortung, mit Pastositäten korrelieren. Aus Autorensicht ist dieses Muster jedoch nicht eindeutig genug, um als Anhaltspunkt einen kausalen Zusammenhang zweifelsfrei zu begründen. Hinsichtlich der beschriebenen Beulenbildung verifiziert eine Überprüfung am Original tatsächlich das messtechnische Ergebnis.

Relevant ist jedoch auch das, was von der Untersuchungsmethode nicht nachgewiesen werden konnte. In diesem Zusammenhang sind kleine Imperfektionen aufzuführen, wie bspw. ein feiner, über ein Farbfoto nachweislicher Riss im Bildschichtengefüge, sowie ebenda ein Fussel (►Abb. 224|). Sowohl die Falschfarbendarstellung, als auch die Analyse der betreffenden Partien anhand der 'Viewer-Ansicht' geben hierüber keinerlei Aufschluss. In Anbetracht der oben geschilderten Probleme bei der 'Best-Fit-Ausrichtung' und der verwendeten Sensorkonfiguration ist davon auszugehen, dass sich die erwähnten Strukturen unterhalb der Auflösungsgrenze befinden und sie daher nicht detektiert werden.

656 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges besteht eine eindeutige Übereinstimmung mit dem Schadensbild: Beule (Kategorie 4).

Anmerkung:

In einem vorherigen Experiment wurde für die Digitalisierung von 'G_003' die hochauflösende Sensorkonfiguration verwendet. Das 3D-Modell bestand bei dieser Messung aus 101 Einzelaufnahmen. Die Dateigröße der 'COMETplus-Projektdatei' betrug 4,6 GB. Aufgrund des Datenvolumens war es nicht möglich die Datennachverarbeitung durchzuführen – stetige Systemabstürze waren die Folge. Auch die Firma 'Steinbichler' konnte den Datensatz mit einem leistungsstärkeren Computer nicht berechnen. Mit steigender Anzahl der Einzelaufnahmen geht damit eine Verfahrenslimitierung einher. Die Lösung für dieses Problem liegt möglicherweise in einer Segmentierung der Projektdatei in ausschnittsbezogenen Einzeldatensätzen. Eine Zusammenführung dieser Einzeldatensätze für eine Auswertung in 'INSPECTplus' ist bis dato aufgrund technischer Gegebenheiten jedoch nicht möglich (Vermaschung der Dreiecke im Randbereich). Weiterhin sollte bei umfangreichen Einzelaufnahmen und der Verkettung von Matching-Fehlern ebenso eine geeignetere Matching-Strategie entwickelt werden. Denkbar wäre eine Kombination fotogrammetrisch eingemessener Passmarken auf einem Referenz-Kulissen-Rahmen und der Matching-Strategie 'Freies Flächen Matching' – das Gemälde wird während der Digitalisierung in den Referenz-Kulissen-Rahmen montiert. Aufgrund der geschilderten Problematik bietet sich jedoch in einem ersten Schritt die Wahl eines geeigneteren Messvolumens an.

Metadaten und Messparameter (zu M_740)	
Objekt	G_003 (Streifen)
Benennung	Vor dem Transport bei 57,8 %RH
Datum	02.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	4/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	3 Stufen
	1. Messbild	150
	2. Messbild	600
	3. Messbild	1000
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	941.151
	Anzahl Dreiecke	1.845.826
	Oberfläche (mm^2)	225.804.882
	Dateigröße (KB)	43.036

Tab. 59| Metadaten Soll-Daten (V_218).
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter (zu M_741)	
Objekt	G_003 (Streifen)
Benennung	Nach dem Transport bei 60,0 %RH
Datum	03.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	4/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	3 Stufen
	1. Messbild	150
	2. Messbild	600
	3. Messbild	1000
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	926.297
	Anzahl Dreiecke	1.819.411
	Oberfläche (mm^2)	224.314.673
	Dateigröße (KB)	43.694

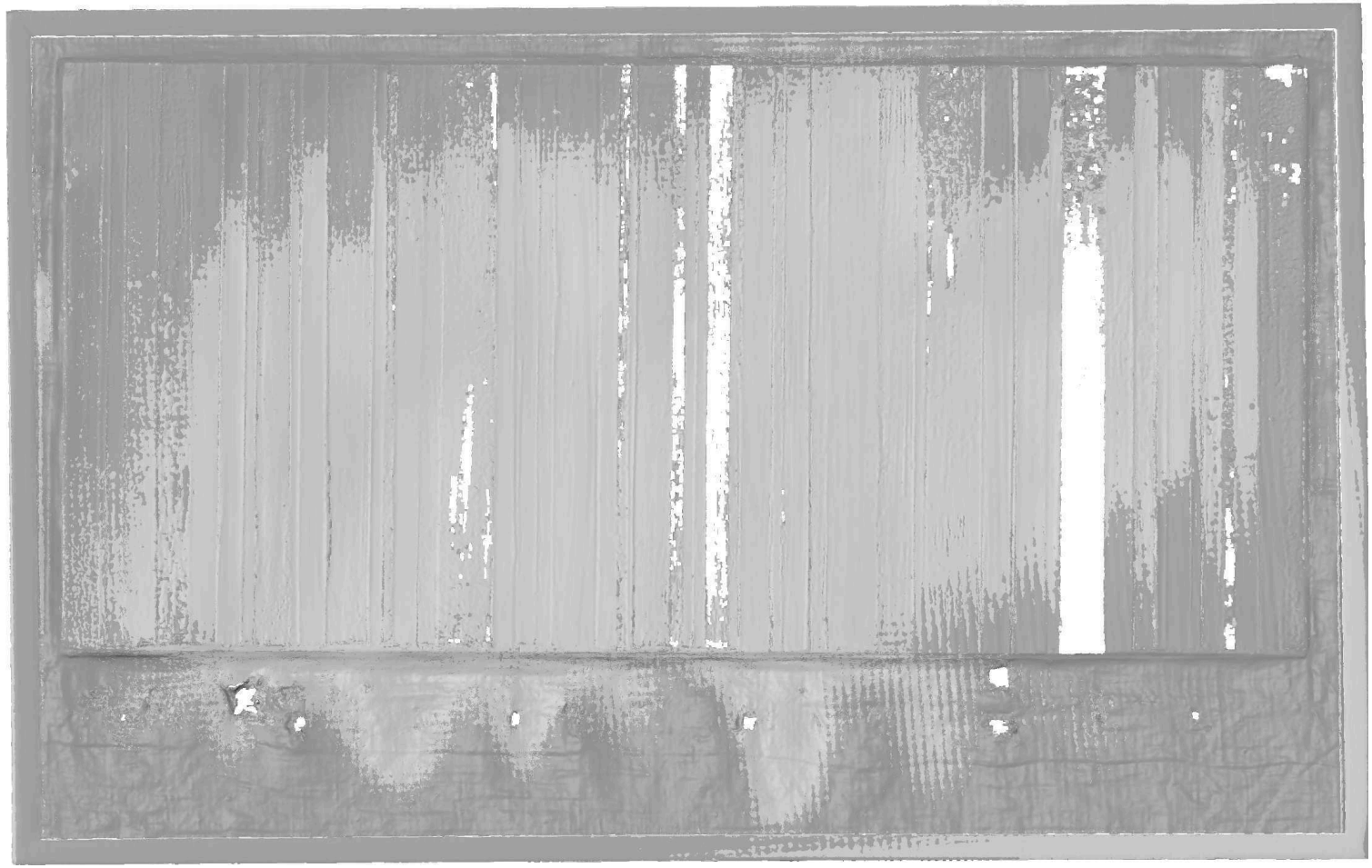
Tab. 60| Metadaten Ist-Daten (V_218).
Quelle: Selbst

Versuch: V_218 (Transport)
G_003 am 02.09.2014 bei 57,8 %RH (M_740)
G_003 am 03.09.2014 bei 60,0 %RH (M_741)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 2,2 %RH,
bei einer Spannweite von 4,8 %RH über einen Zeitraum von 31,6 h



Objekt:	G_003	
Benennung:	Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 02.09.2014
3D_artscan		Seite 1 von 8

Abb. 218| Foto der Vorder- und Rückseite von 'G_003'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_218.
Quelle: Selbst





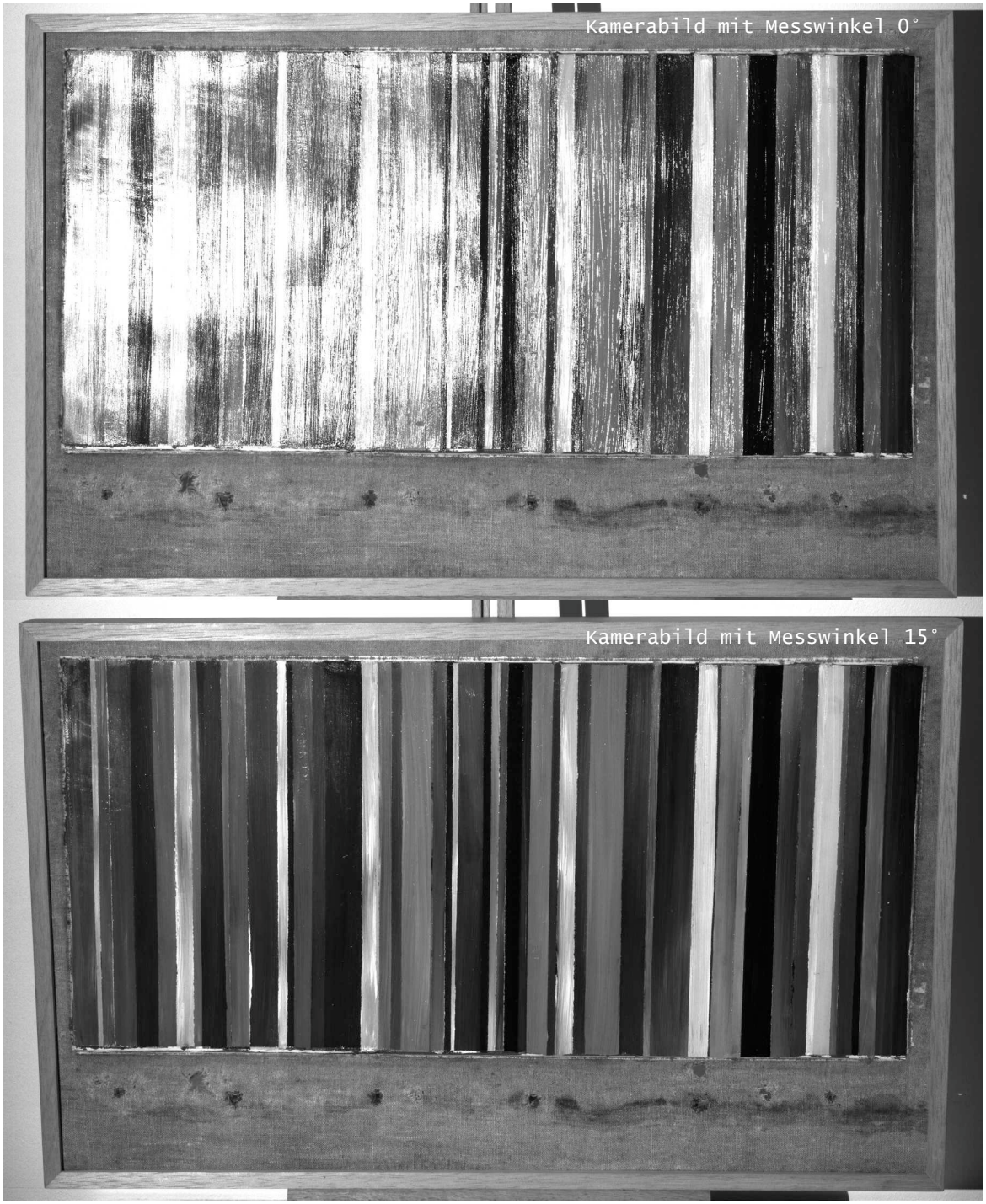
G_003 bei 57,8 %RH (Soll-Daten)

G_003 bei 60,0 %RH (Ist-Daten)

Standard-Abweichung:	0.0654161
Mittlere Abweichung:	0.0001433
Kleinste Abweichung:	-3.9344884
Größte Abweichung:	3.3396365

Objekt: G_003	
Benennung: Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 02.09.2014
3D_artscan	Seite 2 von 8

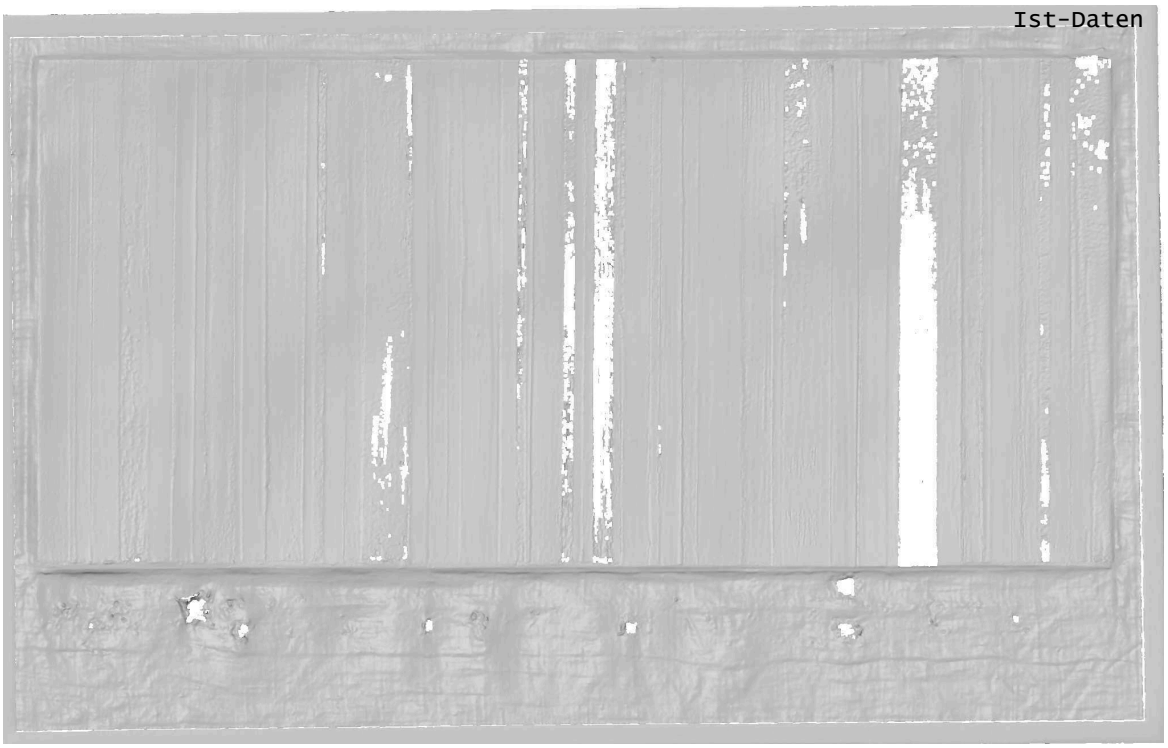
Abb. 219| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_218 ('G_003').
Quelle: Selbst

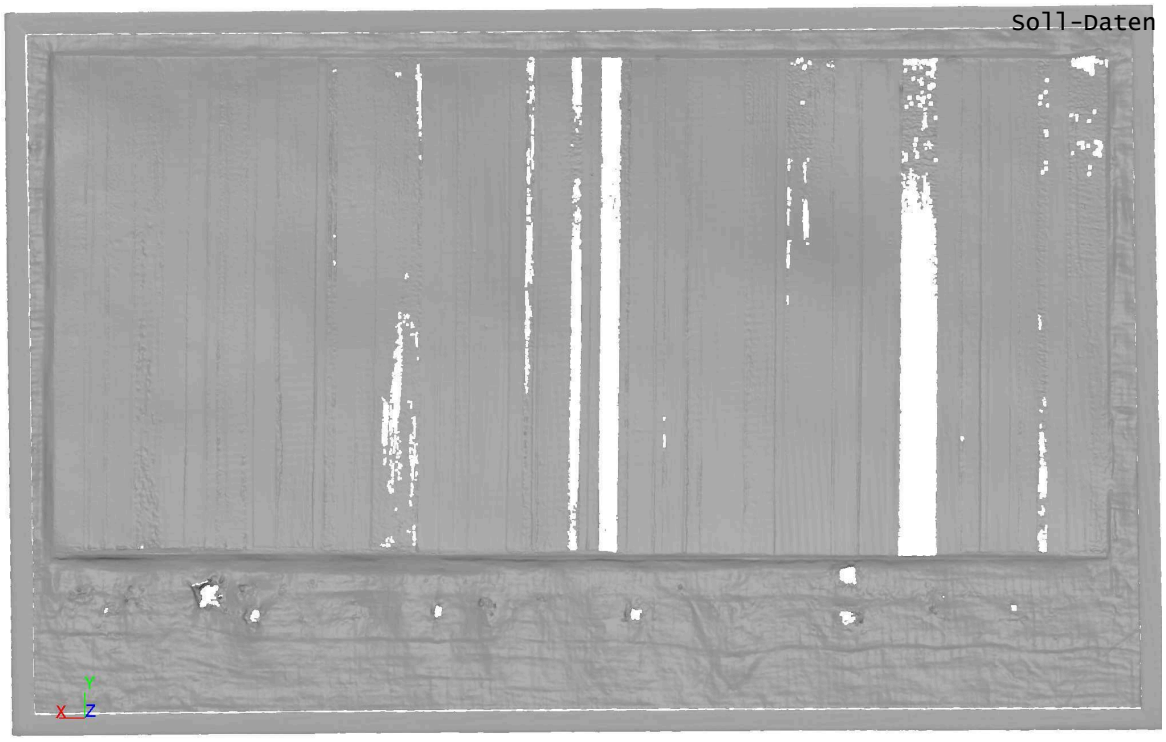


Die beiden oben gezeigten Kamerabilder des Sensors belegen die wechselseitige Beziehung zwischen Messwinkel und Oberflächenglanz. Da die räumliche Ausrichtung der Gemäldeoberfläche durch einen windschiefen Verzug gekennzeichnet ist, muss zur Vermeidung von Reflexen, die Messung aus einer verkippten Sensorposition von mindestens 15° heraus erfolgen. Kleinere, ungünstigere Messwinkel, haben andernfalls Glanzpunkte zur Folge, die sich später beim Digitalisat in umfangreichen Messlücken ausdrücken.

Objekt:	G_003	
Benennung:	Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 02.09.2014
3D_artscan		Seite 3 von 8

Abb. 220| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst

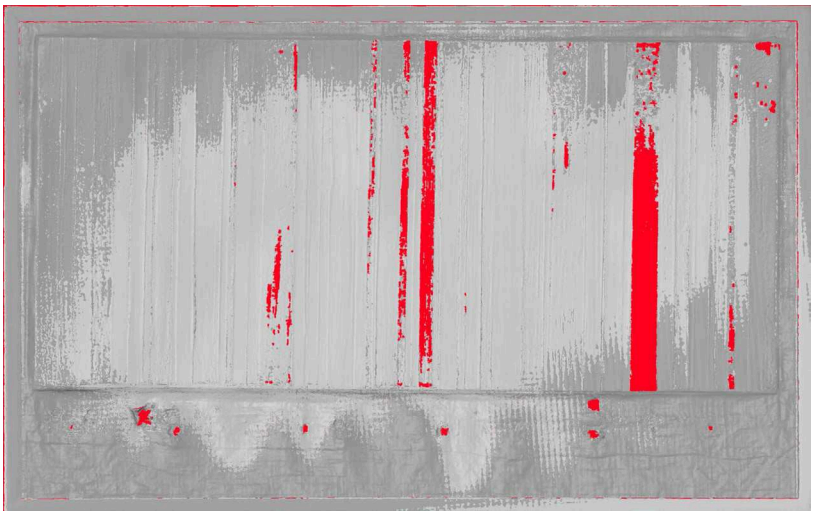




Beide virtuellen Modelle sind durch zahlreiche Messlücken gekennzeichnet die in Abhängigkeit zur Farbigkeit des Objektes stehen. Besonders dunkle Farbpartien könne nicht befriedigend digitalisiert werden.
Auf der folgenden Seite sind zur Ergänzung fehlender Bildinformationen den beiden aufeinander ausgerichteten virtuellen Modellen transformierte Fotos unterlegt.

Objekt: G_003 Benennung: Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 02.09.2014
3D_artscan	Seite 4 von 8

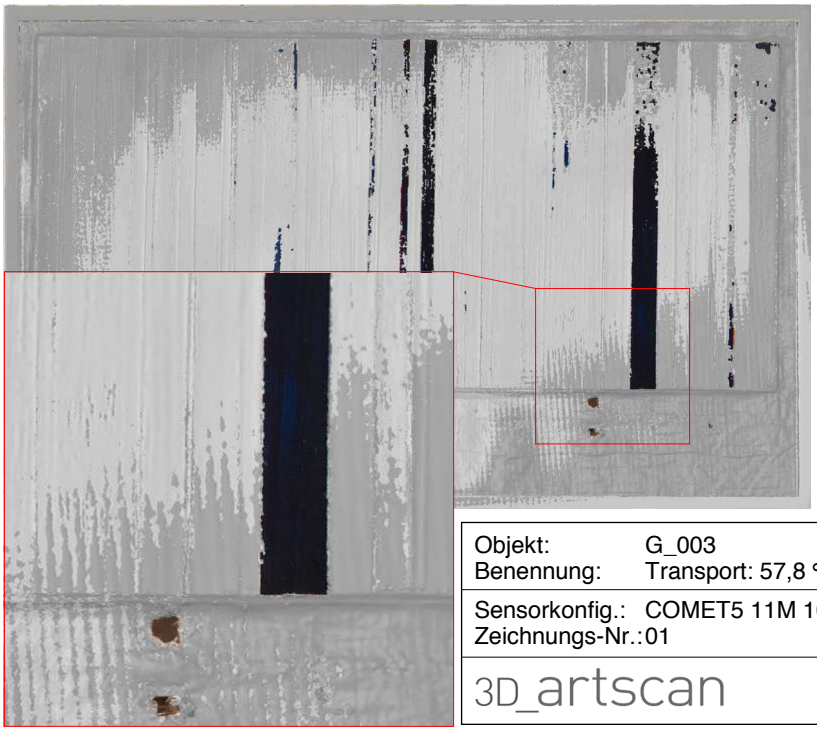
Abb. 221| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst



Die aufeinander ausgerichteten virtuellen Modelle mit rot markierten Messlücken (Bildbearbeitung mittels Photoshop).



Die oben rot markierten Messlücken sind im Rahmen einer Bildbearbeitung ausgeschnitten und mit dem Kamerabild des Sensors unterlegt worden (Grau-Stufen). Die Messlücken korrelieren mit der dunklen Farbigkeit des Untersuchungsgegenstandes.

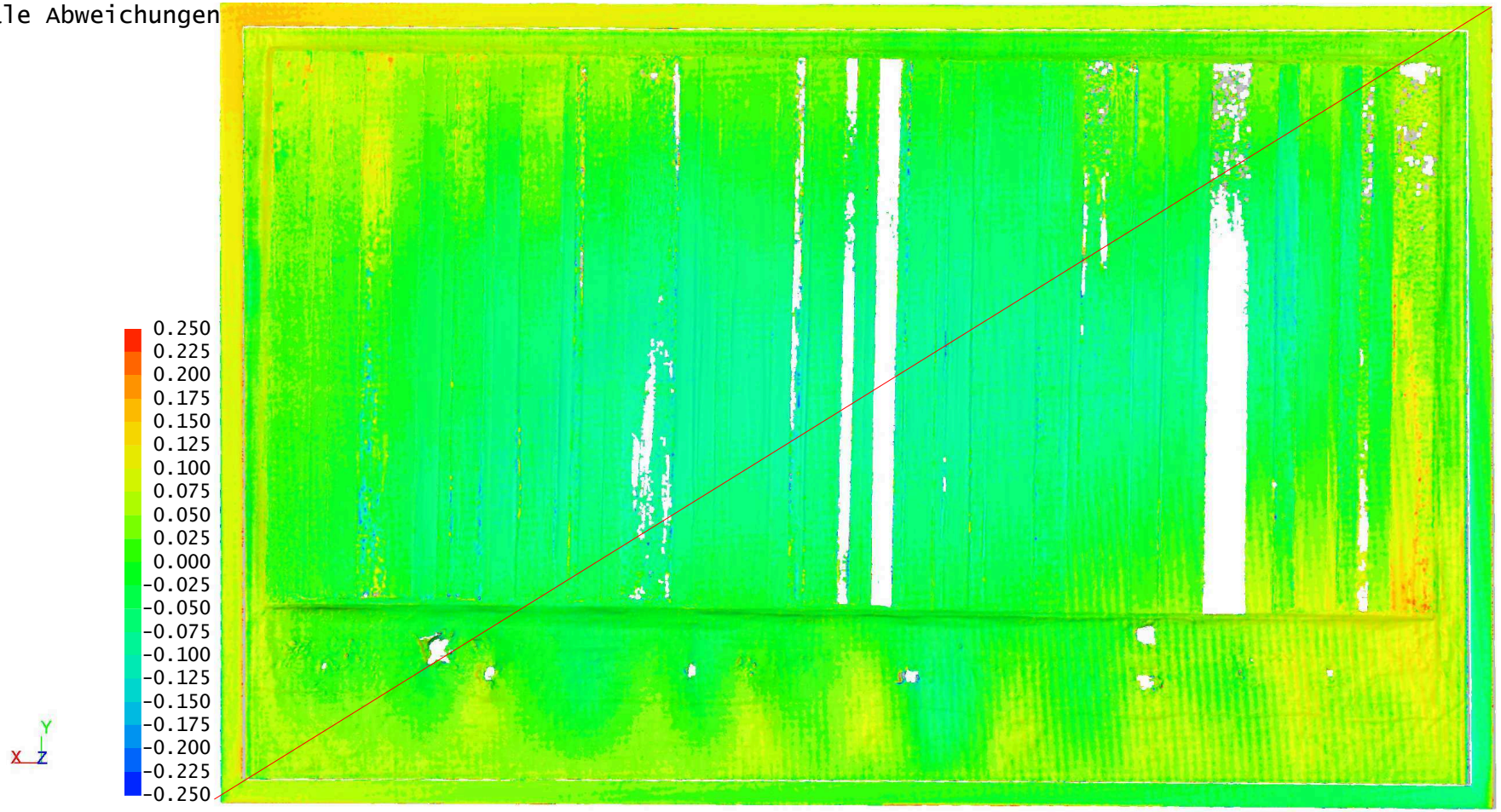


Bei der nebenstehenden Abbildung sind die Messlücken mit einem Farbfoto des Untersuchungsgegenstandes hinterlegt worden.

Objekt:	G_003	
Benennung:	Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 02.09.2014
3D_artscan		Seite 5 von 8

Abb. 222| Wiedergabe der Protokollseite 5 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst

Globale Abweichungen



Anhand der Falschfarbendarstellung sind zwischen den Soll- und den Ist-Daten sowohl lokale, als auch globale Abweichungen festzustellen. Hinsichtlich ihrer Größenordnung reichen diese über die gesamte Spannweite der Farbskala von 0,5 mm. Die visualisierte globale Abweichung lässt auf eine diagonalle Verkippung der beiden virtuellen Modelle schließen (Achse der Verkippunk ist rot eingezeichnet).

Objekt: G_003 Benennung: Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 02.09.2014
3D_artscan	Seite 6 von 8

Abb. 223| Wiedergabe der Protokollseite 6 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst

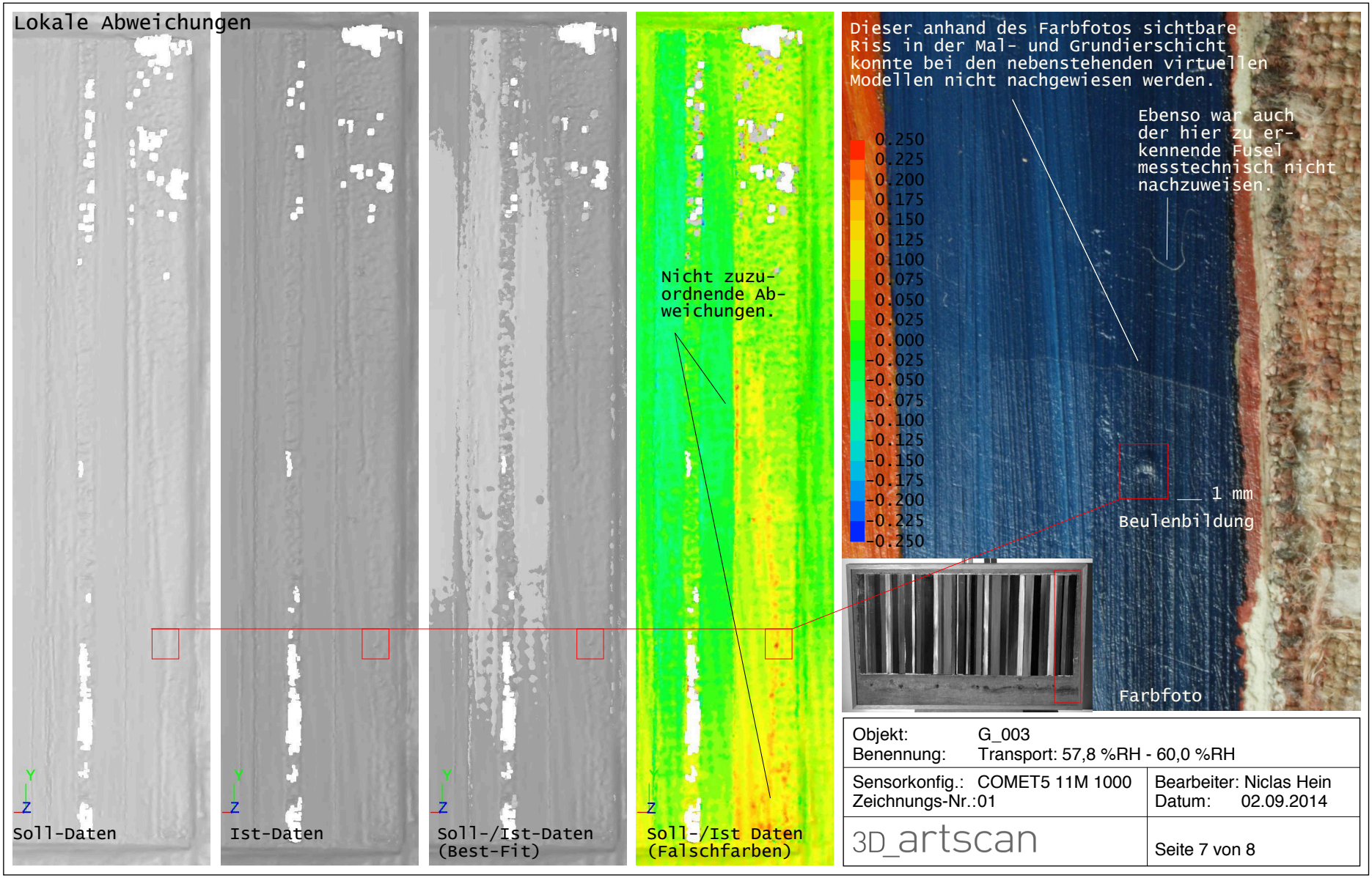
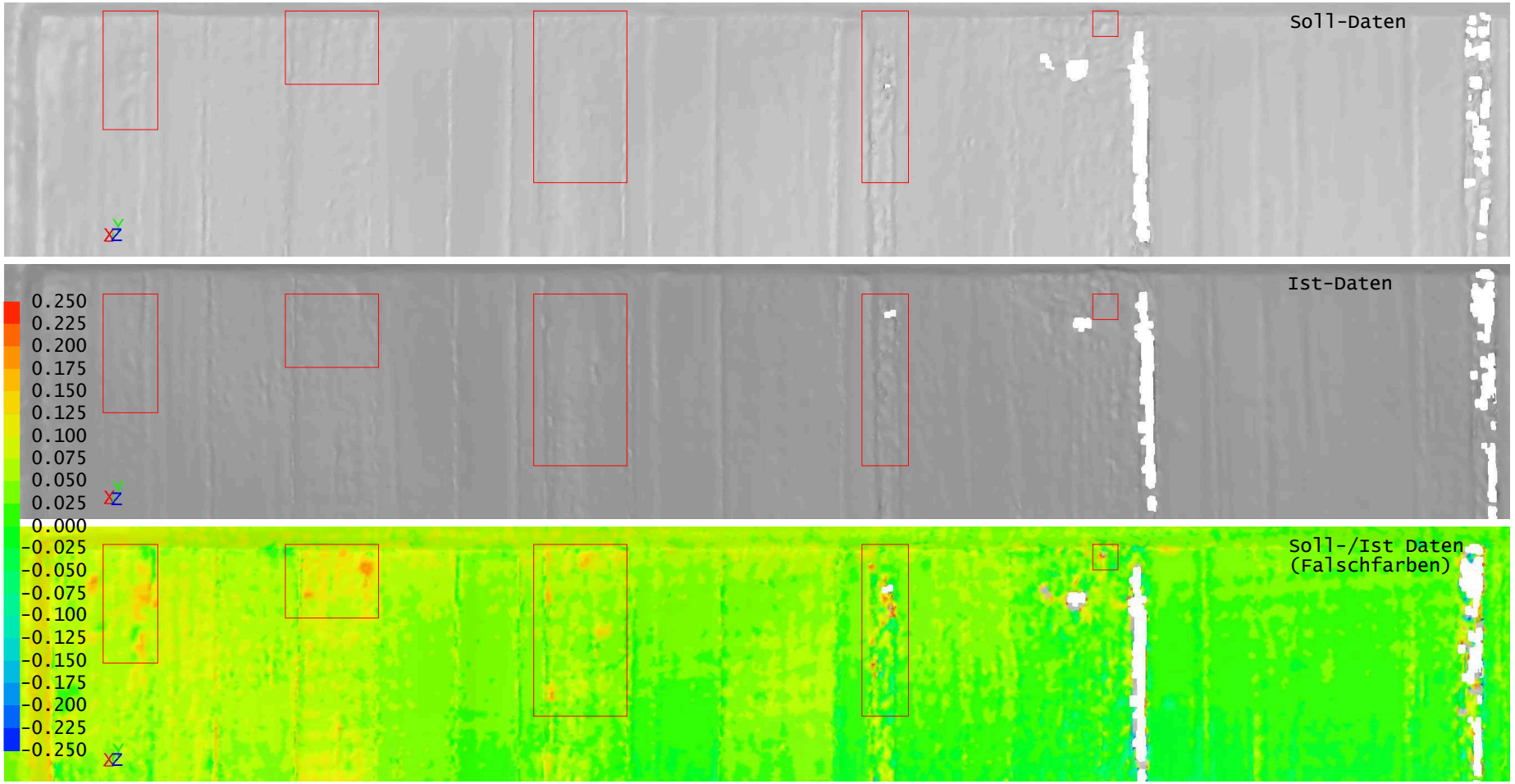
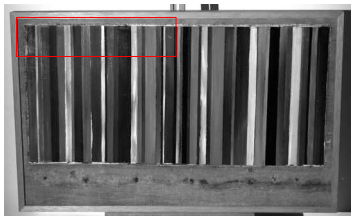
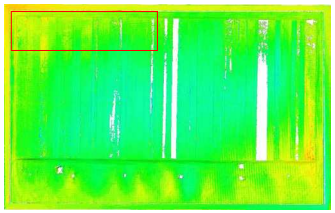


Abb. 224| Wiedergabe der Protokollseite 7 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst



Die Falschfarbendarstellung deutet auf lokal begrenzte Veränderungen hin, die während des Transportes entstanden sind. Die rot markierten Areale sind am Original überprüft worden, ließen jedoch in den entsprechenden Bereichen keine Anomalien erkennen.





Objekt:	G_003	
Benennung:	Transport: 57,8 %RH - 60,0 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 02.09.2014
3D_artscan		Seite 8 von 8

Abb. 225| Wiedergabe der Protokollseite 8 von V_ 218 ('G_003').
Quelle: Selbst

25.2 Gemäldetransport: Leinwandgemälde ('G_003' verglast, V_219)

In eine Weiterführung der Experimente zur Detektion etwaiger Transportfolgen wurde das Gemälde 'G_003' erneut transportiert. Um den Einfluss einer fachgerechten Verglasung ('Mirogard') und eines Rückseitenschutzes (säurefreier Karton, 3 mm Feinwelle) auf mögliche Objektveränderungen zu untersuchen wurde das Gemälde entsprechend präpariert. Die verwendeten Materialien sollen eine klimatische Pufferwirkung nach sich ziehen, sodass vergleichsweise geringere Diskrepanzen zwischen den Soll- und den Ist-Daten erwartet werden (►Abb. 226|).

Die Datenerhebung, sowie die Gliederung des hiesigen Experimentes folgt dem Vorbild des zuvor beschriebenen (►Tab. 63| und Tab. 64|), insofern sind auch die Eckdaten der das Klima protokollierenden Datenlogger zusammengefasst (►Tab. 61| und Tab. 62|). Auch die Verpackung orientiert sich an V_218.

Anzuführen sind folgende Transportereignisse:

- Digitalisierung (Museum A)
- Beginn der Protokollierung im Atelier (Museum A)
- Verpackung im Atelier (Museum A)
- Beginn Verladung durch Verlassen des Ateliers (Museum A)
- Verladung Parkplatz (Museum A)
- Beginn Transport (Auto)
- Ende Transport (Auto)
- Verladung Parkplatz (Museum B)
- Ankunft Ausstellungsraum (Museum B)
- Konditionierung an das Klima des Ausstellungsraumes (Museum B)
- Entpacken im Ausstellungsraum (Museum B)
- Ende der Protokollierung (Museum B)
- Digitalisierung (Museum B)

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Streifengemälde' (zu V_219)
(Logger_03_V16, außerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	22,37	72,18
	Min	18,19	49,01
	Spannweite	4,18	23,17
	Zeitraum	27:10:00	

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Streifengemälde' (zu V_219)
(Logger_03_V16, innerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	21,19	58,88
	Min	20,42	53,63
	Spannweite	0,76	5,24

Tab. 61| Zusammenfassung relevanter Eckdaten der Datenlogger zu V_219.
Quelle: Selbst

Versuchsreihe_16 (V_219)

Gemälde (Transport)	Messungs Nr.	Gemälde Nr.	Ortsbezogenes Umgebungsklima	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	Δ Temp., °C	RH., % (gemittelt, gerundet)	Δ RH., %	Spannweite Schwankung RH., % (zwischen Messungen, am Objekt)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.	Zeitraum Datenerhebung (Std.)
	M_742	G_003	Museum A	21,0	-0,5	53,7	5,4	5,2	Soll (V_219)	27,6
	M_743	G_003	Museum B	20,5		59,1			Ist (V_219)	

Tab. 62| Übersicht der durchgeführten Messungen von V_219.
Quelle: Selbst

Ergebnisse und Rückschlüsse zur Verfahrenseignung

Nach der 'Best-Fit-Ausrichtung' und dem folgenden Soll-Ist-Vergleich zur Beurteilung etwaiger Abweichungen zeigt sich bei den übereinander gelagerten 3D-Modellen bereits anhand der 'Viewer-Ansicht' das hohe Maß der Entsprechung (►Abb. 227|). Durch die Standard-Abweichung von 0,05402 mm wird der erste visuelle Eindruck quantitativ bestätigt. Auch die Falschfarbendarstellung liefert einen entsprechend eindeutigen Beweis (►Abb. 228| und Abb. 229|). So sind lediglich im unteren rechten Bereich der Malschicht in zunehmendem Maße globale Abweichungen zwischen den Datensätzen belegt. Sie können in negative Normalenrichtung mit -0,250 mm und in positive Normalenrichtung mit 0,250 mm quantifiziert werden. Aufschlussreich ist hierbei, dass die Diskrepanzen mit der Farbigkeit des Gemäldes korreliert. Beim blau-schwarzen Streifen am rechten Bildrand bestehen im Anschluss an den Transport Abweichungen in positive Normalenrichtung (0,200 mm). Die orange-rot ausgemischten Streifen weisen hingegen eine Soll-Ist-Differenz in negative Normalenrichtung auf (-0,225 mm). Erklärbar ist die Beobachtung nicht. Ungeachtet dessen, können die Ergebnisse des vorherigen Versuchs (V_218) verifiziert werden. So belegt auch hier die Bildgebung, dass tendenziell pastosere Partien einem größeren Veränderungspotenzial unterliegen als weniger reliefierte Bereiche. Eine optische Überprüfung jener Areale am Original, die anhand der Farbcodierung auf vorhandene Veränderungen rückschließen lassen, gewähren jedoch keine Anhaltspunkte zu transportbedingten Objektveränderung.
Gleichzeitig gibt das vorliegende Experiment Anlass, die Schutzwirkung einer Verglasung, sowie eines Rückseitenschutzes gegenüber Klimaschwankungen als positiv zu bewerten.

Metadaten und Messparameter (zu M_742)	
Objekt	G_003 (Streifen)
Benennung	ach dem Transp trbei 53
Datum	05.09.2014
Sens knfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	4/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	3 Stufen
	1. Messbild	150
	2. Messbild	600
	3. Messbild	1000
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCSMde	off
	Eperteneinstellungen	
	Qualität	HighQualit
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennacherarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	ulässige Teranz f die ausdnnung (mm)	0,0225
	ulässige Teranz f die auschreduzierung (mm)	00200
	ulässige Teranz f die Ausdnnung (mm)	00200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	10000
	Anzahl Knotenpunkte	952.397
	Anzahl Dreiecke	1.84.214
	Oberfläche (mm^2)	211.140.134
	Dateigröße (KB)	43.983

Tab. 63| Metadaten Soll-Daten (V_219).
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter (zu M_743)	
Objekt	G_003 (Streifen)
Benennung	Nach dem Transport bei 59,1 %RH
Datum	06.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	4/90°
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	3 Stufen
	1. Messbild	150
	2. Messbild	600
	3. Messbild	1000
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	397.079
	Anzahl Dreiecke	745.659
	Oberfläche (mm^2)	212.831.979
	Dateigröße (MB)	440.219

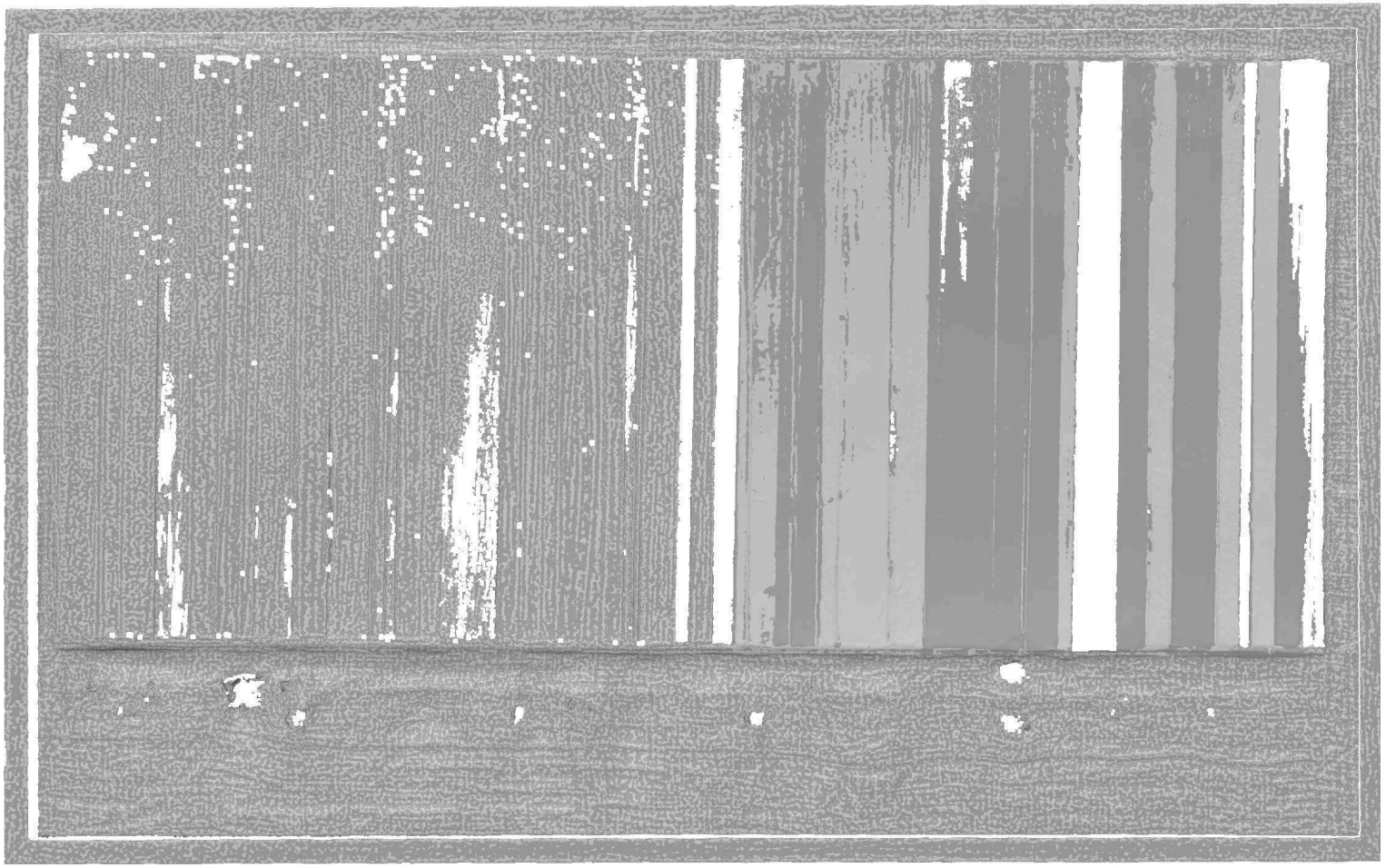
Tab. 64| Metadaten Ist-Daten (V_219).
Quelle: Selbst

Versuch: V_219 (Transport, verglast)
G_003 am 05.09.2014 bei 53,7 %RH (M_742)
G_003 am 06.09.2014 bei 59,1 %RH (M_743)
Diskrepanz der relativen Feuchte: 5,4 %RH,
bei einer Spannweite von 23,2 %RH über einen Zeitraum von 27,6 h



Objekt:	G_003 (verglast)		
Benennung:	Transport: 53,7 %RH - 59,1 %RH		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	06.09.2014
3D_artscan		Seite 1 von 4	

Abb. 226| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 219 ('G_003').
Quelle: Selbst





G_003 bei 53,7 %RH (Soll-Daten)

G_003 bei 59,1 %RH (Ist-Daten)

Standard-Abweichung:	0.0540214
Mittlere Abweichung:	0.0000005
Kleinste Abweichung:	-1.4520910
Größte Abweichung:	1.6224749

Objekt:	G_003 (verglast)	
Benennung:	Transport: 53,7 %RH - 59,1 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 06.09.2014
3D_artscan		Seite 2 von 4

Abb. 227| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_ 219 ('G_003').
Quelle: Selbst

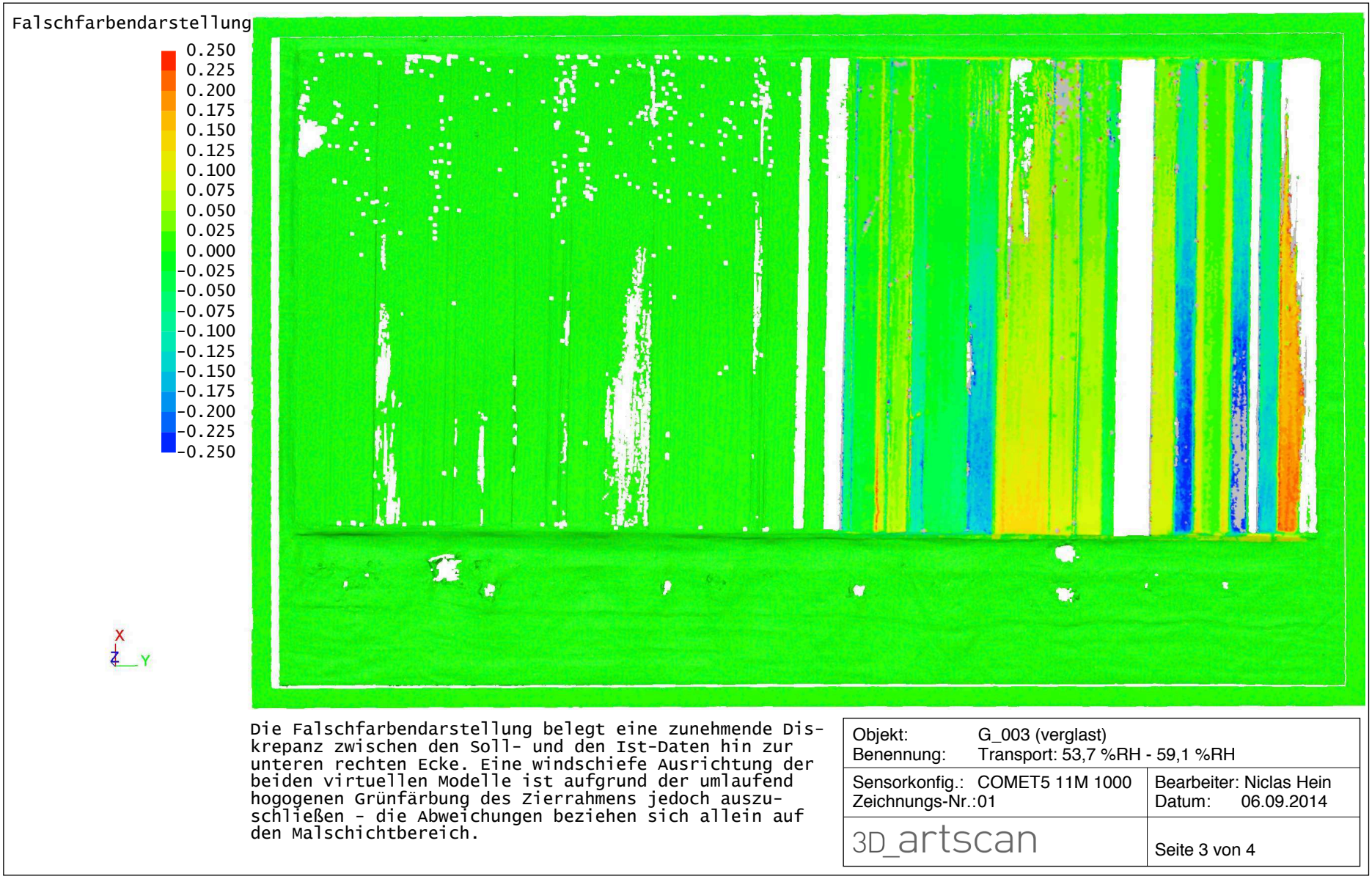
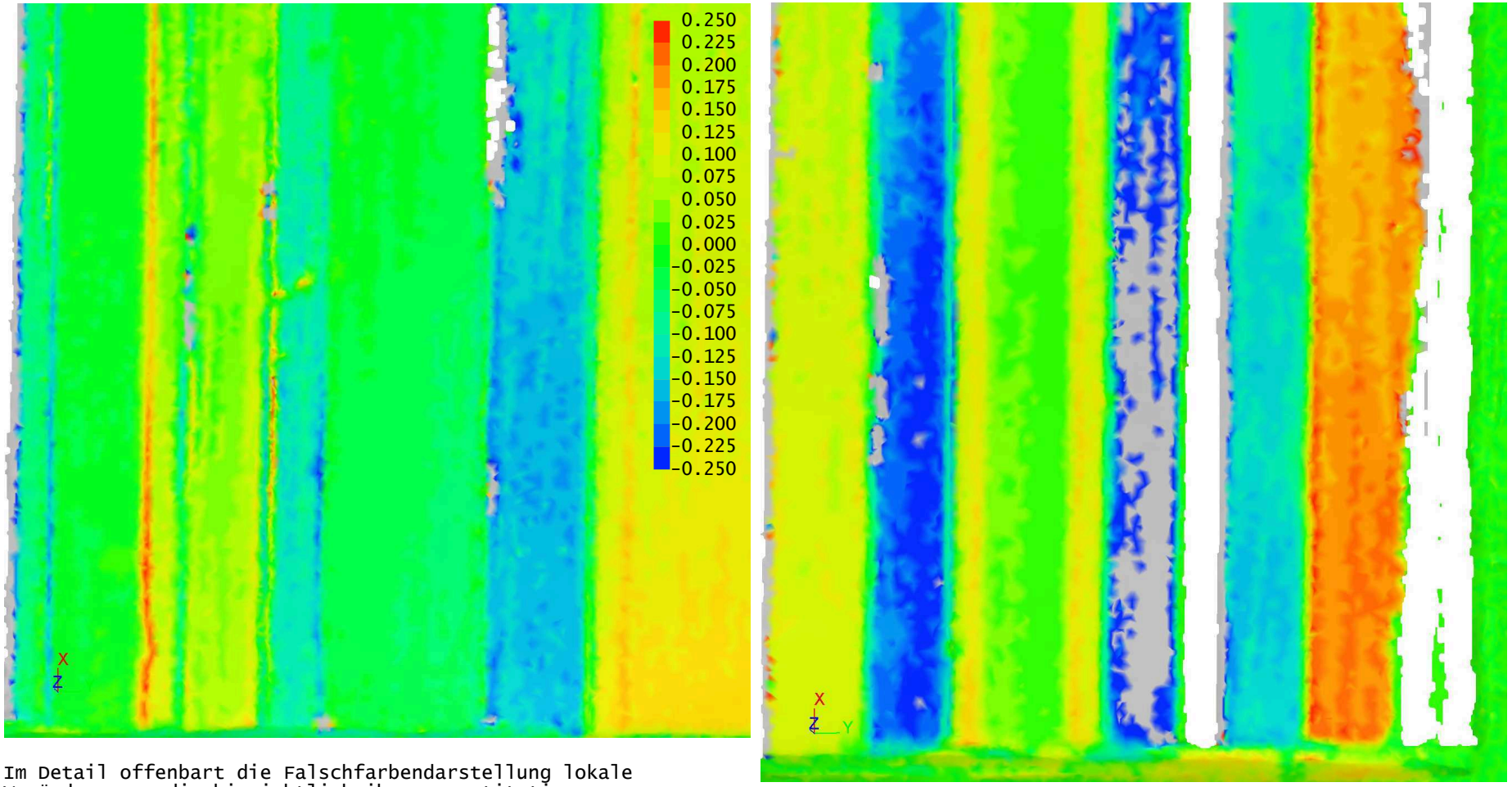
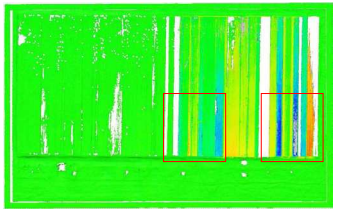


Abb. 228| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_ 219 ('G_003').
Quelle: Selbst



Im Detail offenbart die Falschfarbendarstellung lokale Veränderungen die hinsichtlich ihrer quantitativen Ausprägung mit der Farbigkeit korrelieren. Darüber hinaus sind tendenziell pastose Partien einem größeren Veränderungspotential unterworfen als weniger reliefierte Bereiche. Bei einer visuellen Überprüfung jener Stellen am Original, die sich bei der Falschfarbendarstellung durch signifikante Abweichungen hervortuen (orange-rote und blaue Färbung), können keine Objektveränderungen attestiert werden.



Objekt:	G_003 (verglast)	
Benennung:	Transport: 53,7 %RH - 59,1 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 06.09.2014
3D_artscan		Seite 4 von 4

Abb. 229| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_ 219 ('G_003').
Quelle: Selbst

25.3 Gemäldetransport: Holztafelgemälde ('G_004', V_220)

Zugunsten einer weiteren Systemevaluierung erfolgte ein Kunsttransport der eingangs erwähnten Holztafel ('G_004' ►Abb. 230|). Die Datenerhebung, sowie der Ablauf des Experimentes folgten dem Vorbild der zuvor beschriebenen. Insofern sind auch die Eckdaten der das Klima protokollierenden Datenlogger zusammengefasst (►Tab. 65| und Tab. 66|). Aufgrund der Größe des Untersuchungsgegenstandes wurde sich jedoch für den Einsatz der hochauflösenden Sensorvariante 'COMET 5 11M 80' entschieden. Unter Anwendung der Matching-Strategie 'Freies Flächen Matching' erfolgte die Digitalisierung des Vorzustandes über 21 Einzelaufnahmen und die des Nachzustandes über 19 Einzelaufnahmen.
Die Metadaten sind wie üblich dem Protokoll vorangestellt und am angegebenen Ort einsehbar (►Tab. 67| und Tab. 68|).
Anzuführen sind folgende Transportereignisse:

- Digitalisierung (Museum A)
- Beginn der Protokollierung im Atelier (Museum A)
- Verpackung im Atelier (Museum A)
- Beginn Verladung durch Verlassen des Ateliers (Museum A)
- Verladung Parkplatz (Museum A)
- Beginn Transport (Auto)
- Ende Transport (Auto)
- Verladung Parkplatz (Museum B)
- Ankunft Ausstellungsraum (Museum B)
- Konditionierung an das Klima des Ausstellungsraumes (Museum B)
- Entpacken im Ausstellungsraum (Museum B)
- Ende der Protokollierung (Museum B)
- Digitalisierung (Museum B)

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Holztafel' (zu V_220)
(Logger_03_V17, außerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	25,39	66,74
	Min	21,11	50,58
	Spannweite	4,28	17,65
	Zeitraum	33:15:00	

Plot-Titel:
1.) Klimaprotokoll
'Streifengemälde' (zu V_220)
(Logger_02_V17, innerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	24,32	68,74
	Min	21,04	66,02
	Spannweite	3,28	2,72

Tab. 65| Zusammenfassung relevanter Eckdaten der Datenlogger zu V_220.
Quelle: Selbst

Versuchsreihe_17 (V_220)

Messungs Nr.	Gemälde Nr.	Ortsbezogenes Umgebungsklima	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	Δ Temp., °C	RH., % (gemittelt, gerundet)	Δ RH., %	Spannweite Schwankung RH., % (zwischen Messungen, am Objekt)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.	Zeitraum Datenerhebung (Std.)
M_744	G_004	Museum A	21,1	0,8	67,4	-5,8	2,7	Soll (V_220)	33,2
M_745	G_004	Museum B	21,9		61,6			Ist (V_220)	

Gemälde (Transport)

Tab. 66| Übersicht der durchgeführten Messungen von V_220.
Quelle: Selbst

Ergebnisse und Rückschlüsse zur Verfahrenseignung

Auch bei diesem Experiment ergeben sich verfahrensspezifische Probleme bei der Datenerhebung. Aufgrund der geringen Oberflächentextur müssen zur teilautomatischen Funktion: 'Freies Flächen Matching', verhältnismäßig große Überlappbereiche gewährleistet werden. Diese werden vom Autor mit <25 % geschätzt. Hieraus resultiert ein gesteigerter Messaufwand. Sowohl bei der Optimierung und Weiterverarbeitung der 3D-Daten, als auch bei der Bearbeitung der Projektdateien zeigen sich mit dem zugrundeliegenden Versuch die Grenzen der Berechnungsfähigkeit. Die 'INSPECTplus-Datei' weist nach Fertigstellung der Versuchsauswertung eine Dateigröße von 8,6 GB auf. Die Rechenoperationen in 'INSPECTplus' nehmen daher geraume Zeit in Anspruch und summieren sich umfangreich auf.[657]

Nach erfolgreicher Berechnung zeigt sich sowohl anhand der 'Viewer-Ansicht', als auch bei der Falschfarbendarstellung im Gesamten ein vergleichsweises homogenes Bild, was auf geringe Soll-Ist-Diskrepanzen rückschließen lässt (►Abb. 231|). Die fein aufgelöste Farbcodierung offenbart Diskrepanzen zwischen den Zustandsmodellen, die auf 'Matching'-Differenzen zurückgeführt werden können. Quantitativ wird die globale Abweichung zwischen den Datensätzen mit einer Standardabweichung von 0,00636 mm angegeben. Entscheidend sind bei der Edition der 'Best-Fit-Ausrichtung' weiterhin jedoch die Werte: kleinste Abweichung mit -0,59419 mm und größte Abweichung mit 0,069630 mm. Im Gegensatz zur Bildgebung lassen diese auf signifikantere Abweichungen rückschließen. Bei einer detaillierten Soichtprüfung und Auswertung der Falschfarbendarstellung zeigt sich im linken, oberen Randbereich eine lokal begrenzte Veränderung in Form einer aufstehenden Scholle. Diese ist mit einer Aufwerfung von 0,250 mm in positive Normalenrichtung zu quantifizieren (►Abb. 232|).[658] Eine vorhandene Imperfektion wurde trotz gründlicher Begutachtung des Objektes vor der Verpackung nicht bemerkt. Ebenso belegt auch das Vorzustandsmodell im forcierten Bereich keine Anomalie. Erst durch die numerische Edition der Soll-Ist-Differenz und der teilautomatisierten Hervorhebung durch die Falschfarbendarstellung gelingt die objektive Merkmalsidentifikation. Nach der erneuten Inaugenscheinnahme des betreffenden Areals im Anschluss an den Transport ist die Veränderung am Original bemerkbar. Um das Potenzial der Untersuchungsmethode herauszustellen ist modellhaft eine Kartierung der Veränderung auf Basis des Kamerabildes erstellt worden. Über die magentafarbende Schraffur ist die Imperfektion dokumentiert (►Abb. 233|). Neben den bisher beschriebenen Veränderungen belegt sich die Präzision der Untersuchungsmethode im Weiteren durch die Bildgebung eines kleinen textilen Faserstücks auf der Malschichtoberfläche (►Abb. 236|). Die Bestimmung über virtuelle Messschieber gibt eine Länge von 2,117 mm an.

657 Für die Berechnung, die vollständige Auswertung der beiden Datensätze und die Zusammenstellung der Ergebnisse zum Messprotokoll wurden 8,5 Stunden benötigt.

658 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges weist das beschriebene Veränderungsmerkmal, seinem Spezifikum nach, Grundzüge des Schadensbildes: Dachförmig aufstehende Malschicht, Abblättern der Malschicht (Merkmal 08) auf.

Metadaten und Messparameter (zu M_744)	
Objekt	G_004 (Monochrome)
Benennung	Vor dem Transport bei 67,4 %RH
Datum	09.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	21
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	400
	2. Messbild	800
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0030
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0050
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0025
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,2000
	Anzahl Knotenpunkte	14.383.452
	Anzahl Dreiecke	28.728.786
	Oberfläche (mm^2)	38.219.580
	Dateigröße (KB)	673.783

Tab. 67| Metadaten Soll-Daten (V_220).
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter (zu M_745)	
Objekt	G_004 (Monochrome)
Benennung	Nach dem Transport bei 61,6 %RH
Datum	10.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	19
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	400
	2. Messbild	800
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0030
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0050
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0025
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,2000
	Anzahl Knotenpunkte	15.086.177
	Anzahl Dreiecke	30.134.343
	Oberfläche (mm^2)	38.247.170
	Dateigröße (KB)	706.724

Tab. 68| Metadaten Ist-Daten (V_220).
Quelle: Selbst

Versuch: V_220 (Transport)
G_004 am 09.09.2014 bei 67,4 %RH (M_744)
G_004 am 10.09.2014 bei 61,6 %RH (M_745)

Diskrepanz der relativen Feuchte: 5,8 %RH,
bei einer Spannweite von 17,6 %RH über einen Zeitraum von 33,25 h



Objekt: G_004 Benennung: Transport: 67,4 %RH - 61,6 %RH	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 10.09.2014
3D_artscan	Seite 1 von 7

Abb. 230| Foto der Vorder- und Rückseite von 'G_004'. Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 220.
Quelle: Selbst

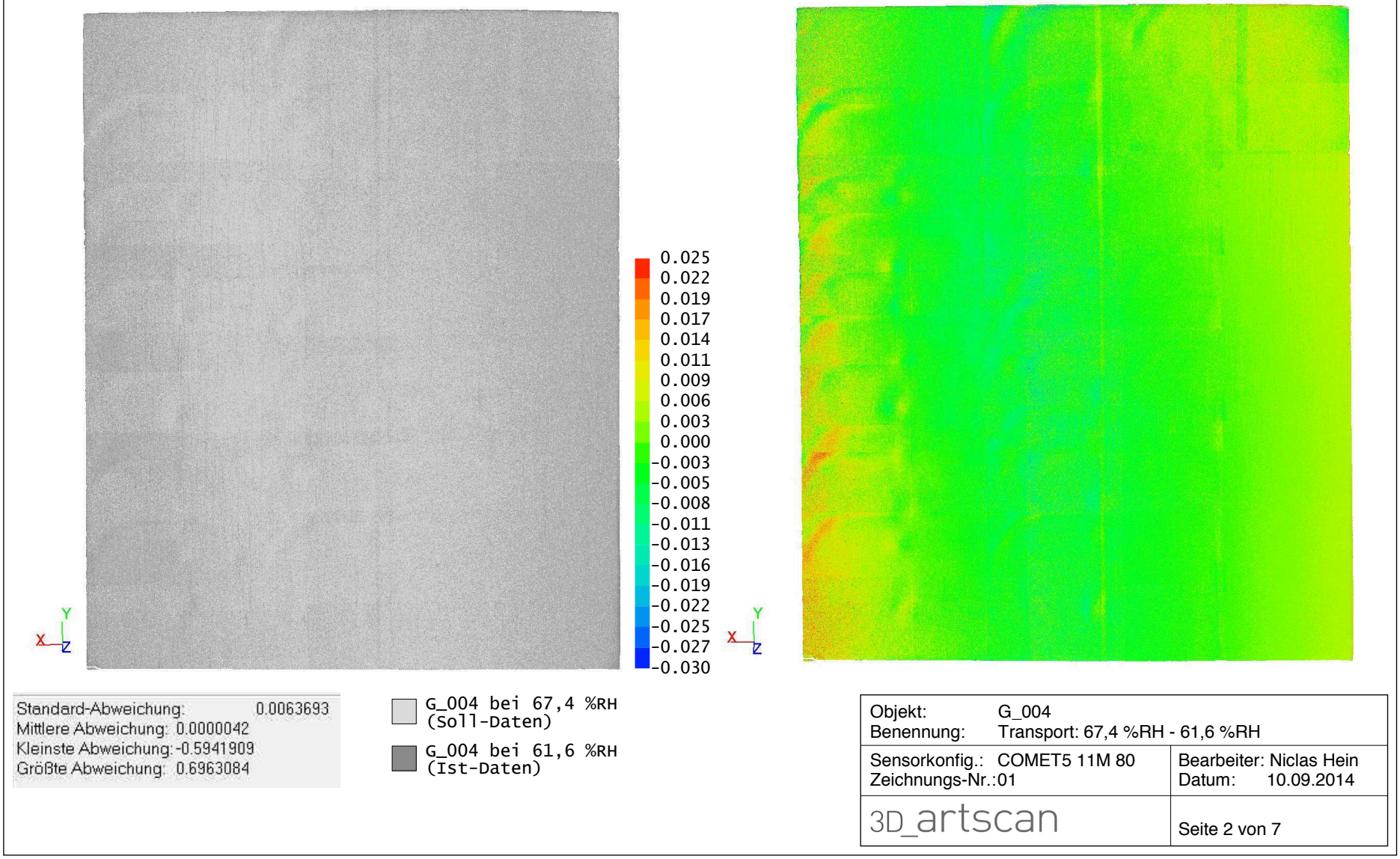
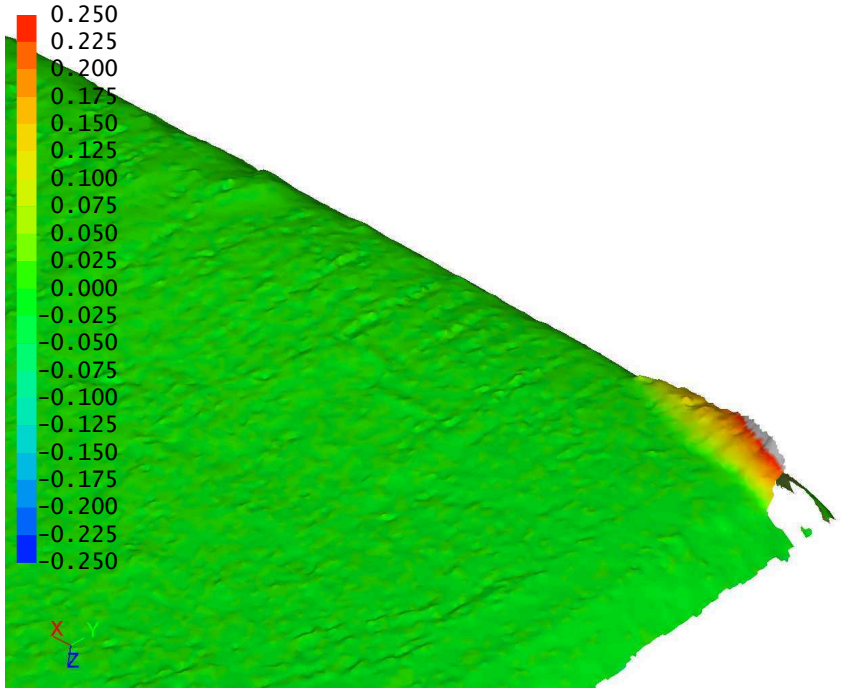
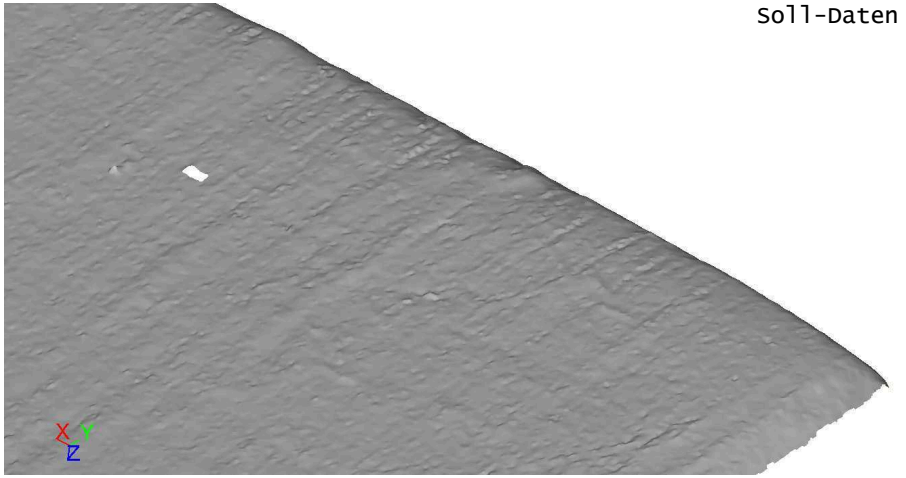


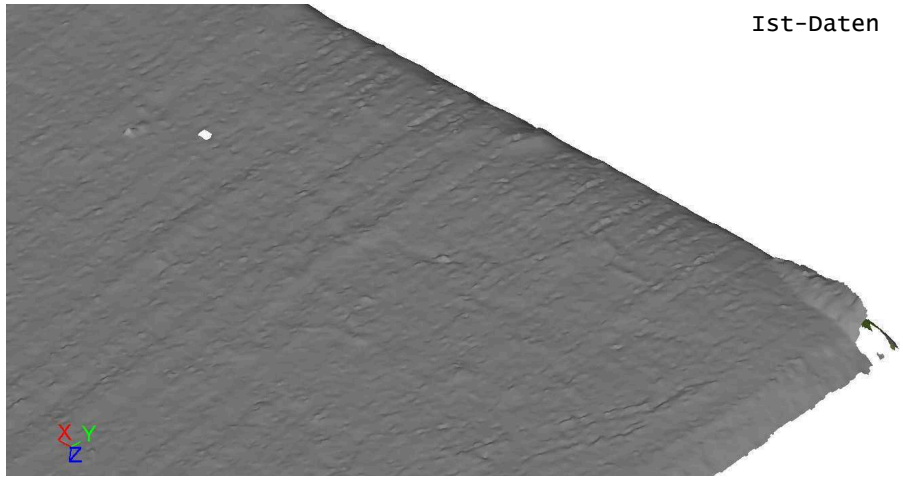
Abb. 231| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst



Die Falschfarbendarstellung auf der vorherigen Seite zeigt im Globalen vergleichsweise geringfügige Diskrepanzen zwischen den Soll- und den Ist-Daten. Der Tendenz nach gibt die dort gezeigte Abbildung einen Hinweis auf eine konkave Verwölbung der Holztafel als Folge des Transportes.

Wie die Abbildungen dieser Seite zeigen sind im Randbereich Verwerfungen in weitaus größerem Ausmaß belegt (in +Z-Richtung). Beim Vergleich der Ist-Daten mit den Soll-Daten ist eine Veränderung der Grundier- und Malschicht in der oberen rechten Ecke des Objektes erwiesen.







Objekt:	G_004		
Benennung:	Transport: 67,4 %RH - 61,6 %RH		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	10.09.2014
3D_artscan		Seite 3 von 7	

Abb. 232| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst

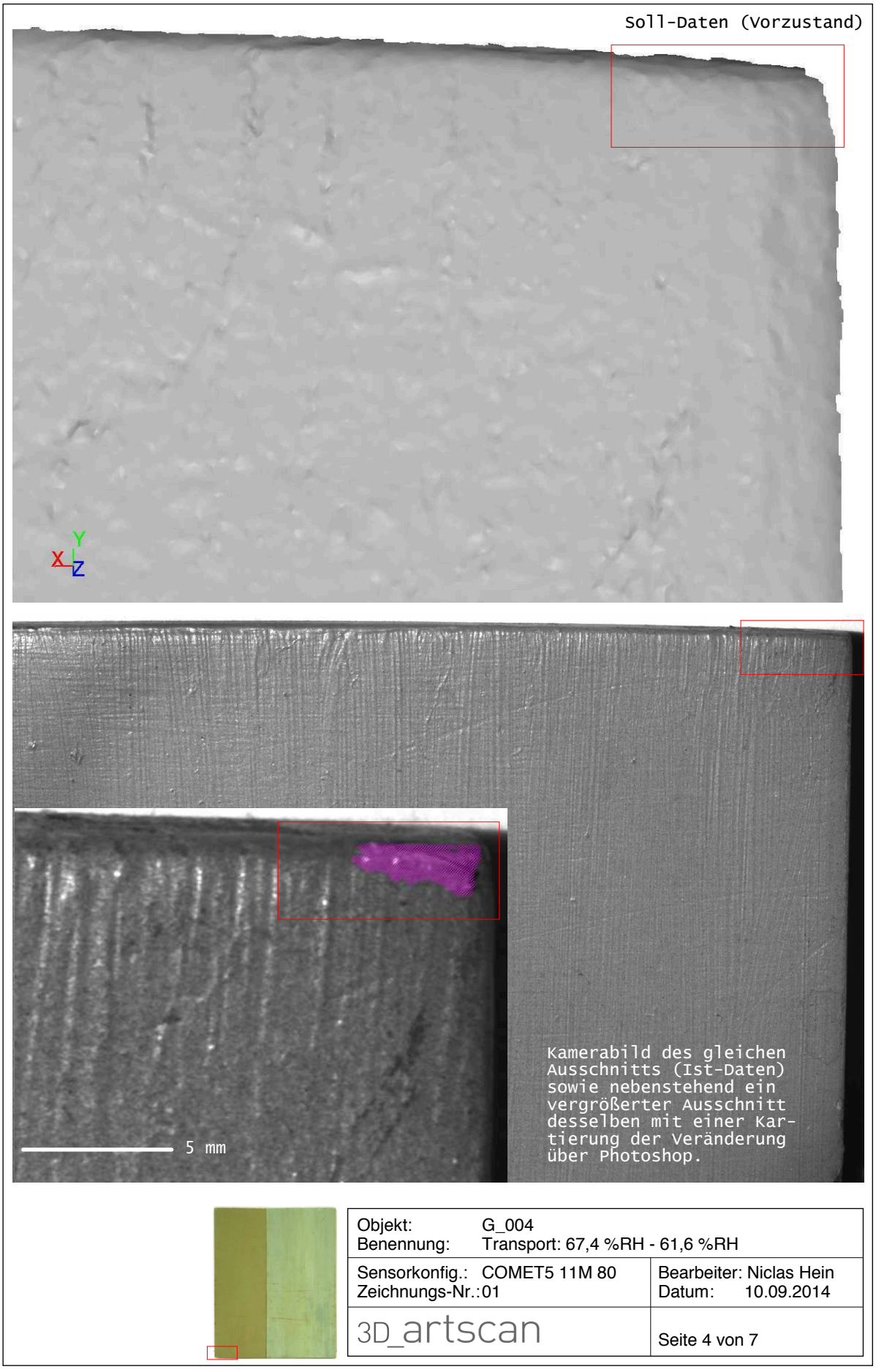
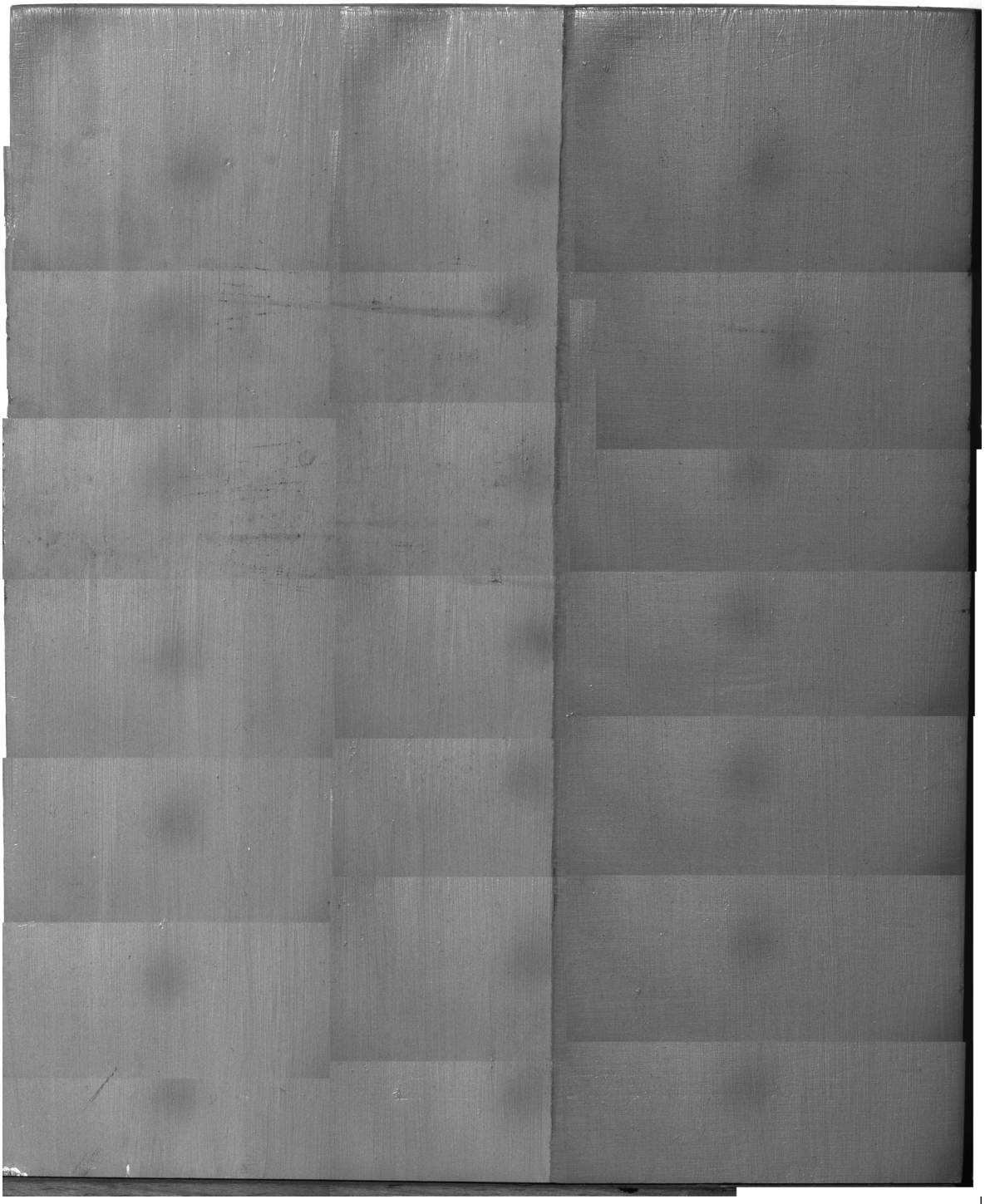


Abb. 233| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst

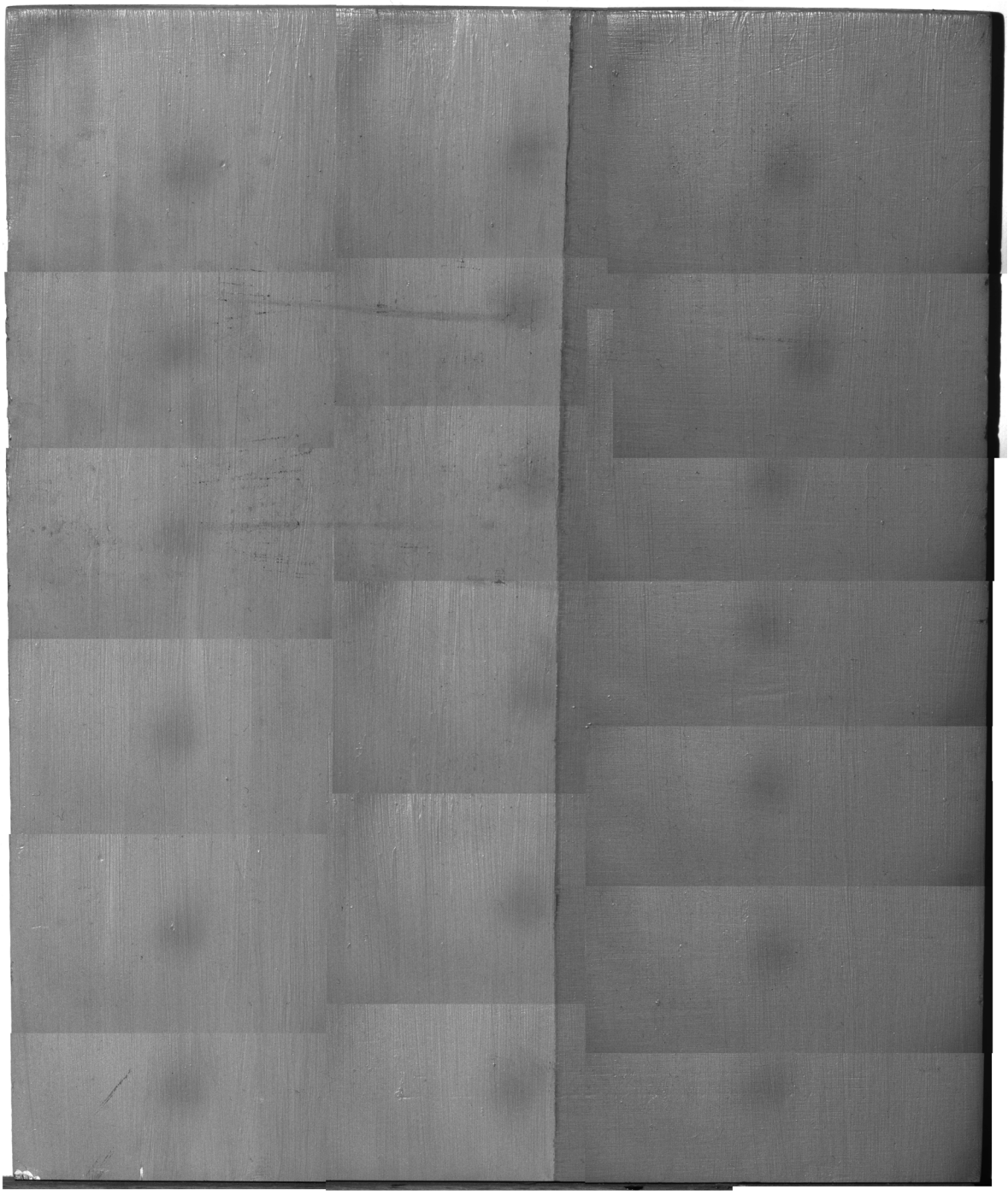
Die zur Gesamtaufnahme zusammengefügten Kamerabilder des Sensors (Vorzustand).



Objekt:	G_004	
Benennung:	Transport: 67,4 %RH - 61,6 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 10.09.2014
3D_artscan		Seite 5 von 7

Abb. 234| Wiedergabe der Protokollseite 5 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst

Die zur Gesamtaufnahme zusammengefügten Kamerabilder des Sensors (Nachzustand).



Objekt:	G_004		
Benennung:	Transport: 67,4 %RH - 61,6 %RH		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	10.09.2014
3D_artscan		Seite 6 von 7	

Abb. 235| Wiedergabe der Protokollseite 6 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst

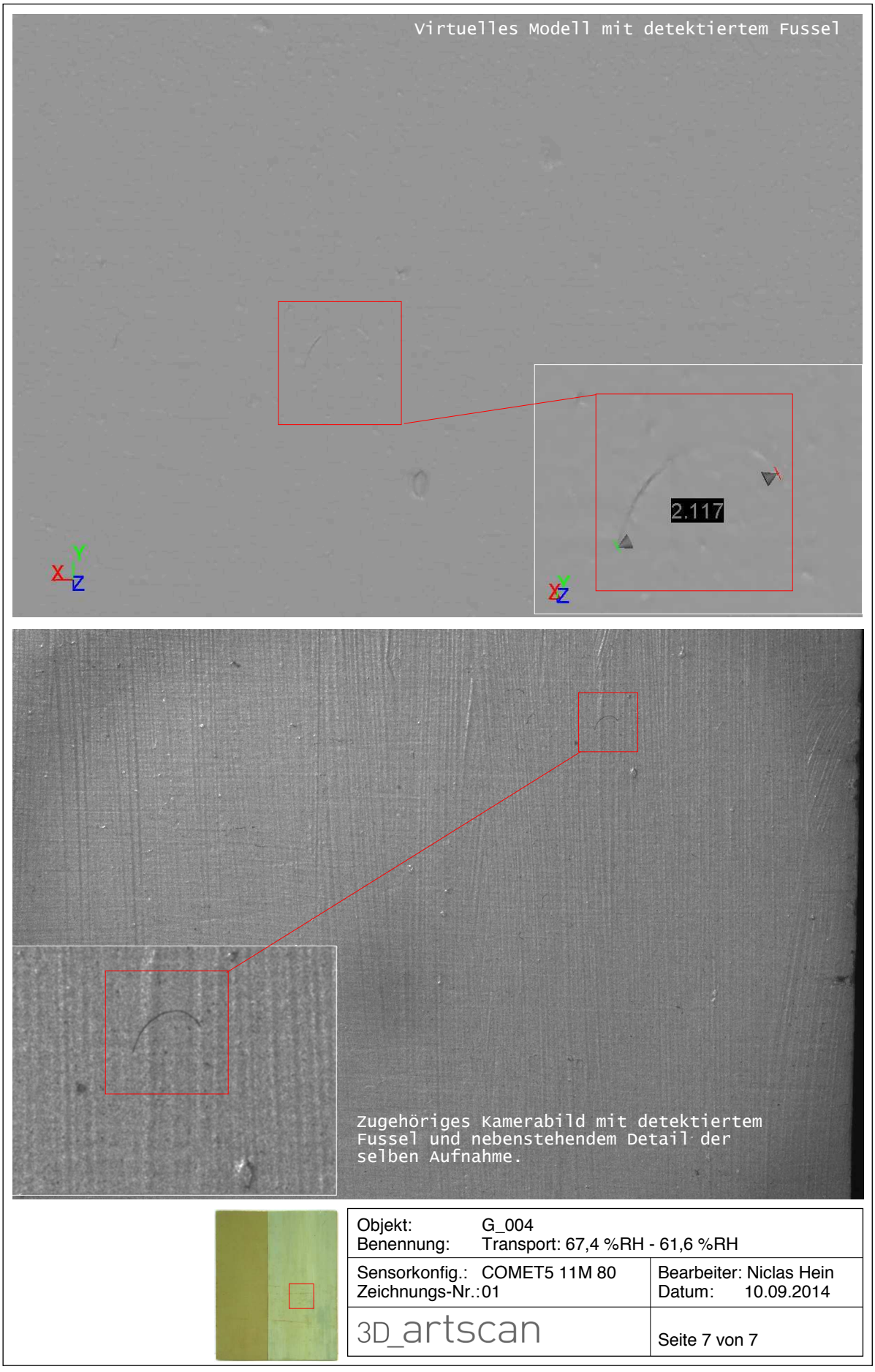


Abb. 236| Wiedergabe der Protokollseite 7 von V_ 220 ('G_004').
Quelle: Selbst

25.4 Gemäldetransport: Holztafelgemälde ('G_004', V_221)

Vom restauratorieschen Standpunkt aus beurteilt wird die im vor-herigen Experiment durch das Streifenprojektionsverfahren nachgewiesene Veränderung als so nachteilig bewertet, dass die Holztafel ohne eine vorherige Festigung im musealen Kontext nicht weiter transportiert worden wäre. Die Negierung wird aus dem Erfahrungswissen legitimieren – unter der prognostischen Annahme weiter fortschreitender, nachteiliger Veränderungen. Zur Überprüfung dieser Annahme wird sich jedoch bewusst für einen erneuten Transport des Objektes und die Digitalisierung mit dem 'COMET-System' entschieden.
Die Datenerhebung, sowie die Gliederung des hiesigen Experimentes folgt dem Vorbild der zuvor beschriebenen insofern sind auch die Eckdaten der das Klima protokollierenden Datenlogger zusammengefasst (►Tab. 69| und Tab. 70|).
Folgende Transportereignisse sind aufzuführen:

- Digitalisierung (Museum A)
- Beginn der Protokollierung im Atelier (Museum A)
- Verpackung im Atelier (Museum A)
- Beginn Verladung durch Verlassen des Ateliers (Museum A)
- Verladung Parkplatz (Museum A)
- Beginn Transport (Auto)
- Ende Transport (Auto)
- Verladung Parkplatz (Museum B)
- Ankunft Ausstellungsraum (Museum B)
- Konditionierung an das Klima des Ausstellungsraumes (Museum B)
- Entpacken im Ausstellungsraum (Museum B)
- Ende der Protokollierung (Museum B)
- Digitalisierung (Museum B)

1.) Klimaprotokoll 'Holztafel' (zu V_221)
(Logger_03_V17, außerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	19,32	61,58
	Min	18,04	53,36
	Spannweite	1,28	9,95
	Zeitraum	28:30:00	

1.) Klimaprotokoll 'Streifengemälde' (zu V_221)
(Logger_02_V17, innerhalb der Verpackung)

Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %
	Extremwerte	Temp., °C	RH, %
	Max	20,11	64,92
	Min	17,85	58,64
	Spannweite	2,26	6,28

Tab. 69| Zusammenfassung relevanter Eckdaten der Datenlogger zu V_221.
Quelle: Selbst

Versuchsreihe_17 (V_221)

Gemälde (Transport) Messungs Nr.	Gemälde Nr.	Ortsbezogenes Umgebungsklima	Temp., °C (gemittelt, gerundet)	Δ Temp., °C	RH., % (gemittelt, gerundet)	Δ RH., %	Spannweite Schwankung RH., % (zwischen Messungen, am Objekt)	Sol-/Ist-Datensatz, Zuweisung Versuchs Nr.	Zeitraum Datenerhebung (Std.)
M_746	G_004	Museum A	19,3	-1,2	53,4	7,8	6,3	Soll (V_221)	28,5
M_747	G_004	Museum B	18,2		61,2			Ist (V_221)	

Tab. 70| Übersicht der durchgeführten Messungen von V_221.
Quelle: Selbst

Ergebnisse und Rückschlüsse zur Verfahrenseignung

Grundsätzlich belegt die Auswertung, dass die Soll- und die Ist-Daten im Anschluss an die 'Best-Fit-Ausrichtung', global betrachtet, eine verhältnismäßig homogene Durchdringung aufweisen. Dieses stützt sich durch die 'Viewer-Ansicht': homogene Verteilung der beiden Grauwerte (►Abb. 237|). Die Falschfarbendarstellung verifiziert dieses analog durch Grünfärbung. Darüber hinaus belegt auch die Edition der 'Best-Fit-Ausrichtung', dass gemäß der Standard-Abweichung von 0,00398 mm keine nennenswerten Diskrepanzen zwischen den Zustandsmodellen bestehen. Die Werte kleinste Abweichung mit -1,05439 mm, und größte Abweichung mit 0,70345 mm, legen jedoch abermals eine signifikantere, lokal begrenzte Soll-Ist-Abweichung nahe. Im Bereich der zuvor nachgewiesenen Imperfektion wird dieses augenscheinlich. Über die Falschfarbendarstellung ist hier ein eindeutiger Transportschaden nachweisbar. Die im Vorzustand dokumentierte, aufstehende Malschichtscholle ist durch den erneuten Objekttransport abgefallen. Verbleibend ist eine Fehlstelle – über virtuelle Messschieber quantifizierbar mit ca. 2,0 x 0,5 mm (►Abb. 238|).[659] Die massive Veränderung kann bei geeignetem Vergrößerungsfaktor und Blickwinkel eindeutig auch beim Ist-Datensatz belegt werden. Besonders anschaulich ist dieses über die geteilte 'Viewer-Ansicht' in einer direkten Gegenüberstellung mit dem Soll-Datensatz.

Zur Veranschaulichung einer Entwicklungsperspektive des Verfahrens wird, mithilfe der Bildbearbeitungs-Software 'Photoshop', eine Kartierung des Transportschadens vorgenommen (►Abb. 239|). Als Basis dient hierbei das zugehörige Weißlicht-Kamerabild des betreffenden Areales. Obgleich die Kartierung aufgrund der derzeitigen technischen Möglichkeiten eine rein zweidimensionale ist, wird damit der traditionellen Vorgehensweise bei der Dokumentation von Transportschäden entsprochen. Zugleich skizziert sich damit die Notwendigkeit der Übertragung dieser Strategie auf die 3D-Datensätze – insbesondere hinsichtlich des forcierten Einsatzes der Untersuchungsmethode im musealen Bereich.

25.5 Zusammenfassung der Ergebnisse (VR16-

659 Gemäß der Klassifikation des Schadenskataloges weist das beschriebene Veränderungsmerkmal, seinem Spezifikum nach, Grundzüge des Schadensbildes: Scholle (Kategorie 21) auf.

Metadaten und Messparameter (zu M_746)	
Objekt	G_004 (Monochrome)
Benennung	Nach dem Transport bei 53,4 %RH
Datum	13.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	19
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	400
	2. Messbild	800
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0030
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0050
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0025
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,2000
	Anzahl Knotenpunkte	15.086.177
	Anzahl Dreiecke	30.134.343
	Oberfläche (mm^2)	38.247.170
	Dateigröße (KB)	706.724

Tab. 71| Metadaten Soll-Daten (V_221).
Quelle: Selbst

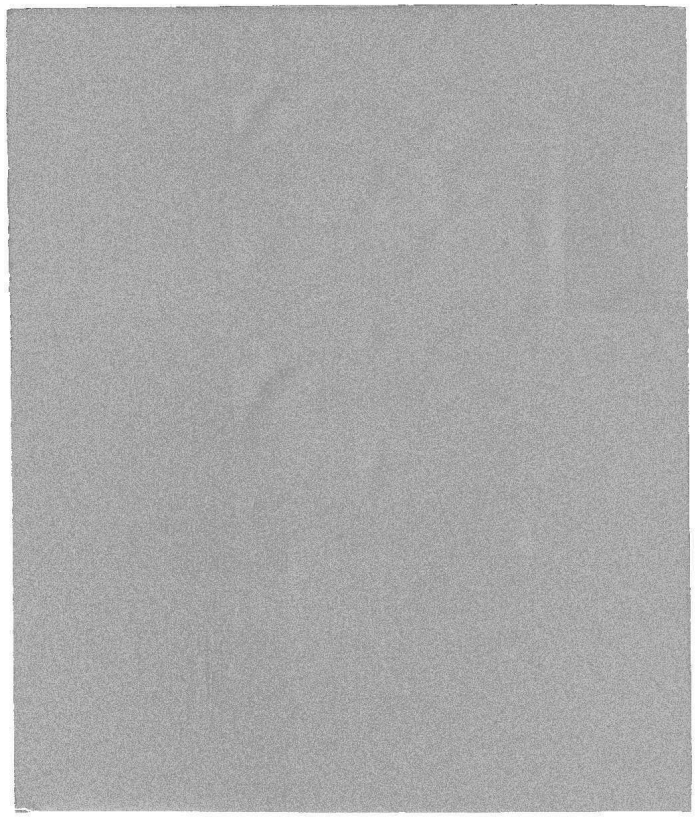
Metadaten und Messparameter (zu M_747)	
Objekt	G_004 (Monochrome)
Benennung	Nach dem Transport bei 61,2 %RH
Datum	14.09.2014
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

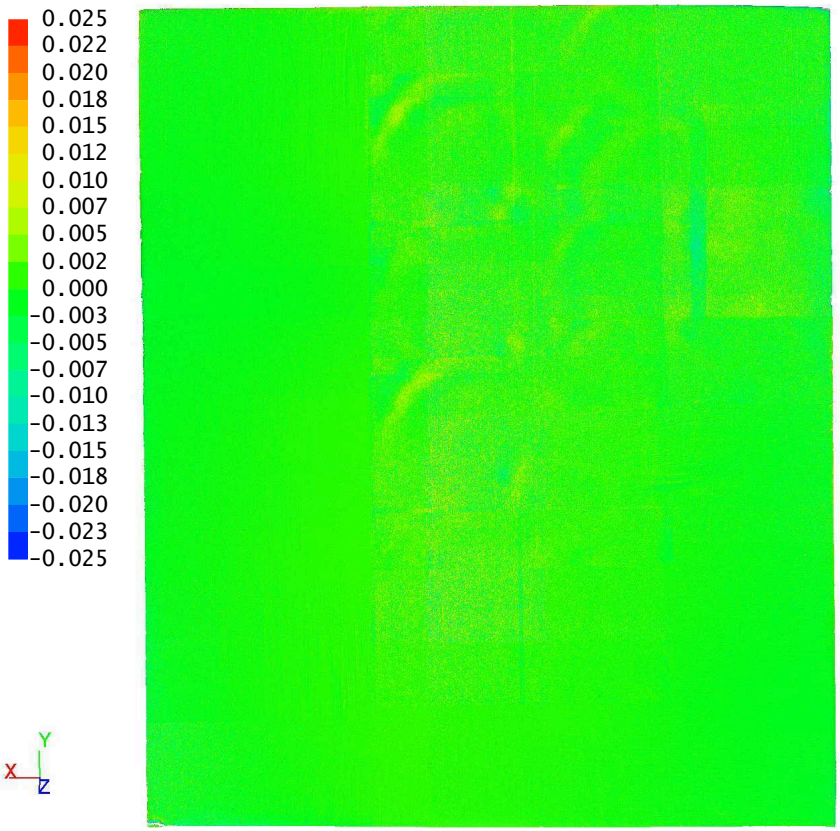
	Anzahl Messungen	19
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	15°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	
	Belichtungsfusion	2 Stufen
	1. Messbild	400
	2. Messbild	800
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0030
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0050
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0025
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,2000
	Anzahl Knotenpunkte	15.317.115
	Anzahl Dreiecke	30.596.188
	Oberfläche (mm^2)	38.253.364
	Dateigröße (KB)	6.820.609

Tab. 72| Metadaten Ist-Daten (V_221).
Quelle: Selbst

Versuch: V_221 (Transport)
G_004 am 13.09.2014 bei 53,5 %RH (M_745)
G_004 am 14.09.2014 bei 61,2 %RH (M_746)

Diskrepanz der relativen Feuchte: 7,7 %RH,
bei einer Spannweite von 9,9 %RH über einen Zeitraum von 28,5 h





Standard-Abweichung:	0.0039825
Mittlere Abweichung:	-0.0000042
Kleinste Abweichung:	-1.0543961
Größte Abweichung:	0.7034599

G_004 bei 53,5 %RH (Soll-Daten)
G_004 bei 61,2 %RH (Ist-Daten)

Objekt:	G_004	
Benennung:	Transport: 53,5 %RH - 61,2 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 14.09.2014
3D_artscan		Seite 1 von 5

Abb. 237| Wiedergabe der Protokollseite 1 von V_ 221 ('G_004').
Quelle: Selbst

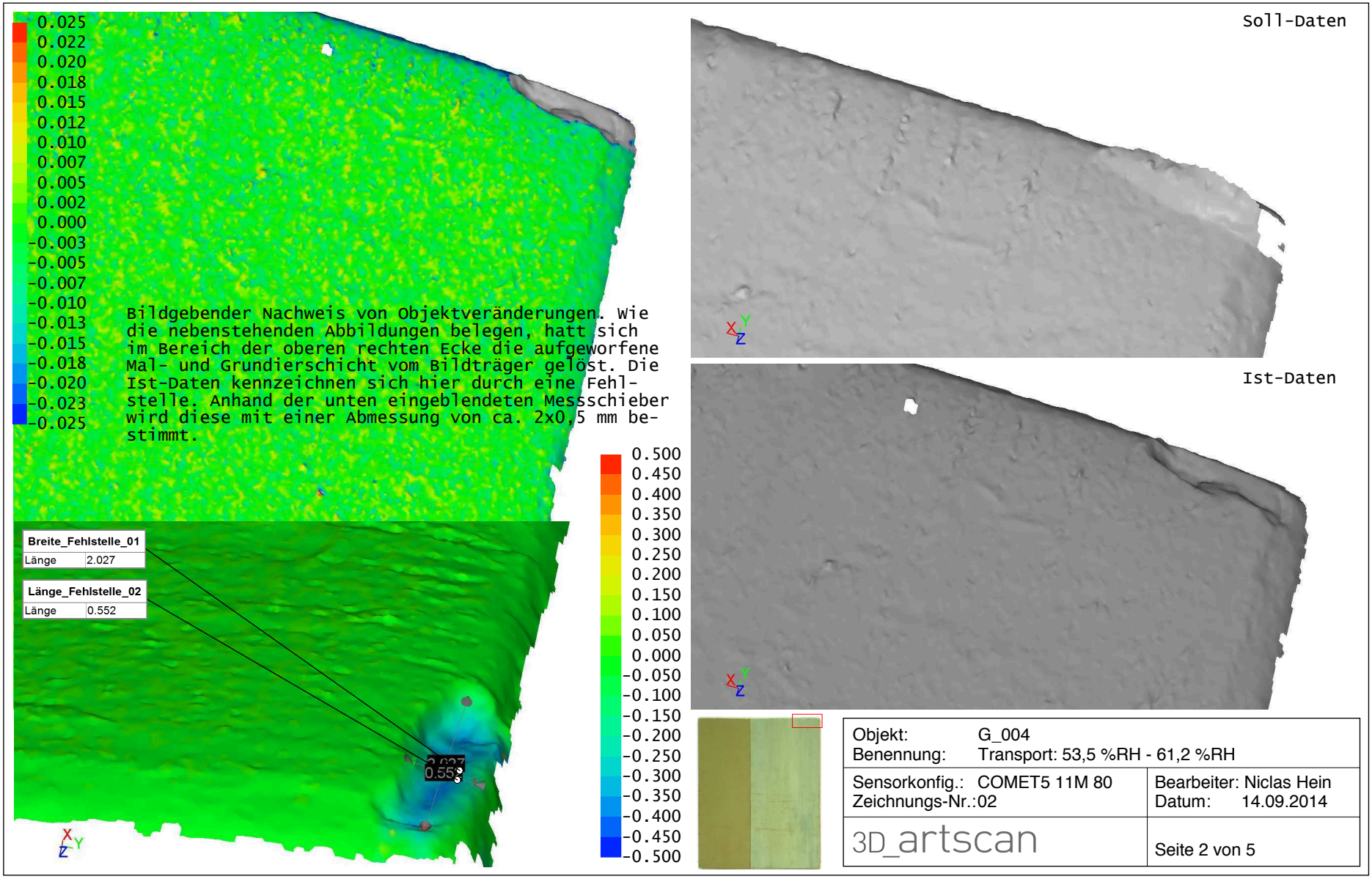


Abb. 238| Wiedergabe der Protokollseite 2 von V_ 221 ('G_004').
Quelle: Selbst

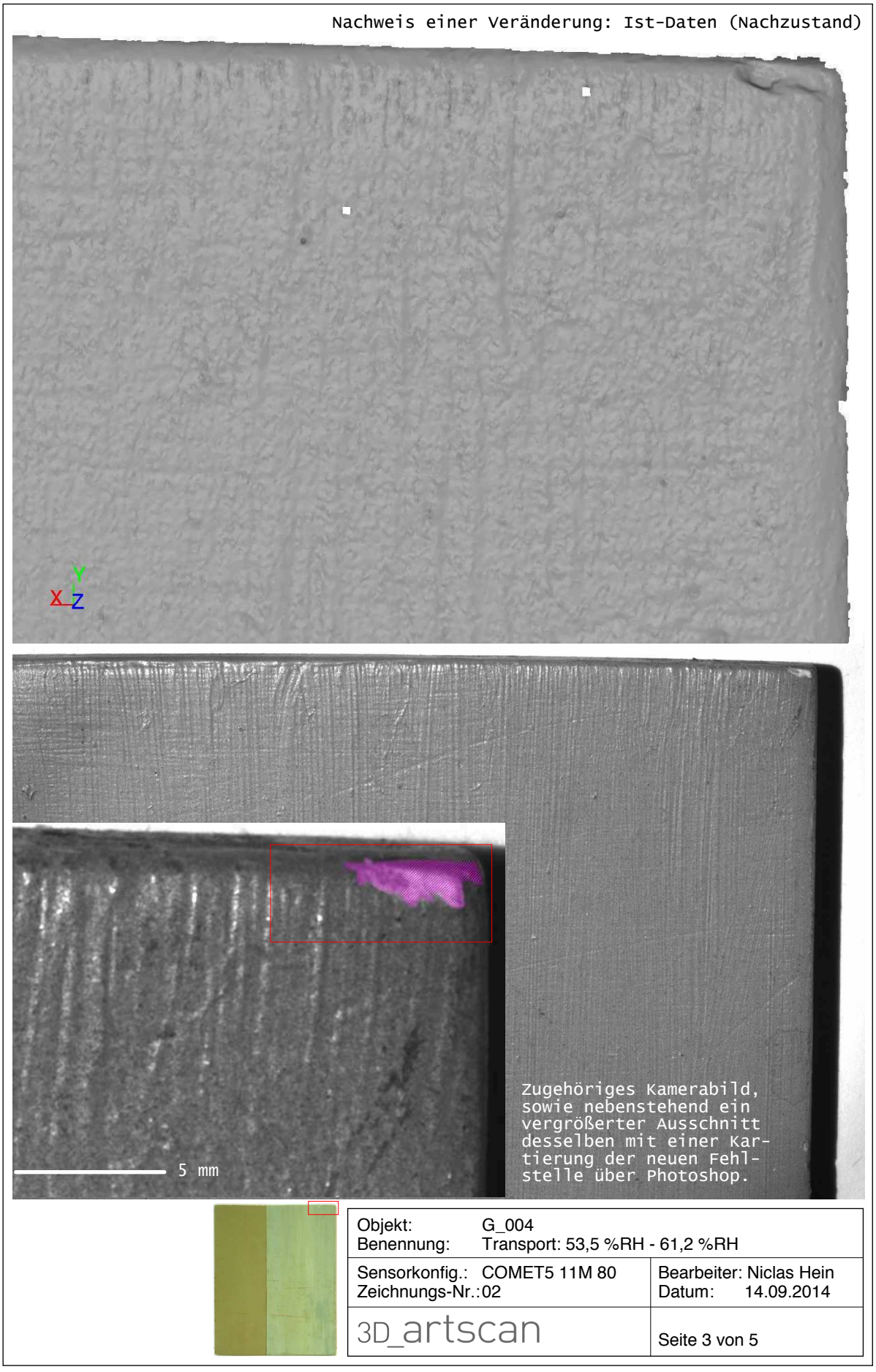
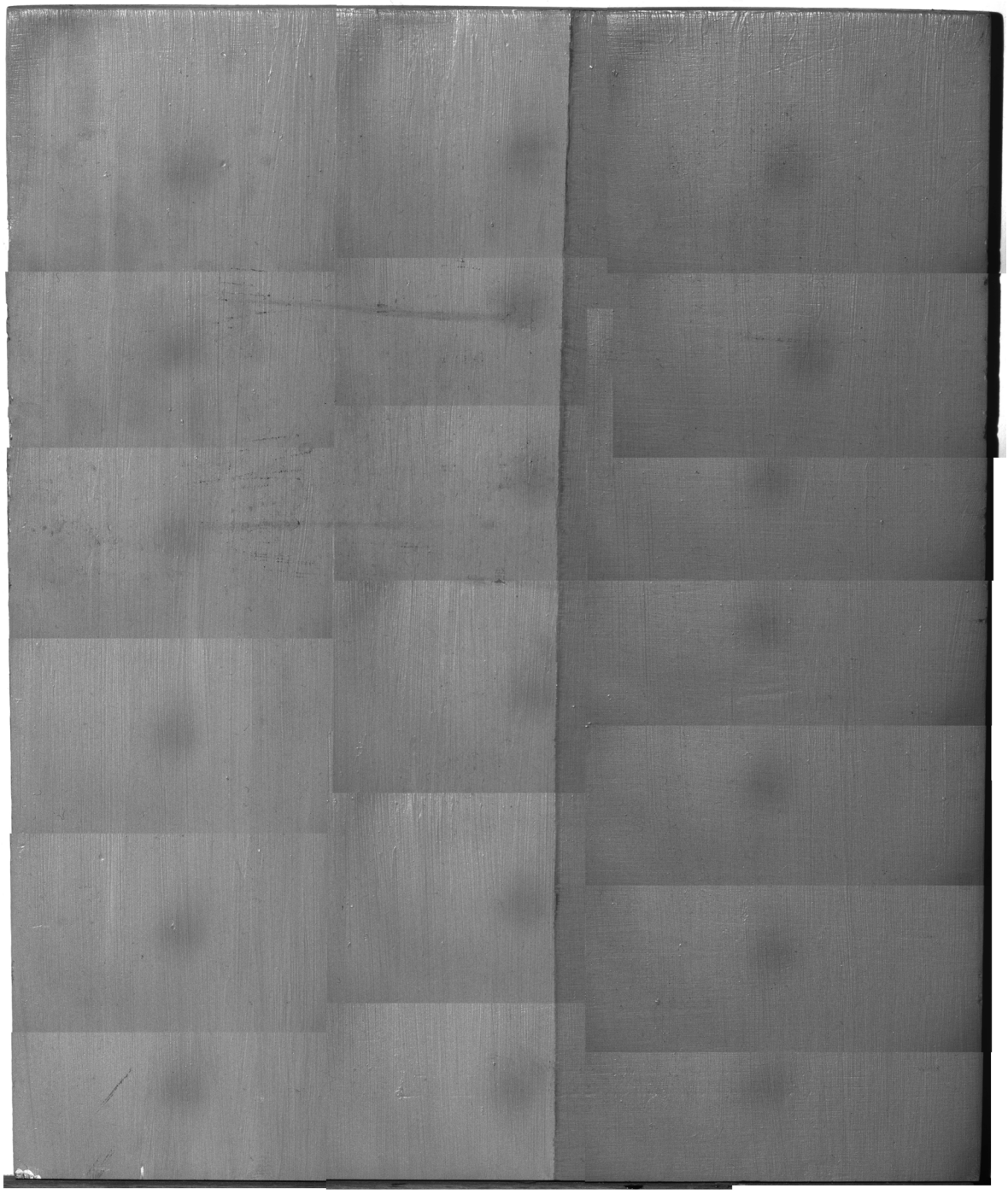


Abb. 239| Wiedergabe der Protokollseite 3 von V_ 221 ('G_004').
Quelle: Selbst

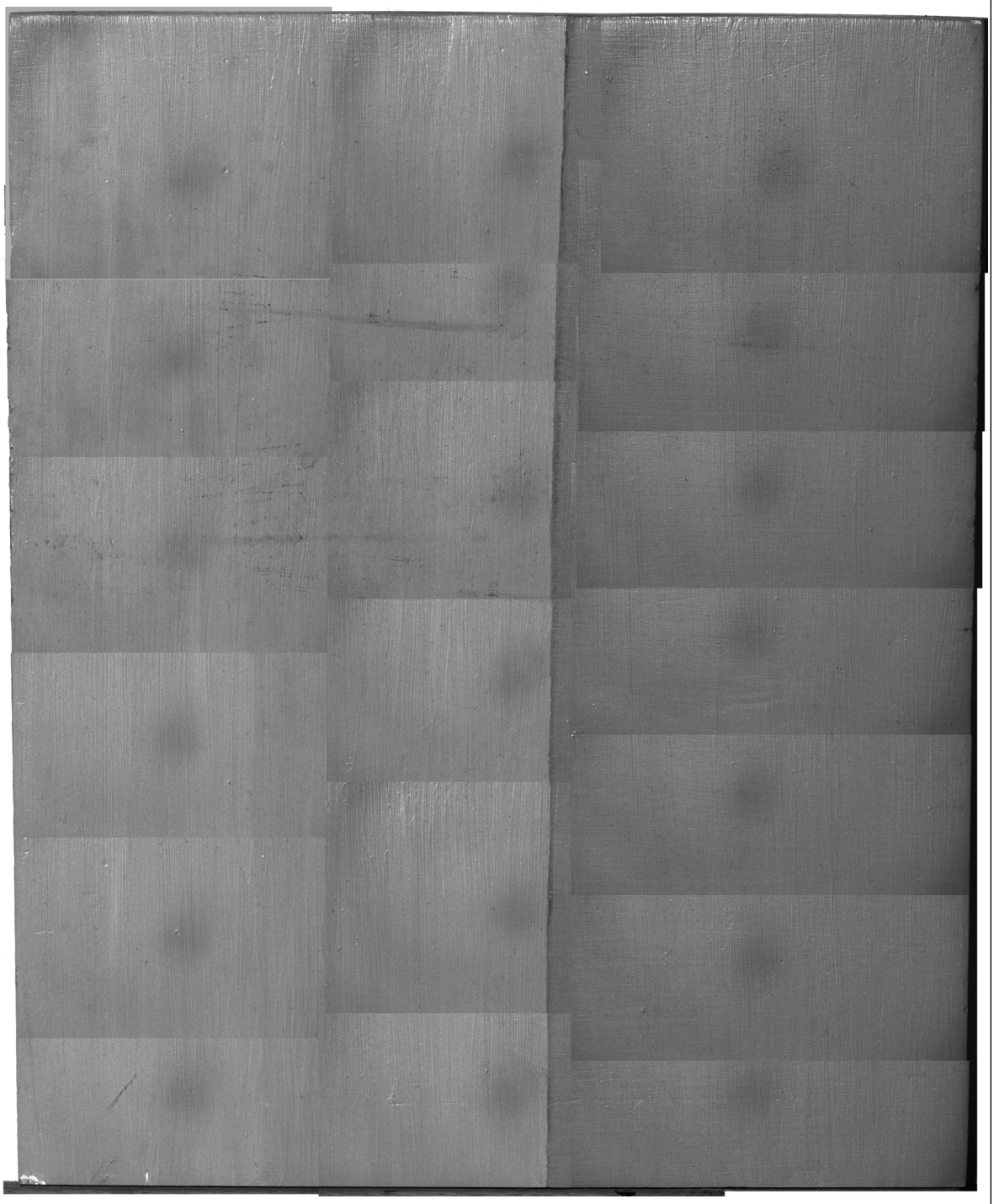
Die zur Gesamtaufnahme zusammengefügten Kamerabilder des Sensors (Vorzustand).



Objekt:	G_004	
Benennung:	Transport: 53,5 %RH - 61,2 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 14.09.2014
3D_artscan		Seite 4 von 5

Abb. 240| Wiedergabe der Protokollseite 4 von V_ 221 ('G_004').
Quelle: Selbst

Die zur Gesamtaufnahme zusammengefügten Kamerabilder des Sensors (Nachzustand).



Objekt:	G_004	
Benennung:	Transport: 53,5 %RH - 61,2 %RH	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum: 14.09.2014
3D_artscan		Seite 5 von 5

Abb. 241| Wiedergabe der Protokollseite 5 von V_ 221 ('G_004').
Quelle: Selbst

VR17)

Aufgrund der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes Gemälde müssen für bestmögliche Messergebnisse die Messgeometrie, die Sensoreinstellungen und die Digitalisierungsstrategie jedem Objekt individuell angepasst werden. Dennoch haben die Experimente an den Gemälden wesentliche Verfahrenseinschränkungen offengelegt, die sich in Messlücken äußern.[660] So bestehen – wie bereits anhand der Vorversuche ausgeführt – eklatante Mängel bei der Digitalisierung sehr dunkler Objektpartien. Diese können auch mit maximaler Belichtungszeit nicht vollständig erfasst werden. Im Gegenzug lässt sich ein Oberflächenglanz gut über veränderte Messwinkel und Mehrfachmessungen ausgleichen. Weiterhin offenbaren sich durch den praxisnahen Einsatz die Vor- und Nachteile beider Sensorvarianten. So kennzeichnet sich 'COMET 5 11M 1000' durch den Vorteil, dass untersuchte, mittelformat-große Gemälde ('G_003'), über theoretisch nur eine Aufnahme digitalisieren zu können. Zugleich ist dieses mit deutlichen Einschränkungen hinsichtlich der Wiedergabe von Details verbunden. Im Umkehrschluss ist letztgenanntes, den Erwartungen entsprechend, wiederum eine Stärke von 'COMET 5 11M 80' – wobei hier die Limitierung im Gemäldeformat besteht. Die Verfahrensanwendung offenbart, dass mit zunehmender Dateigröße softwareseitige Probleme auftreten. Selbst bei der kleinformatigen Holztafel ist die Praktikabilitätsgrenze erreicht.[661] Unter pragmatischen Gesichtspunkten ist die Digitalisierung kleinerer Gemälde über 20 x 15 cm mit der hochauflösenden Sensorvariante nicht zu empfehlen.[662] Obgleich die Detailgenauigkeit aufgrund des geringen Punktabstandes ungeschlagen ist, wird für die Digitalisierung größerer Gemäldeformate ein entsprechend dimensioniertes Messvolumen empfohlen (►Tab. 16|).

Ungeachtet der geschilderten Verfahrenseinschränkungen obliegen die positiven Aspekte. 'COMET 5 11M 1000' beweist sich als geeignet, um transportbedingte, strukturelle Veränderungen an Gemälden nachzuweisen. So sind bei einem Gemälde auf textilem Träger ('G_003') globale Topografieveränderungen, aber auch lokale Verformungen der Gemäldeoberfläche im Sub-Millimeterbereich messtechnisch belegt: Dellen und Beulen (Aufwerfung 0,225 mm, ca. 1,000 mm)[663]. Zugleich können die Vorzüge des Verfahrens und der Methodik unter Beweis gestellt werden. So gelingt über die Falschfarbendarstellung nicht nur die teilautomatisierte Identifikation von Veränderungen durch die farbcodierte Hervorhebung, sondern zudem auch ihre Quantifizierung. Außerdem kann die positive Wirkung einer Verglasung und eines Rückseitenschutzes durch 'COMET 5 11M 1000' unter Beweis gestellt werden. So sind bei dem Transport

660 Vergleiche: V_218 und V219

661 Vergleiche: V_220 und V221

662 Zu revidieren ist diese Aussage mutmaßlich jedoch dann, wenn ein noch leistungsstärkerer Computer bei der Berechnung der Daten, sowie bei der Datenauswertung verwendet wird.

663 Vergleiche: V_218

mit dem verglasten Gemälde, trotz umfangreicherer Schwankungen des Umgebungsklimas (V_219, Δ 23,2 %RH),[664] sehr viel geringere Veränderungen am Objekt belegt als bei dem selben Untersuchungsgegenstand im vergleichsweise ungeschützten Zustand (V_218, Δ 4,8 %RH)[665.666]

Die Leistungsfähigkeit von 'COMET 5 11M 80' unter Beweis stellend, kennzeichnen sich die Ergebnisse der Digitalisierung erwartungsgemäß durch einen sehr viel größeren Detailreichtum. Exemplarisch anzuführen ist hier der nachgewiesene Fussel auf der Gemäldeoberfläche ('G_004')[667]. Weitaus bedeutsamer ist jedoch, dass auch am Original über sequentielle Messungen der systematische Nachweis gradueller Veränderungen erbracht werden kann.[668] Zumindest im Anfangsstadium sind diese, trotz gewissenhafter optischer Zustandsüberprüfung, dem restauratorischen Blick entgangen – die Merkmalsausprägung lag sehr wahrscheinlich unterhalb der Wahrnehmungsgrenze. Über die Stadien eines unbeschädigten Vorzustandes, einer Objektveränderung in Form aufstehender Malschicht im Sub-Millimeterbereich, ist letztlich der verfahrenstechnische Nachweis eines Malschichtverlustes (2,0 x 0,5 mm) belegt. Da während des Transportes und der Digitalisierung der sachgerechte Umgang mit dem Gemälde gewährleistet wurde, wird die Objektveränderung dem wiederholten Kunsttransport zugeschrieben.

664 Vergleiche: V_219

665 Vergleiche: V_218

666 Damit wird ein weiteres Forschungsfeld zur Verfahrensanwendung aufgezeigt. Eine gründliche Untersuchung zur Pufferwirkung von Verglasung und Rückseitenschutz bedarf jedoch einer eigenen Studie mit einander verifizierenden Ergebnissen. Mit der geschilderten Experiment kann jedoch die prinzipielle Machbarkeit, und ein erstes, für die präventive Konservierung relevantes Ergebnis vorgewiesen werden.

667 Vergleiche: V_220

668 Vergleiche: V_220, V_221

26. Fazit

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die theoretische und praktische Untersuchung der Fragestellung *ob aus einem Kunsttransport eine gesteigerte Abnutzung von Gemälden resultiert und inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet*. Anlass dieser Untersuchung waren konservierungswissenschaftliche Hinweise auf eine erhebliche Ausstellungszunahme und, darauf bezogen, umstrittene Einschätzungen über die negativen Folgen eines erhöhten Transportaufkommens. Zumeist wird unterstellt, dass diese Tendenzen für die Kunstwerke eine zunehmende Belastung darstellen. Im Rückschluss kulminiere dies, so die gegenwärtige fachwissenschaftliche Diskussion, in einer gesteigerten Abnutzung von Kulturgut.
Rekurrierend auf diese postulierte Kausalkette und das angeführte Hauptargument einer übermäßigen Abnutzung von Kulturgut wurde als Ausgangspunkt dieser Studie eine Überprüfung ebendieser These vorgenommen. Unter einem moralphilosophischen Blickwinkel konnte das zugrundeliegende dialektische Spannungsfeld zwischen dem Bewahrungsauftrag von Museen auf der einen Seite und dem Vermittlungsauftrag auf der anderen Seite aufgezeigt werden - aus dieser Problemstellung ergeben sich komplexe Fragen denn einfache Antworten. Zur Überprüfung der These nach einer erhöhten Transportbelastung, wurde eine Zusammenführung und Validierung von Daten des gegenwärtigen Kunsttransportgeschehens vorgenommen. Ergebnis war, dass momentan keine gezielt erhobenen statistischen Angaben über Transportschäden bzw. über das Ausmaß des Transportaufkommens im Allgemeinen vorliegen. Für die weitere Thesenführung aufschlussreich stellten sich jedoch die Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung' zur statistischen Entwicklung von Museen und Ausstellungshäusern heraus. Im Auswertungszeitraum der Jahre 1990 bis 2012 ist eine deutliche Zunahme von Institutionsneugründungen[669] sowie erhebliche Zuwächse von 'Kunst-Sonderausstellungen'[670] zu konstatieren. Mittels dieser Sekundäranalyse konnte in der vorliegenden Arbeit daher begründet von einer tatsächlichen Zunahme des Leihverkehrs ausgegangen werden.
Da eine generelle Zunahme an Kunsttransporten jedoch nicht zwangsläufig für eine gesteigerte Objektbelastung spricht, wurde in einem zweiten, argumentativen Schritt untersucht, welche Verfahren zum Schadensmonitoring in der vergangenen wie gegenwärtigen musealen Praxis zum Einsatz kamen/kommen und wie die Beurteilung erfolgt(e). Entlang der einschlägigen Fachliteratur konnte aufgezeigt werden, dass zum Thema der Nachweisführung von Objektveränderung im Transportfall ein zeitgemäßer und generell praktizierter Ansatz nicht existiert. Nach wie vor erfolgt das Monitoring allein über den

669 Museen allgemein 4034 → 6355 und in Konkretisierung auf ‚Kunstmuseen mit Sonderausstellungen' 257 → 384. Ebenso maßgeblich die Ausstellungshäuser 334 → 504.

670 1990 sind es 3496, der Hochpunkt besteht im Jahr 2002 mit 5394, 2012 sind es 5157.

subjektiv geprägten Abgleich dokumentierender Zustandsfotos und -Berichte vor und nach einem Transport. Das Novum besteht hier ausschließlich in der qualitativen Verbesserung der digitalen Aufnahmetechnik. Der einzige, konservierungswissenschaftlich wirklich bedeutsame Schritt hin zu einer validen, verfahrensgestützten Objektivierung solcher Veränderungsprozesse konnte durch das sogenannte 'VASARI-Projekt' erzielt werden. Obgleich der Einsatz einer Digitalkamera als Beweisführungsverfahren aus heutiger Sicht als technisch veraltet gelten kann, ist das Einführen eines generell zu praktizierenden digitalen Soll-Ist-Zustandsvergleichs mit Nachdruck als positiv hervorzuheben. Dies Verfahren bleibt allerdings auf den zweidimensionalen Bereich beschränkt und hat sich in der musealen Praxis nicht durchsetzen können. Ferner sind hinsichtlich mechanischer Belastungen, die während des Transportes auf Gemälde einwirken können, vom Schweizer 'KTI-Projekt' bedeutsame Befunde dargelegt, die gleichsam den aktuellen Forschungsstand skizzieren. Als herausragend können deren Erkenntnisse über die auftretenden mechanischen Belastungen und die Erkundung geeigneter Verpackungsmaterialien und -techniken gelten. Allerdings sind für das Monitoring mechanischer Stoßbelastung und Vibrationen keine bildgebenden Verfahren eingesetzt worden. Auch sind keine qualitativen Einschätzungen hinsichtlich der Auswirkung auf Gemäldestrukturen en détail erfolgt. In Anbetracht dieser Unzulänglichkeiten, sowie in Ergänzung zum aktuellen Forschungsstand zur mechanischen Krafteinwirkung auf Gemälde, wird mit dieser vorliegenden Studie dezidiert der Frage nach apodiktischen Verbesserungsmöglichkeiten nachgegangen. Im Zentrum der Untersuchung stehen dabei jene sehr viel weniger augenfällige Veränderungen, die als Belastungsfolge von Klimaschwankungen angenommen werden. Die Ausgangsfrage nach gesteigerter Abnutzung wird daher in dieser Arbeit operationalisiert untersucht: hinsichtlich `klimatisch bedingten Belastungsfolgen´ und deren Dedektierbarkeit. Demzufolge wird systematisch erkundet, ob sich an Gemälden und/oder an simplifizierten gemäldeähnlichen Proben Klimaschwankungen in Mikroveränderungen äußern, die in Kumulation zu einer beschleunigten Alterung beitragen und letztlich zum Schadensfall führen.

Diese hypothetisch unterstellte Veränderungsdynamik führt, so der dritte Argumentationsschritt, ganz grundsätzlich zu der terminologischen Abgrenzungsproblematik eines Schadens gegenüber einem Vorschaden und/oder einer Alterserscheinung. Für die abschließende Bewertung von Transportfolgen ist eine genaue, begriffliche Vergewisserung jedoch von eminenter Bedeutung. Das Kernproblem konturiert sich diesbezüglich aus den, im musealen Alltag sowie im fachwissenschaftlichen Diskurs vorhandenen, fließenden Übergängen der Termini. Dies führt zwangsläufig zu subjektiv geprägten Zustands-Attestierungen. Es zeigte sich, dass eine Abgrenzung nur approximativ erfolgen kann. Für die vorliegende Untersuchung beschreibt der Terminus Alterung einen subtilen, tendenziell langsam ablaufenden Veränderungsprozess, wohingegen ein Schaden oftmals kurzfristig erfolgt und auf ein abruptes Ereignis zurückgeführt

werden muss. Jegliche Ereignisse, die die natürliche Objektalterung beschleunigen, sind folglich als ein Schaden zu deklarieren. Aufgrund ihrer prinzipiellen Vermeidbarkeit gilt dies gleichermaßen auch für jene unintendierten Einwirkungen, die im Zusammenhang mit einem Kunsttransport stehen; seien es mechanische Beschädigungen aufgrund des Verpackens oder auch Beschädigungen durch Mikrovibrationen oder Klimaschwankungen. Diese deskriptive Definition ist insofern von weitreichender Bedeutung, da sie aus einer einseitig-theoretischen, konservierungswissenschaftlichen Perspektive für die museale Praxis erstellt worden ist. Dies hat der Logik nach zur Konsequenz, dass das Transportieren von Kunst generell in Frage gestellt werden muss – insbesondere dann, wenn davon ausgegangen wird, dass mit einem Transport immer ein erhöhtes Gefährdungspotenzial zur Objektveränderung einhergeht. Der ausführliche Diskurs über die Begriffe Alterung und Schaden ergab ferner, dass diese Abgrenzungsproblematik zu einer nachweislich inhomogenen Sprachpraxis bei der Schadensdeklaration führt. So konnte aufgezeigt werden, dass für die Veränderungsmerkmale der hier beispielgebend untersuchten Objektgruppe Gemälde keine allgemein verständliche und zugleich verbindliche Terminologie vorliegt. Grund dafür ist, dass Schadensmerkmale und -prozesse in der Konservierungswissenschaft traditionell aus maltechnischen Zusammenhängen heraus erörtert und demzufolge subjektiv geprägt benannt werden. Wenn aber die Schadensdeklarationspraxis mittels objektivierender Verfahren standardisiert werden soll, so hat dies die Entwicklung eines allgemeingültigen Glossars zur Konsequenz.

Dementsprechend wurde in dieser vorliegenden Arbeit als vierter Schritt ein erster synoptischer Schadenskatalog konstituiert. In dessen Zentrum steht die Beschreibung oberflächentexturaler Merkmale innerhalb der Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Auges. Somit besteht der Katalog aus präzisen Deskriptionen phänotypisch-geometrischer Merkmale, die eine grundlegende systematisierende Klassifikationspraxis anleiten können. Durch seine tabellarische Form, wie durch Vereinheitlichung der sprachlichen und bildlichen Beschreibungsweise kann dieser Katalog erstmals ein, als eklatant zu bewertetes, Desiderat der gegenwärtigen Konservierungswissenschaft schließen; bzw. dem zukünftigen fachwissenschaftlichen Diskurs ein Medium für fundierte(re) Auseinandersetzung bieten. Gleichwohl aber zeigte seine praktische Anwendung im Rahmen durchgeführter Laborexperimente, dass eine zweifelsfreie Zuordnung messtechnisch belegter Veränderung zu einem ausgeführten Schadensbild nicht in jeden Fall möglich ist. Wiederholt lag eine Merkmalskombination vor und/oder die Unterschiede zwischen den zuvor als verschieden deklarierten Schadensbildern waren dann doch zu uneindeutig. Gemäß des Emergenz-Prinzips bestätigte sich damit am beispielgebenden Untersuchungsobjekt die These der oben dargelegten, ganz grundsätzlichen Abgrenzungsproblematik. Auf das Kernproblem der eher kontinuierlich denn abrupt ablaufenden Veränderungsprozesse Bezug nehmend, besteht hinsichtlich der Nachweisführung also per se die Dependenz zwischen der Genauigkeit der Untersuchungs-

methode einerseits sowie dem Intervall ihrer Anwendung andererseits. Zusammenfassend kann daher das nachstehende, dreigliedrige Bedingungsgefüge hinsichtlich der Terminologieproblematik und deren normative Konsequenzen wie folgt konstatiert werden:

1. die generelle Abgrenzung einer Alterung gegenüber einem Schaden,
2. die subjektiv geprägte Attestierung derselben, sowie
3. die Abhängigkeit zur Effizienz der methodischen Nachweisführung.

Zur Klärung des konservierungswissenschaftlichen Desiderates eines systematischen Monitorings von Objektveränderungen durch den Transport, waren umfangreiche Laborexperimente von Nöten, um Transportbelastungen – ausgelöst durch Klimaschwankungen – zu simulieren. Daher wurden im experimentellen Teil Untersuchungen an Modellkörpern durchgeführt. In Ergänzung der Laborstudien erfolgten Gemäldetransporte in Realumgebung, d.h. unter Bedingungen, welche der gegenwärtigen musealen Praxis gleichkommen. Zur Detektion möglicher Veränderungen wurde eine Messtechnik eingesetzt, die sich im Rahmen eigener Vorstudien als prinzipiell dafür geeignet erwiesen hatte – das Streifenprojektionsverfahren. Dabei handelt es sich um den Scanner 'COMET 5 11M', ein aktuelleres System der Firma 'Steinbichler'. Mit dessen Einsatz konnten zahlreiche strukturelle Veränderungen nachgewiesen werden; anhand der nachstehend klassifizierten Untersuchungsobjekte:

1. selbst entwickelte Probekörper mit bekanntem Malschichtaufbau (Holz- und textiler Bildträger),
2. Realobjekte aus historischen und mit Vorschäden versehenen textilen Gemäldefragmenten,
3. vollständige originale Gemälde (Holz- und textiler Bildträger).

Grundsätzlich erwiesen sich die Experimente unter rein konzeptionellen und praktischen Aspekten als zielführend. Gemeint ist damit bspw. die effiziente Konditionierungen der Untersuchungsgegenstände über Konstantklimata, was sowohl die Befeuchtungsboxen als auch die eigens konzipierte Klimakammer umfasst. Stets ausgehend vom konservierungswissenschaftlich relevanten Bereich der mittleren relativen Feuchte (ca. 50-55 %RH) wurden Belastungszyklen sowohl geringerer und moderaterer Feuchteschwankungen vorgenommen.[671] Auch wurden solche Zyklen durchgeführt, die eine extreme Trockenheit oder eine extrem hohe relative Feuchte umfassten.

Für Probekörper auf Holz- und textilem Bildträger konnte über eine ineinandergreifende statistische sowie bildgebende Auswertung bestehendes Wissen verifiziert werden. Ebenso zeigten die hier

671 Als geringe Feuchteschwankungen werden jene < Δ5%RH bezeichnet, als moderat jene > Δ5%RH / < Δ10%RH

vollzogenen Versuchsreihen, dass einige Revisionen erforderlich sind, die auf weiterführende Untersuchungen verweisen. Da die Einwirkung mechanischer Kräfte als Belastungsart in dieser Studie konzeptionell ausgeschlossen wurde, sind die messtechnisch belegten Veränderungen in der Regel auf Schwankungen der relativen Feuchte zurückzuführen. Die Ergebnispräsentation der vorliegenden Studie umfasst daher

(1) eine begründete Abschätzung der Verfahrenseignung des 'COMET-Systems' für ein systematisches Schadensmonitoring, sowie
(2) konservierungswissenschaftlich relevante Ergebnisse über die Belastungsfolgen von Klimaschwankungen

(1) Bewertung der Verfahrenseignung des 'COMET-Systems' zum systematischen Schadensmonitoring

Technische Verfahrensvorteile

Unter rein verfahrenstechnischen Gesichtspunkten kann mit dem Einsatz des 'COMET-Systems' der Grundforderung nach einer zerstörungsfreien, berührungslosen Inspektionstechnik entsprochen werden. Insbesondere ist dessen hohe Auflösung positiv hervorzuheben. Ergebnis einer solchen Digitalisierung ist eine virtuelle Punktewolke und – bei gezielter Weiterverarbeitung der Daten – ein vermaschtes Dreiecksnetz. Die digitale Darstellungsform ermöglicht exakte Rückschlüsse auf die Oberflächenstruktur und erlaubt dadurch erkenntnisreiche Auswertungen. So können bei temporal-sequenzieller Mehrfachdigitalisierung Bezüge und Soll-Ist-Vergleiche zwischen den Datensätzen hergestellt werden, um Veränderungen zu belegen. Die enorme Leistungsfähigkeit zeigte sich anhand der dreidimensionalen Auflösung kleinster, im Sub-Millimeterbereich verorteten, Rissstrukturen. Zu apostrophieren ist diesbezüglich die Bildgebung und messtechnische Untersuchung von Craquelé-Strukturen. Grundsätzlich erlaubte die Bildgebung dabei sowohl qualitative als auch quantitative Rückschlüsse. Diesbezüglich konnten bspw. klimatisch induzierte Veränderungen im Bereich von ca. 0,050 mm messtechnisch nachgewiesen werden, wobei die Bildgebung obendrein Rückschlüsse auf eine windschiefe Verkippung im Spaltbereich ermöglichte. Da diese entlang der Z-Achse verliefen, wären sie über herkömmliche Dokumentationsverfahren, wie bspw. die hochauflösende Fotografie, nicht nachweisbar gewesen.

Ein weiterer, technischer Verfahrensvorteil ist die Flexibilität des verwendeten 'COMET-Systems'. Unter Berücksichtigung der Messaufgabe kann dieses modular an die Beschaffenheit des Untersuchungsgegenstandes adaptiert werden. So steht mit 'COMET 5 11M 80' eine extrem hochauflösende Sensorvariante zur Verfügung, die sich durch einen herstellerseitig angegebenen 3D-Punktabstand von 18 µm kennzeichnet. Wiederum für 'COMET 5 11M 1000' beträgt der 3D-Punktabstand 225 µm. Bei den Angaben handelt es sich um theoretische Werte. Diese konnten mittels eigener Untersuchungen an technischen Prüfgegenständen sowie an Originalen jedoch der Größenordnung nach verifiziert werden. Ein Anhaltspunkt zur Ver-

fahrensgrenze des hochauflösenden Sensors stellt der Strukturnachweis von Fusseln dar (ca. 0,050 mm). Bei optimalen Sensoreinstellungen konnten diese gerade noch detektiert werden. Überdies konnte in den Experimenten die Reproduzierbarkeit der Messdaten bestätigt werden. Im Kontext der erwähnten Systemflexibilität sind auch die zahlreichen Einstellungsmöglichkeiten der Hard- und Software als positiv hervorzuheben. Diese erlaubten die Digitalisierung extrem komplexer Oberflächen, wie sie aufgrund der Farbigkeit, der Struktur und des Glanzes bei Gemälden oft vorhanden sind. Hinsichtlich pragmatischer Gesichtspunkte ist das lückenlose Ineinandergreifen der Software für die Hardwareansteuerung 'COMETplus' und die Auswertungssoftware 'INSPECTplus' anzuführen. Zugunsten bestmöglicher Digitalisierungsergebnisse gelang softwareseitig eine explizite Systemanpassung an die Untersuchungsgegenstände. Zahlreiche Sensor- und Belichtungseinstellungen, sowie Parameter der Datenweiter- und Nachverarbeitung stehen hierfür zur Verfügung. Nicht zuletzt bewies sich bei der praktischen Arbeit die Dokumentation der Messergebnisse in plattformunabhängigen PDF-Protokollen als sehr zielführend.

Methodische Verfahrensvorteile

Außerordentlich positiv werden die methodischen Vorteile des 'COMET-Systems' bewertet – allen voran die Objektivität bei der Nachweisführung von Veränderungen. Dieses Novum ist für die Bewertung möglicher Transportfolgen von immenser Bedeutung. Neben der Verfahrensanwendung per se, wird die eigens entwickelte Auswertungsstrategie dafür als eine grundlegende Vorraussetzung angesehen und – angesichts der vorliegenden positiven Ergebnisse – entsprechend bewertet. Im Anschluss an die 'Best-Fit-Ausrichtung' der referenzierten Datensätze sind hochpräzise, teilautomatische Bezüge und Vergleiche möglich. Gegenüber den eigenen Vorarbeiten kann die Verfahrenserweiterungen um die 'Best-Fit-Ausrichtung' als eine der größten software-technischen Innovationen gewertet werden. Als ebenso positiv ist die Berechnung einer Falschfarbendarstellung zu apostrophieren, bei der Soll-Ist-Diskrepanzen teilautomatisch farbkodiert und damit visualisiert sowie quantifiziert werden. Diese hoch effiziente Auswertungsmethode erlaubte Rückschlüsse über weniger augenfällige Merkmale. Insbesondere wenn sich die Veränderungsmerkmale nah an der Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Auges befinden und/oder sich die Veränderungen entlang der Z-Achse vollziehen, stellt die entwickelte Nachweismethodik gegenüber herkömmlichen Untersuchungsmethoden einen eminenten Vorteil dar. Denn: eine augenscheinliche Bewertung von Veränderungen aus dem Erinnerungsvermögen heraus oder jene in Form des Abgleiches entsprechend aufgenommener Fotos wird damit obsolet. Die hier vollzogenen Experimente belegen empirisch, dass durch das Streifenprojektionsverfahren Veränderungen messtechnisch nachweisbar sind, die selbst geschulten Konservierungswissenschaftlern entgehen. Die Falschfarbendarstellung wird daher als ein maßgebliches Instrument zur objektiven Dokumentation und Bewertung von Veränderungen

angesehen. Über weitere, ebenso wichtige Auswertungsmethoden ließen sich die Ergebnisse verifizieren, präzisieren und ergänzen. Als geeignet beweist sich hier die Verwendung von Schnittlinien, Serienschnitten, Nadeldiagrammen und virtuellen Messschiebern. In ihrer Gesamtheit unterstreichen die verschiedenen (und als effizient zu bewertenden) virtuellen Auswertungswerkzeuge, dass es sich bei dem eingesetzten 'COMET-System' um ein hoch entwickeltes Messsystem handelt. Mit der vorliegenden Studie kann die Entwicklung eines detaillierten Prozessablaufs für ein Transportschadensmonitoring von Gemälden vorgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die Datenerhebung als auch für die -nachverarbeitung, -aufbereitung und -auswertung in standardisierten Messprotokollen.

Technische Nachteile

Ungeachtet der geschilderten Verfahrensvorzüge, die maßgeblich zur Verfahrenswahl beitrugen, konnten fünf wesentliche technische Nachteile aufgedeckt werden. Der erste und eklatanteste ergibt sich aus dem verfahrensimmanenten Funktionsprinzip der verwendeten Untersuchungsmethode: die Detektion begrenzt sich ausschließlich auf strukturelle Merkmale. Farbinformationen können nicht berücksichtig werden. Hierzu sind jedoch Lösungsvorschläge zu einer Verfahrensverbesserung erarbeitet worden, die im nachfolgenden Ausblick zusammengefasst sind (►Kapitel 27|). In diesem Kontext wird ebenso auf eine zweite, zentrale Verfahrenseinschränkung hingewiesen, nämlich die bei der Digitalisierung extrem dunkler Oberflächen (bspw. bei Berlinerblau- und Schwarzausmischungen). Der Kontrast des projizierten Streifenmusters war hier nicht ausreichend hoch um Messdaten generieren zu können. Der bereits angeführte Lösungsvorschlag (►Kapitel 27|) besitzt hier gleichermaßen Gültigkeit. Dies gilt ebenso für die dritte Einschränkung: stark glänzende Oberflächen wie bspw. Vergoldungen. Ausgeprägte Reflexe äußerten sich teilweise in Messlücken. Infolgedessen wird eingeschätzt, dass die Digitalisierung von Ikonen problematisch, aber nicht unmöglich ist.

Darüber hinaus konnte eine vierte Limitierung bei der Nachweisführung und Auswertung sehr feiner Strukturen wie Kratzer und Risse belegt werden – obgleich, wie weiter oben bereits erörtert – Craquelé-Strukturen dem Grundsatz nach digitalisiert werden konnten. Eine undifferenzierte Bildgebung der besagten Strukturen hatte zur Folge, dass aufgrund unscharfer Kanten bspw. die Klaffung eines Spaltes nur fehlerbehaftet über virtuelle Messschieber quantifiziert werden konnte. Neben der grundsätzlich erreichten Auflösungsgrenze belegten die Experimente, dass die Triangulationsparameter (obgleich diese mit Bedacht gewählt worden waren) bei der Vermaschung der Punktewolke zum Dreiecksnetz für die Strukturwiedergabe von entscheidender Bedeutung sind.

Hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Scanners kann letztlich eine fünfte Limitierung benannt werden: die Größe der verwendeten Messvolumina. Mit 68 x 730 x 585 mm^3 fällt 'COMET 5 11M 1000' gegenüber den Herstellerangaben um ca. 19% kleiner

aus. 'COMET 5 11M 80' ist hingegen mit 44,5 x 67 x 46 mm^3 ca. 11% kleiner als herstellerseitig angegeben. In Anbetracht des ohnehin schon kleinen Messvolumens bedeutet diese Tatsache einen schwerwiegenden, praktischen Nachteil. Wurde bspw. eine Digitalisierung mit dem hochauflösenden Sensor durchgeführt, so erforderte dies eine Mehrfachmessung. Dafür ist der Sensor mäandernd über das Objekt bewegt worden. Je kleiner also das tatsächliche Messvolumen ist, desto größer ist infolgedessen der Digitalisierungsaufwand.

Methodische Nachteile

Sich auf den zuletzt dargelegten technischen Nachteil beziehend, resultieren hieraus unmittelbar methodische Einschränkungen: Mit zunehmender Anzahl an Einzelaufnahmen wird die Datenmenge mitunter so groß, dass eine Datenberechnung und Auswertung mit umfassenden Problemen verbunden ist. Diesbezüglich ist auf die hochauflösende Digitalisierung eines kleinformatigen Holztafelgemäldes (ca. 20 x 15 cm) verwiesen. Bei der vollständigen Digitalisierung über ca. zwanzig Einzelaufnahmen konnte die Verfahrensgrenze durch die Größe der Projektdatei von ca. 8,6 GB aufgezeigt werden. Für die Bearbeitung und Berechnung des erwähnten Projektes wurde ca. ein Personentag benötigt. Dies stellt ein Nachteil insofern dar, weil in Anbetracht der forcierten musealen Anwendung gleichermaßen betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen sind.

Über die Experimente belegt sich, dass seitens des Anwenders ein Gleichgewicht zwischen der Handhabbarkeit der Daten, dem Ausgleich von Messrauschen und dem Strukturerhalt des Digitalisates gefunden werden muss. Im genannten Kontext der Datenauswertung spielt ebenfalls die aktive Bestimmung des Darstellungsmodus, des einzunehmenden Blickwinkels und nicht zuletzt die virtuelle Beleuchtung der 3D-Daten im 'Viewer' eine entscheidende Rolle. Anders ausgedrückt: Das verwandte 'COMET-System' kann aufgrund der heterogenen, optischen Eigenschaften der Untersuchungsgegenstände nicht mit standardisierten Einstellungen betrieben werden. Ebenso erfordern unterschiedliche Fragestellungen individuelle Digitalisierungsstrategien, Messgeometrien und Sensoreinstellungen. Die oben positiv hervorgehobene, systemseitige Flexibilität führt im Umkehrschluss zu einer Verfahrenskomplexität, die wiederum ein Expertenwissen zu den Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens sowie der Sensorbedienung erfordert. Nach Einschätzung des Autors ist eine souveräne Bedienung des Gerätes durch ungeschulte Personen nicht möglich.

(2) Konservierungswissenschaftliche Erkenntnisse über die Belastungsfolge von Klimaschwankungen

Probekörper Holz

Bei den Holzprobekörpern konnte über alle Teilexperimente hinweg die grundsätzliche Korrelation von Dimensionsänderung und Schwankungen der relativen Feuchte (ausgehend vom mittleren Feuchtebereich) belegt werden. Bezüglich des Faserverlaufes des

Holzbildträgers entlang tangentialer Richtung war im Maximum eine Dimensionszunahme von ca. 6% nachweisbar, wohingegen eine Zunahme entlang axialer Richtung maximal ca. 0,6 % betrug. Zudem ist belegt, dass die Probekörper in Relation zur mittleren Ausgangsfeuchte sehr viel gravierender auf eine extreme Befeuchtung als auf eine extreme Trocknung reagierten. Aus konservierungswissenschaftlicher Sicht geht damit die weitaus größere Gefahr von extremer Feuchtigkeit aus – zugleich begünstigt diese bekanntlich das Schimmelwachstum. Zudem ließ sich belegen, dass nach qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten beurteilt das hygroskopische Verhalten der einzelnen Holzprobekörper untereinander nicht vergleichbar ist. Ein Zusammenhang zu den verschiedenen Malschichten wurde dabei nicht erkannt. Unterschiede äußerten sich bspw. im Maß der Dimensionsänderung und der Verformungsrichtung. Relevant ist darüber hinaus, dass sich ein Probekörper im Bereich geringfügiger Klimaschwankungen unter hygroskopischen Gesichtspunkten unerwartet verhielt; dies ausgehend immer vom mittleren Feuchtebereich: er schrumpfte bei einer moderaten Befeuchtung. Dieses Verhalten war reproduzierbar und kann nicht erklärt werden. Zugleich legt es nahe in weiterführenden Untersuchung hier anzusetzen und bestehendes Wissen kritisch zu hinterfragen (►Kapitel 27|). Ebenso konnte aufgezeigt werden, dass extreme klimatische Belastungen zu irreversiblen Veränderungen führen, die sich in dauerhaften Verformungen und Dimensionsänderungen äußern. Aus Gründen der Schadenspräventon müssen Kunstwerke daher insbesondere vor solchen extremen klimatischen Ereignissen geschützt werden. Über die Bildgebung war es möglich Dimensionsänderungen als extreme Belastungsfolge nachzuweisen, die sich allgemein in Quellungen (55,2 → 97,8 %RH, Δ42,6 %RH)[672] und Schrumpfungen (55,2 → 2,6 %RH, Δ52,6 %RH), sowie in konkaven (55,2 → 97,8 %RH, Δ42,6 %RH) und konvexen (55,2 → 2,6 %RH, Δ52,6 %RH) Oberflächenverformungen manifestierten. Neben diesen sich global äußernden Veränderungen sind weiterhin insbesondere auch die bildgebenden Nachweise über lokal begrenzte Veränderungen zu betonen. So gelang mit dieser Studie erstmals eine teilautomatische, objektive Identifizierung einer aufstehenden Malschichtscholle (< 1mm, entlang Z-Achse), der eine partielle Delamination vorausgegangen sein muss (54,0 → 62,0 %RH, Δ8,0 %RH). Das angewendete Untersuchungsverfahren erlaubt hier erstmals quantitative und qualitative Rückschlüsse über eine dreidimensionale Veränderung im Sub-Millimeterbereich. Eine vergleichbare Nachweisführung wäre derzeit mit keinem anderen Verfahren möglich.

Probekörper Textil

Wird in die Betrachtung der bisherigen Ergebnisse das Verhalten der Probekörper auf textilem Bildträger mit einbezogen, so konnten die eben beschriebenen Veränderungsmerkmale auch hier messtechnisch nachgewiesen werden. Jedoch zeigte sich, dass zwischen der Feuch-

672 In der Regel sind die Ergebnisse beispielhaft angefügt und aufgrund ihrer Eindeutigkeit für das vorliegende Fazit selektiert worden.

teschwankung und der Dimensionsänderung (die bei dieser Objektgruppe lediglich eine Verformung inkludierte) nur eingeschränkt eine Korrelation bestand. Letzteres galt für die Extreme der relativen Feuchte. Moderate Feuchteschwankungen, abermals ausgehend vom mittleren Feuchtebereich, wiesen hingegen keine stringente Abhängigkeit zur relativen Feuchte auf. Der Blick auf die Gesamtheit der Experimente offenbart ein unerklärbares Verhalten des Bildschichtengefüges der Textilprobekörper, was Richtung und Ausmaß der Verformung betrifft. So konnte bspw. am selben Probekörper sowohl bei Befeuchtung als auch bei Trocknung eine Beulenbildung nachgewiesen werden. Zusammengefasst reagierten die Textilprobekörper in Abhängigkeit zur Feuchteänderung jedoch ausgeprägter auf Trocknung als auf Befeuchtung. Entsprechend wird daher trockenes Klima als vergleichsweise schädlich eingestuft – eine Erkenntnis, die jedoch durch weiter gehende Experimente überprüft werden muss (►Kapitel 27|). Darüber hinaus offenbarte die Bildgebung jener Experimente, denen eine Klimaschwankung im mittleren Feuchtebereich zugrunde lag, eine signifikante Oberflächenverformungen. So überrascht bspw. das Ergebnis einer nachgewiesenen Delle (-0,225 mm, entlang Z-Achse), die im Zusammenhang mit einer sehr geringen Befeuchtung steht (52,1 → 53,9 %RH, Δ1,8 %RH). Gleichwohl ist auf die Verhältnismäßigkeit des Veränderungsmerkmals hinzuweisen, bzw. hervorzuheben, dass mit 'COMET 5 11M 80' die Nachweisführung einer so geringfügigen Änderung überhaupt möglich ist. Grundsätzlich sind entsprechende Veränderungen, die im Zusammenhang mit sehr geringen Klimaschwankungen stehen, keine Ausnahme. Ebenso können Beulen (0,175 mm, entlang Z-Achse) nachgewiesen werden, die in kausalem Zusammenhang mit einer moderaten Klimaschwankung stehen (52,1 → 59,9 %RH, Δ7,8 %RH). Die Experimente belegen ferner, dass die Merkmalsausprägung der Beule mit dem Befeuchtungsgrad korrelierte. Die oben herausgestellte Verfahrenseignung wird außerdem durch die Bildgebung eines neu entstandenen Risses im Bildschichtengefüge unterstrichen. Die Falschfarbendarstellung trug einerseits zur teilautomatischen Lokalisierung bei. Andererseits erlaubte die Quantifizierung einer Topografieveränderung ein geringfügiges Ansteigen des Bildschichtengefüges den Risskanten entgegen. Virtuelle Messschieber quantifizierten die Kantenklaffung (Ø0,106 mm über eine Risslänge von 17,667 mm). Aufgrund seiner Lage und dem parallelen Verlauf zum rückseitigen Rahmenschenkel besteht die Übereinstimmung mit dem im Schadenskatalog konstituierten Merkmal Keilrahmensprung. Da für die Schadensausprägungen klimatische Belastungen anzunehmen sind (maltechnische Fehler konnten jedoch auch nicht ausgeschlossen werden), resultiert daraus ein deutliches Plädoyer für die Notwendigkeit eines Rückseitenschutzes. Damit skizziert sich gleichsam ein neues Forschungsfeld für das Verfahren. Für die vorliegende Arbeit ist es jedoch weitaus entscheidender zu konstatieren, dass es erstmals gelang, über konsekutive Experimente an einem vormals unbeschädigten Probekörper kleinste Stufen der Veränderung zu visualisieren, die auf wiederholte Belastung zurückzuführen sind. Die sequentielle Dokumentation ist

dabei hochauflösend und dreidimensional. Somit kann ein valider Beleg über das im ersten Teil der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell zur Zerfallskurve in Abhängigkeit zu kumulativen Belastungen erbracht werden (►Abb. 40|). Erwähnenswert ist ebenso der erstmalige, dreidimensionale Schadensnachweis einer neuen Fehlstelle an einem gemälde-ähnlichen Gefüge. Neben der Ursachenbestimmung einer Klimaschwankung (52,1 → 64,0 %RH, Δ11,9 %RH) gelang die Quantifizierung in den Sub-Millimeterbereich (0,543 x 0,446 mm (≈0,242 mm²)). In Anbetracht des geringen Ausmaßes wird damit die herausragende Leistungsfähigkeit des Verfahrens unter Beweis gestellt. Der Nachweis über die beiden zuletzt aufgeführten Schadensmerkmale ist insofern von besonderer Relevanz, da es sich um maßgebliche Merkmale handelt, die bei der Beurteilung von Transportschäden von entscheidender Bedeutung sind.

Realobjekte

Über die Detektion klimatisch bedingter Veränderungen an Realobjekten konnten die vorherigen Ergebnisse ebenfalls bestätigt und zugleich um entscheidende Erkenntnisse erweitert werden. So ließen sich Topografieveränderungen sowohl qualitativ wie auch quantitativ bestimmen, bspw. eine Beule (0,050 mm, entlang Z-Achse), die auf eine geringfügige Befeuchtung zurückgeführt werden konnte (59,5 → 64,1 %RH, Δ4,6 %RH), außerdem eine Delle bei gegenteiliger Belastung am selben Untersuchungsgegenstand (-0,090 mm, entlang Z-Achse). Hierfür war eine moderate Trocknung (64,1 → 54,7 %RH, Δ9,4 %RH) ursächlich. Ferner konnten Schollenbewegungen visualisiert werden. Diesbezüglich ist die dreidimensionale Bildgebung bereits ein Novum. Konservierungswissenschaftlich ist jedoch weitaus bedeutsamer, dass die Veränderung ursächlich auf geringfügige Klimaschwankung zurückzuführen sind (55,3 → 58,9 %RH, Δ3,6 %RH). Strukturell äußern sich diese in sich aufwerfenden und niederlegenden Craquelé-/Schollen-Kanten, was auf entsprechende Materialverspannungen rückschließen lässt. Es besteht die Merkmalsübereinstimmung mit dem Schadensbild Schüsselbildung. Anknüpfend an die Forschungsergebnisse von SCHAIBLE gelang es mit dem hier verwendeten Verfahren, temporale Veränderungsprozesse im hochauflösenden, dreidimensionalen Bereich zu visualisieren und sogar zu quantifizieren. Die zugrundeliegende Erforschung der Ursache stellt dabei den entscheidenden wissenschaftlichen Mehrwert dar. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen an den Textilprobekörpern konnte an den Originalproben abermals ein bildgebender Beleg über eine erhöhte Klimasensitivität jenes Malschichtbereiches erbracht werden, der von den rückseitigen Rahmenschenkeln ungeschützt ist. Außerdem zeigte sich, dass bereits geringfügige Klimaschwankung in ihrer Kumulation (auch im mittleren Feuchtebereich) bei dem historischen Probenmaterial zu Schäden führte (55,3 → 58,9 → 63,3 %RH, Δ3,6 %RH bzw. Δ4,4 %RH). So ist eine gelockerte Scholle (0,080 mm, entlang Z-Achse) bei einem gealterten, aber vormals als intakt bewerteten

Materialgefüge nachzuweisen. Mit diesem, ebenso als essenziell zu bewertenden Ergebnis ließ sich dreierlei belegen:

1. die Verfahrenseignung zur hochauflösenden 3D-Digitalisierung originaler Gemäldestrukturen,
2. die Nachweisführung über strukturelle Veränderungen (das zugleich die Effizienz der entwickelten Auswertungsstrategie unterstreicht) und
3. die Relevanz für die Konservierungswissenschaft. So sind naturwissenschaftlich gestützte, stichhaltige Daten dafür gegeben, die gemeinhin als unbedenklich geltenden Klimarichtwerte der musealen Praxis einer Neubewertung zuzuführen. Unter Berücksichtigung objektspezifischer Gegebenheiten empfiehlt es sich die Spannweiten tendenziell zu verringern.

Neben diesen Resultaten ist das erstmalige Gelingen einer Detektion von Craquelé-Merkmalen hervorzuheben. Dies war mit einer älteren Sensorgeneration bislang nicht möglich. So wurde bis dato hypothetisch angenommen, dass Craquelé-Kanten und/oder Risse einem erhöhten Veränderungspotenzial unterliegen und Klimaschwankungen sich erstmals substanziell äußern. MECKLENBURG belegte diesen Sachverhalt lediglich anhand einer Modellbildung. Im Kontext einer moderaten Klimaschwankung (64,1 → 54,7 %RH, Δ9,4 %RH) konnte, im Rahmen der hier zusammengefassten Experimente, nun eine praxisbezogene Verifizierung erfolgen; diese mit dem Resultat eines tatsächlichen bildgebenden Belegs. Die nachgewiesenen Veränderungen beschränkten sich auf die Gefügegrenzflächen. Sie äußerten sich dort in windschiefen Verkantungen und lateralen Dimensionsänderungen. Die dargelegten Ergebnisse sind insofern von Bedeutung, da sich an ihnen aufzeigen lässt, dass Bereich mit vorhandenen Imperfektionen tendenziell einem höheren Veränderungspotential unterliegen als Bereiche ohne Vorschäden. Bei künftigen Identifizierungen und Bewertungen von Transportschäden sind jene Strukturen daher besonders in Augenschein zu nehmen. Wie dies bereits bei den Textilprobekörpern nachgewiesen wurde, konnten bei den Realobjekten ebenso neue Fehlstellen im Sub-Millimeterbereich messtechnisch nachgewiesen werden. Hinsichtlich geringer Abmessungen der Fehlstellen und der Unübersichtlichkeit eines gealterten und mit Vorschäden versehenden Bildschichtengefüges, erweist sich das Streifenprojektionsverfahren abermals in herausragender Weise.

Originale Gemälde

Schließlich konnten bei den Experimenten zur Transportsimulation an vollständigen Originalen wesentliche Erkenntnisse bestätigt werden, die zuvor über die Laborexperimente an Probekörpern und Realobjekten bildgebend belegt worden waren. Dieses umfasst bei einem Gemälde auf textilem Bildträger bspw. die Bildgebung über eine Delle (-0,767 mm, entlang Z-Achse). Sie ist auf eine geringfügige Trocknung zurückzuführen (52,3 → 57,1 %RH, Δ4,8 %RH). Eine moderate Befeuchtung des selben Gemäldes (64,5 → 55,2 %RH, Δ9,3 %RH) führte vice versa zu einer Beule (0,450 mm, entlang Z-Achse).

In Anbetracht der Bedeutung des Craquelé-Nachweises können durch diese Studie erstmals für vollständige Originalen entsprechende Ergebnisse vorgewiesen werden. So führte eine moderate Befeuchtung (57,1 → 64,5 %RH, Δ7,4 %RH) zu deutlichen Soll-Ist-Diskrepanzen, die sich vornehmlich im Spaltbereich des Bildschichtengefüges durch eine laterale Verschiebungen äußerten (0,050 mm, entlang X/Y-Achse). Die 3D-Bildgebung der Kanten-Klaffung zeigt einerseits Unerwartetes und belegt andererseits die Verfahrensvorzüge. Gleichermaßen offenbart sich, dass Areale mit vorhandener Gefüge-Imperfektion einem erhöhten Veränderungspotenzial unterliegen; ein Ergebnis, welches durch mehrere Experimente kreuzüberprüft und somit verifiziert wurde.
Mit dieser Untersuchung ist ferner der bislang unbekannte Sachverhalt belegt, dass der Übergangsbereich flacher zu besonders zerklüfteten Malschichtarealen auf klimatische Belastung sehr viel ausgeprägter reagierte als ein topografisch gleichförmiges Materialgefüge. Hier konnten lokale Veränderungen dokumentiert werden, bspw. bei deutlichen Pastositäten. Im nachgewiesenen Fall reagierte das Materialgefüge mit einer nicht unerheblichen Erhebung (0,600 mm, entlang Z-Achse). Als Belastung lag eine geringfügige Befeuchtung vor (52,3 → 57,1 %RH, Δ4,8 %RH). Gleichermaßen konnte ein umgekehrter Fall visualisiert werden: eine Verformung im Übergang eines flachen Malschichtareals hin zu einer lokal begrenzten, lochähnlichen Vertiefung (0,500 mm, entlang X/Y-Achse). Als Belastung lag im zuletzt geschilderten Fall eine moderate Befeuchtung vor (63,5 → 54,15 %RH, Δ9,4 %RH). Obgleich also diese Veränderungen visualisiert werden konnte, steht eine weitergehende Untersuchung sowie eine stichhaltige Erklärung aus. Naheliegend ist, dass die entsprechende Schichtstärke bei den beschriebenen Veränderungen eine entscheidende Rolle spielt. Konservierungswissenschaftlich relevant ist der geschilderte Zusammenhang insofern, als dass bei künftigen Beurteilungen von Transportschäden auch diese Bereiche verstärket im Fokus stehen müssen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Gemäldetransporten sind zur abschließenden Beurteilung der Verfahrenseignung des 'COMET-Systems' von besonderer Relevanz. So wurden Gemälde auf textilem Bildträger sowie Holztafelgemälde vor ihrem Transport gescannt, dann fachgerecht verpackt, einem gewöhnlichen Transport ausgesetzt, nach einer Akklimatisierungsphase am Zielort erneut digitalisiert und abschließend mit Hilfe eines Soll-Ist-Vergleichs bewertet. Dabei ist die wesentliche Erkenntnis, dass trotz des sachgerechten Umgangs mit den Objekten Veränderungen an ihnen messtechnisch nachgewiesen werden konnten. Beim Transport eines Leinwandgemäldes wiesen mitgeführte Datenlogger am Objekt eine Spannweite von Δ0,6 %RH auf, wobei die Extremwerte bei 59,9 %RH und 60,5 %RH lagen. Weiter konnte auch bei einem Leinwandgemälde ein erster bildgebender Nachweis über die unmittelbare Effizienz einer vorderseitigen Verglasung und eines Rückseitenschutzes aus Karton erbracht werden. Der Vergleich der Messdaten eines entsprechend geschützten Gemäl-

des mit den Daten desselben Objektes in weniger geschütztem Zustand belegt eindeutig aufgrund geringer Soll-Ist-Diskrepanzen eine gesteigerte Pufferwirkung von zusätzlichem Glas- und Kartoneinsatz. Zudem gelang es erstmals mit Hilfe dieser neuen Verfahrensanwendung an einem originalen Holztafelgemälde einen systematischen Nachweis über graduelle Veränderungen zu erbringen; dies trotz stets sachgerechtem Objekthandling. Das besagte Gemälde wurde vor Transportbeginn durch fachkundige Restauratoren untersucht und als sowohl unversehrt wie auch als transportfähig bewertet. Der Zustandsvergleich der Soll- und Ist-Daten belegte jedoch nach dem Transport eine lokal begrenzte Veränderung in Form einer aufstehenden Scholle im Sub-Millimeterbereich (0,250 mm, entlang Z-Achse). Zwischen den Digitalisierungen konnten am Objekt geringfügige Klimaschwankungen mit einer Spannweite von Δ2,7 %RH nachgewiesen werden. Das Ergebnis überraschte aufgrund seiner Eindeutigkeit. Obgleich ein weiterer Transport aus Gründen der prognostischen Annahme zusätzlicher Folgeschäden in der musealen Praxis nicht ohne vorherige Festigungsmaßname vertreten worden wäre, wurde sich bewusst für einen solchen Weg entschieden. Tatsächlich belegte die Bildgebung einer Falschfarbendarstellung im Anschluss an einen erneuten Transport im Bereich der vorherigen Imperfektion eine neue Fehlstelle. Diese konnte über virtuelle Messschieber mit 2,0 x 0,5 mm quantifiziert werden. Zwischen den Digitalisierungen ist am Objekt eine Klimaschwankung von Δ3,6 %RH belegt. Über das Streifenprojektionsverfahren konnte damit an einem Original eine objektive, hochauflösende 3D-Bildgebung über die Ereigniskette eines unbeschädigten Vorzustandes, einer Veränderung in Form aufstehender Malschicht und letztlich dessen Kumulation in einem Malschichtverlust erbracht werden. Da gemäß der eigenen Herleitungen eine eindeutige Kausalbeziehung zu einem Ereignis – genauer, einem Transportereignis – besteht, kann im vorliegenden Fall von einem Schaden – genauer: von einem Transportschaden – gesprochen werden. Zugleich bestätigte sich anhand der Daten zum hier explizierten Einzelfall, dass wiederholte Kunsttransporte zu verschiedenen Stadien von Veränderung führen, die sich letztlich als Schaden summieren.

Resümee

Zusammenfassend bestätigte sich durch die aufgezeigten Ergebnisse aus den vorgenommenen Laborexperimenten einerseits, aber auch anhand praxisimitierender Gemäldetransporte andererseits, die dieser Arbeit zugrundeliegende These. Selbst geringfügigste Klimaschwankungen im mittleren Bereich der relativen Feuchte (die gemeinhin als unbedenklich eingestuft werden) führen zu Objektveränderungen mit signifikanten Merkmalsausprägungen. In Übertragung auf den musealen Leihverkehr und den Kunsttransport per se, führen selbst geringste Belastungen demnach zu einer beschleunigten Alterung und damit zu einem frühzeitigeren Zerfall des Kulturgutes.

Die Konservierungswissenschaft ist mit der vorliegenden Arbeit um wichtige Erkenntnisse erweitert. Rekurrierend auf das von HERDIN und BURMESTER proklamierte Desiderat einer unzureichenden

Datenlage zum Objektverhalten bei Klimaschwankungen, stehen hiermit erste naturwissenschaftlich erhobene Untersuchungsergebnisse zur Verifikation bereit. Ferner legt die hier ausgebreitete Datenlage nah, hinsichtlich präventiver Überlegungen eine grundsätzliche Neubewertung jener Klimagrenzwerte voranzutreiben, die für den sachgerechten Erhalt von Gemälden als unbedenklich gelten können. Das heißt, die aktuell bestrebte Ausweitung zulässiger Grenzwerte bis auf 40-60 %RH (bei tageszeitlich akzeptierten Schwankungen von ±10 %RH ('Bizot-Gruppe')) ist mit der vorliegenden Datenlage ausdrücklich nicht zu rechtfertigen. Allerdings können mit dieser Studie auch keine neuen, als unbedenklich geltenden, Grenzwerte konkretisiert werden. Hierfür bedarf es eines erheblich größeren Forschungsrahmens mit einer darauf explizit eingegrenzten Fragestellung (►Kapitel 27|). Erlaubt aber ist eine erste Einschätzung: Unter Betrachtung der hiermit zur Verfügung gestellten Datenlage scheint der mittlere Feuchtebereich tendenziell optimal zu sein; d.h. tageszeitliche Schwankungen sollten aus Gründen der Schadensprävention unter keinen Umständen größer sein als Δ5 %RH. Selbst in diesem Bereich konnten signifikante Veränderungen nachgewiesen werden!
Nicht zuletzt ist durch die dargelegte Faktenlage eine größere Sensibilität im Umgang mit Gemälden angemahnt; eine Neubewertung insbesondere von Transport- und Leihvorgängen wäre wünschenswert. Gleichwohl aber wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die vorgelegten Ergebnisse nicht dazu auszulegen sind, Transportvorgänge und Leihanfragen per se zu negieren. So lässt ein gesteigerter Aufwand bei Verpackung und Transport auf einen verbesserten Kulturgutschutz rückschließen. Zumal muss sich eine entsprechende Entscheidung weiterhin an objekt- und einzelfallspezifischen Kriterien orientieren. Darüber hinaus generiert sich bei Gemälden der wesentliche Sinn bekanntlich aus ihrer Betrachtungsmöglichkeit. Aus konservierungswissenschaftlicher Perspektive mündet die Bindung an den materiellen Bestand jedoch argumentativ darin, die materielle Authentizität und expressive Komplexität von Kulturgütern zu sichern, zu erforschen und an die folgenden Generationen weiterzugeben. Es sind einmalige, unersetzbare Zeugnisse, deren vielfältige Botschaften der Schlüssel zu unserem Verständnis der Geschichte und ihren Auswirkungen in die Gegenwart sind. In Anbetracht dieser Tragweite muss die restauratorische Beurteilungs- und Entscheidungsbefugnis durch fundiertes Wissen gestärkt werden – vielleicht hat diese Arbeit ja dazu einen kleinen aber wichtigen Beitrag geleistet…

27. Ausblick

Die nachgewiesene Verfahrenseignung und die überzeugenden Ergebnisse motivieren dazu die Streifenprojektion als Monitoringinstrument in den musealen Leihverkehr zu implementieren. Aus einer praktischen Studie könnten umfassende Ergebnisse über mögliche Transportbelastungen von Gemälden und daraus resultierende Objektveränderungen weiter vertieft werden – wie dieses aufgezeigt wurde: ein dringend notwendiger Schritt. Im Zuge dessen könnten weitere, die Belastung beeinflussende Parameter wie Verpackungen und Verpackungstechniken, Transportabläufe, aber auch Akklimatisierungszeiträume untersucht werden. Überdies sollten ebenso jene Belastungen untersucht werden, die im Zusammenhang des Objekthandlings im Museum selbst stehen. Wie aufgezeigt, gibt die Literatur hier Hinweise auf ein nicht unerhebliches Belastungspotentzial. Im Idealfall ist in Ergänzung auch eine Sensorik zur Detektion mechanischer Schock- und Vibrationsbelastungen einzusetzen – wie sie bereits erfolgreich im Rahmen des 'KTI-Projektes' angewandt wurde. Für eine effektive und umfassendere Analyse von Veränderungsprozessen wird die Ergänzung um die Shearografie als vielversprechend bewertet. So zeigt die Forschungsarbeit des beteiligten Projektpartners, zur Detektion von sich unter der Oberfläche befindenden Gefügeschwächen – obgleich diese noch nicht abgeschlossen ist – erste, positive Ergebnisse und somit den Mehrwert der Verfahrensanwendung auf. Von der verfahrenstechnischen Ausweitung wird sich eine die Vor- und Nachteile der beteiligten Messsysteme ausgleichende Inspektionstechnik zum Monitoring komplexer Veränderungsmerkmale an Gemälden versprochen. Aufgrund bestehender Restriktion der Streifenprojektion konnte aufgezeigt werden, dass sich eine deutlicher Mehrwert aus der Kombination der Messbilder mit hochauflösende Digitalfotos ergibt. Da Farbwerte bei der Strukturaufnahme der Streifenprojektion verfahrensbedingt unberücksichtigt bleiben, würden sich die Fotos zur Texturierung der 3D-Modelle eignen. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass extrem dunkle Objektoberflächen bei den 3D-Aufnahmen zu Messlücken führen, woraus mitunter ein erheblicher Informationsverlust resultiert. Fotografische Bild-Informationen könnten hier, wenngleich auch nur zweidimensional, als Ergänzung dienen. Weiter zeigte sich die fotografische Verfahrensüberlegenheit in Bezug auf die Nachweisführung extrem feiner Strukturen unterhalb der Auflösungsgrenze des 'COMET-Systems'. Unter der Vorraussetzung, dass diese einen Kontrastunterschied aufweisen, können bspw. extrem feine Risse visualisiert werden. Darüber hinaus wird mit der Verfahrenskombination von Streifenprojektion und hochauflösender Fotografie den Sehgewohnheiten der Kunstwissenschaft entsprochen. Dieses begünstigt mit Sicherheit eine Akzeptanz des Verfahrens. Ein entsprechender Lösungsweg konnte bereits erarbeitet werden, wobei eine technisch anspruchsvolle Umsetzung en détail bisweilen aussteht. Eine weitere Aktzeptanzsteigerung und praktische Systemverbesserung würde die Implementierung einer effizienten Kartierungsfunktion in die Software 'INSPECTplus'

bedeuten. Gemeint ist die virtuelle Markierung jener Areale im 3D-Modell, die sich beim Original durch Veränderungen hervorgetan haben, oder wo ebendiese zu erwarten sind. Somit würde ein effizientes, der Arbeitsweise von Restauratoren entsprechendes Monitoring erzielt werden.
Eine weitere Anpassung des 'COMET-Systems' zur Steigerung der Praxistauglichkeit hinsichtlich des forcierten Transportschadensmonitoring von Gemälden sollte am Messvolumen vorgenommen werden. Letztlich waren beide verwendeten Sensorvarianten zur Beantwortung der Fragestellung zielführend, jedoch optimierungsbedüftig. So eignete sich 'COMET 5 11M 80' zwar sehr gut für die konservierungswissenschaftliche Grundlagenforschung und Messaufgaben mit höchsten Ansprüche an die Detailgenauigkeit. Aufgrund der geringen Größe des Messvolumens war eine vollständige Erfassung des Untersuchungsgegenstandes aber oft nicht gegeben. Auch das große Datenvolumen war in der praktischen Anwendung hinderlich. Umgekehrtes gilt für 'COMET 5 11M 1000', das aus praktischen Gründen insbesondere bei der Digitalisierung großformatiger Gemälde eingesetzt wurde. Letztlich würde für den musealen Einsatz ein optimaler Kompromiss vermutlich in der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 350' bestehen. Diese entspricht einem Messvolumen von 345 x 230 x 200 mm³, bei einem Punktabstand von 85 µm.[673] Da im Laufe der Forschungsarbeit eine erhebliche technische Weiterentwicklung seitens der Computertechnik verzeichnet werden konnte, und die Datenbe- und nachverarbeitung mitunter erhebliche Probleme bereitete, sollte überdies ein noch leistungsstärkerer Rechner eingesetzt werden.
Im Weiteren sollte hinsichtlich des entwickelten Schadenskataloges dieser, zur weiteren Vertiefung und Komplettierung des Informationsgehaltes, um eine repräsentative fotografische Dokumentation der einzelnen Schadensbilder erweitert werden. Da die Etablierung einer einheitlichen und verbindlichen Terminologie nur gelingen kann, wenn diese frei zugänglich ist und von breiten Teilen der Fachschaft akzeptiert wird, sollte die Möglichkeit zur Kooperation und einer interaktiven, uneingeschränkten Auseinandersetzung bestehen. Hierfür eignet sich eine Plattform zur einfachen Bearbeitung im Internet – wie der Veröffentlichung in einem Wiki.
Auf die Laborexperimente bezugnehmend wird darauf hingewiesen, wie erforderlich eine umfangreiche Studie über das Materialverhalten bei Klimaschwankungen ist – insbesondere in Hinblick auf die Eingrenzung unbedenklicher Klimarichtwerte. Die vorliegenden Ergebnisse stellen diesbezüglich zwar einen Anfang dar, dennoch sind die Erkenntnisse für die Ableitung grundlegendem Materialverhaltens und die Definiton von Richtwerten nicht ausreichend. Autorenseitig wird eine Fokussierung auf den mittleren Feuchtebereich vorgeschlagen. Zur Untersuchung der Reaktion des Materialgefüges werden ferner möglichst geringe Schwankungen der relativen Feuchte empfohlen. Entscheidend ist darüber hinaus, dass für die zugrundeliegenden

673 Vergleiche hierzu die technischen Angaben aus ►Tab. 16|.

Laborexperimente dann sehr viel zahlreichere Probekörper, Realobjekte und Gemälde verwendet werden müssten. Auf diese Weise könnten sich dann objektspezifische Charakteristika vom globalen Verhaltensmuster abgrenzen lassen.

28. Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation *'Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren'* entstand im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes: '3D_artscan'.

Den Ausgangspunkt stellten Hinweise über eine immens gestiegene Zahl an Sonderausstellungen und damit verbundene Kunststransporten dar, sowie davon abgeleitete Äußerungen über die negativen Folgen für Gemälde, was in der Annahme einer gesteigerten Abnutzung von Kulturgut kulminiert. Unter einem moralphilosophischen Blickwinkel handelt es sich bei Kunstwerken um einmalige, unersetzbare materielle Zeugnisse, deren vielfältige Botschaften der Schlüssel zu unserem Verständnis der Geschichte und ihren Auswirkungen in die Gegenwart ist. Dementsprechend ist unsere Haltung im zugrundeliegenden Dissens von Bewahrung und Vermittlung kritisch zu hinterfragen. Aufgrund eigener Untersuchungen konnten Fakten zusammengetragen werden die tatsächlich einen Anstieg an Gemäldetransporten bekräftigen. Gleichwohl sind Daten über damit verbundene Abnutzungserscheinungen nicht existent beziehungsweise zugänglich.

In der musealen Praxis gilt es, möglichst in kurzer Zeit, Transportschäden oder Schäden, welche über die Dauer einer Ausstellung entstanden sind, exakt zu erfassen. Nicht immer führen Transporte zu deutlich sichtbaren Schäden – vielmehr handelt es sich um die Summierung kleinster Veränderungen. So wirken sich wechselnde klimatische Bedingungen, Erschütterungen etc. auf die Materialität, der vielfach aus komplexen Materialgefügen bestehenden Kunstwerke aus, was zu Veränderungen und, in Annahme, zu einer beschleunigten Alterung führt. Durch die vorliegende Forschungsarbeit konnten zwei wesentliche Desiderate aufgezeigt werden.

- Erstens ist das Wissen über die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das Materialgefüge von Gemälden lückenhaft und tendenziös.
- Zweitens gibt es kein zeitgemäßes Verfahren für ein umfassendes Schadensmonitoring – in besonderem Maße bezieht sich dieses auf die Objektivität der Nachweisführung aber auch die Berücksichtigung dreidimensionaler Veränderungen.

Abstract

This dissertation *,The material alteration of art through transportation – usage of the fringe projection system for monitoring and evaluation of damages on paintings due to transportation'* was developed within the project ‚3D_artscan', supported by the ‚Deutsche Forschungsgemeinschaft'.

The assumption that the massive increase of temporary exhibitions and therewith the increase in transportation of art has negative consequences on the paintings, leading to the abrasion of cultural asset – initiating this project. Observing this through a moral philosophical point of view, we come to the conclusion that these pieces of art are unique, irreplaceable, material evidences, helping us to appreciate the past and its impact on the present. Due to this fact our attitude regarding the disagreement between conservation and exhibiting must be scrutinised. Investigations have revealed that the assumption of an increase in art transportation can be confirmed. Nevertheless evidence of its abrasion on art couldn't be found or doesn't exist at all. In museum work it is important to register damages precisely, accuring during transport or the exhibition itself. Damages caused by transportation are not always obvious – in fact they are the accumulation of minimal alteration. Climatic variations, shocks etc. have an effect on the complex materiality of works of art. This leads to alteration – and assumably exhilarates the ageing process.

This dissertation revealed a substantial desideratum for research:

- First the knowledge of climatic alteration and their effects on material substance of paintings is fragmentary and biased.
- Secondly there is no contemporary technique for a comprehensive damage monitoring – especially regarding the impartiality of the verification management as well as the detection of three dimensional alterations.

Therefore the main subject of research object was the examination, development and evaluation of a technique for three dimensional detection and classification of topographical alteration on paintings, due to transportation. For this purpose the fringe projection method was chosen – the sensor ‚COMET 5 11M' developed by ‚Steinbichler Optotechnik GmbH'. A discourse on ageing and damage, revealed the problems

Der zentrale Forschungsgegenstand galt daher der Prüfung, Entwicklung und Evaluation eines Verfahrens zur dreidimensionalen Detektion und Klassifikation transportbedingter, mikrotopografischer Veränderungen an Gemälden. Hierzu wurde das Streifenprojektionsverfahren gewählt – der Sensor 'COMET 5 11M' der Firma 'Steinbichler Optotechnik GmbH'.

Neben einem Diskurs über die Begriffe Alterung und Schaden, wodurch eine Abgrenzungsproblematik offenkundig wurde, konnte im Weiteren eine inhomogene Fachsprache hinsichtlich der Schadensterminologie aufgedeckt werden, Entsprechend wurde ein synoptischer Schadenskatalog konstituiert, der eine systematische Klassifikation und präzise Deskriptionen der einzelnen Schadensmerkmale umfasst.

In umfangreichen Laborexperimenten und praxisimitierenden Gemäldetransporten wurden zahlreiche Untersuchungen zum Verhalten des Künstlermaterials bei Klimaschwankungen vorgenommen. In einander verifizierenden Experimenten konnten durch die hochauflösende, dreidimensionale Bildgebung der Streifenprojektion, anhand von Probekörpern und Gemälden, Veränderungen im Sub-Millimeterbereich objektiviert werden. Aufgrund ihrer geringen raumdimensionalen Merkmalsausprägung sind diese auch aufmerksamen Restauratoren entgangen. Erstaunlich ist fernerhin, dass die Veränderungen oftmals kausal auf Klimaschwankungen im mittleren Bereich der relativen Feucht zurückzuführen sind, der gemeinhin konservierungswissenschaftlich als unbedenklich gilt. Bisweilen führten sogar Klimaschwankung <5 %RH zu Objektveränderungen mit signifikanter Merkmalsausprägung. Zugleich konnte erstmals der bildgebende Beweis erbracht werden, dass bei vorhandenen Gefügeimperfektionen in Bezug auf Klimaschwankungen tatsächlich ein erhöhtes Veränderungspotenzial besteht. Diese Bereiche müssen daher bei der Beurteilung etwaiger Veränderungen durch Ausstellung und Transport verstärkt in Augenschein genommen werden. Darüber hinaus konnte weiter belegt werden, dass wiederholte moderate Klimaschwankungen bei Gemälden zu strukturellen Veränderungen führen, die sich kumulativ durchaus in einem Schaden äußern. Im Kern setzen die erhobenen Messdaten damit den Bestrebungen, die gängigen Klimarichtwerte in den Museen auszuweiten, eine naturwissenschaftlich belegte konverse Faktenlage entgegen.

of differentiation and furthermore an inhomogeneous technical language particularly for the terminology of damages. As a result a catalogue of damages, with a systematical classification and precise description of individual characteristics, was compiled. In extensive laboratory experiments and art transports, performed under real conditions, the impact of climatic variations on the materials used in art was examined. In several verifying experiments on test samples and paintings alterations in sub-millimeter range were detected using the high-definition, three dimensional imaging process of the fringe projection. Due to their minimal dimensional characteristics even attentive restaurateurs didn't recognise those alterations. The alterations were often caused unexpectedly by climatic variations of relative humidity in medium range, which is still declared as harmless by conservation science. Even climatic variations less than 5% of relative humidity caused significant alteration on the objects. Also through using the imaging process it was possible for the first time to prove, that art-material with imperfections is more susceptible to climatic variations. Therefore in order to evaluate the possible alteration caused by exhibitions and transportation, those ranges of relative humidity should be more precisely observed. Furthermore it could be proved, that a repeated exposure of a painting to moderate climatic variations leads to structural changes. In accumulation they result in a damage. These results provide a controversial, scientifically proved argument against the intention of expanding the actual climatic standard values in museums. So the question, if *art transportation causes an increased abrasion of paintings and how far the fringe projection can be used as a monitoring technique for possible alteration on paintings caused by transportation*, can be affirmed by the results of this dissertation.

Demzufolge muss die eingangs gestellte Frage, *ob aus einem Kunsttransport eine gesteigerte Abnutzung von Gemälden resultiert und inwiefern sich das Streifenprojektionsverfahren im genannten Kontext zum Monitoring möglicher Transportfolgen eignet*, durch die vorliegende Forschungsarbeit affirmiert werden.

29. Anhang

29.1 Tabelle zur Auswertung der Daten des 'Institut für Museumsforschung'

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
Jahr	Museen (gesamt)	Kunstmuseen	Ausstellungshäuser (gesamt)	Museen mit Sonderausstellungen (gesamt)	Kunstmuseen mit Sonderausstellungen	Sonderausstellungen (gesamt)	Sonderausstellungen in Kunstmuseen	Sonderausstellungen mit Schwerpunkt Kunst	Ausstellungen mit Schwerpunkt Kunst in Ausstellungshäuserm	Ausstellungshausbesuche (Meldezahl gemäß Fragebogen)	Museumsbesuche (gesamt, Meldezahl gemäß Fragebogen)	Museumsbesuche in Kunstmuseen	Museumsbesuche in Museen mit Sonderausstellungen (gesamt, Meldezahl gemäß Fragebogen)	Museumsbesuche in Kunstmuseen mit Sonderausstellung	Rücklaufquote Fragebogen Museumseinrichtungen	Rücklaufquote Fragebogen Ausstellungshäuser	Quellennachweis	Referenzseite für Spalte B, C, L, M	Referenzseite für Spalte E, F, G, H, N, O	Referenzseite für Spalte I	Referenzseite für Spalte D, K, P, Q, R	Referenzseite für Spalte J
1990	4.034	426	334	1.768	257	7.114	1.548	2.590	906	3.855.530	97.089.535	16.817.988	63.608.390	14.404.602	89,3%	79,3%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1991	22	30	31	3	50
1991	4.316	456	344	1.868	269	7.282	1.600	3.008	1.239	3.585.454	92.400.200	15.796.903	58.301.211	12.853.483	88,8%	76,5%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1992	26	34	35	3	52
1992	4.475	473	347	1.929	272	7.787	1.616	3.363	1.243	5.255.583	93.020.297	16.276.057	60.326.580	13.915.321	89,3%	79,3%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1993	28	36	37	3	66
1993	4.682	506	369	2.021	289	7.650	1.511	3.206	1.366	4.685.813	93.755.602	15.376.521	60.421.659	12.122.923	88,2%	76,2%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1994	30	72	73	3	75
1994	4.827	524	463	2.125	318	8.133	1.681	3.405	1.668	4.574.516	91.201.785	15.000.178	59.390.387	11.934.914	89,1%	73,4%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1995	33	72	73	3	75
1995	4.919	534	495	2.212	308	8.426	1.596	3.189	1.730	4.679.077	91.062.176	14.649.422	61.171.956	11.301.824	88,0%	76,6%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1996	30	75	76	3	78
1996	5.040	540	504	2.219	313	8.394	1.587	3.301	1.585	4.836.121	90.555.566	14.460.935	58.225.734	11.617.708	88,8%	74,8%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1997	25	68	70	3	72
1997	5.219	555	494	2.385	332	8.766	1.652	3.433	1.523	5.671.696	92.685.889	14.439.129	60.895.011	11.582.305	89,3%	73,3%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1998	27	77	78	3	81
1998	5.376	559	476	2.502	333	9.201	1.715	3.531	1.586	5.795.548	95.342.524	15.298.340	63.245.831	12.416.045	81,2%	75,6%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 1999	28	73	75	3	79
1999	5.629	577	484	2.518	335	9.218	1.695	3.544	1.587	5.824.950	96.190.374	15.923.959	63.733.469	13.270.789	82,8%	77,5%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2000	28	76	77	3	77
2000	5.827	585	490	2.598	346	9.348	1.698	3.591	1.588	5.333.834	99.560.001	15.122.278	64.688.256	12.248.841	80,9%	75,9%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2001	27	76	77	3	79
2001	5.897	600	494	2.585	358	8.973	1.699	3.582	1.535	7.658.381	102.965.544	16.251.180	66.359.147	13.010.544	81,8%	79,6%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2002	22	65	66	3	79
2002	6.059	604	488	2.649	345	9.273	1.812	3.741	1.653	7.511.111	101.218.801	17.250.796	64.686.451	13.714.537	80,7%	78,9%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2003	22	60	61	3	75
2003	6.135	611	476	2.747	365	9.222	1.737	3.282	1.539	6.088.957	98.361.816	17.040.504	63.472.287	13.548.090	86,9%	76,3%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2004	21	65	66	3	75
2004	6.177	618	500	2.694	348	9.042	1.662	3.119	1.710	6.176.961	103.235.469	19.088.333	68.268.130	15.392.962	84,9%	75,6%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2005	20	65	66	3	75
2005	6.155	616	488	2.661	337	9.364	1.724	3.312	1.803	6.924.337	101.406.806	19.230.660	67.029.378	15.188.011	84,8%	80,7%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2006	20	61	62	3	73
2006	6.175	628	496	2.652	342	9.198	1.789	3.241	1.738	7.056.912	102.345.078	19.941.292	66.819.090	15.965.143	82,6%	75,0%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2007	20	64	65	3	73
2007	6.197	631	472	2.714	338	9.235	1.698	3.120	1.596	6.155.155	107.303.946	21.410.435	71.676.272	17.466.823	81,8%	72,4%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2008	20	60	62	3	70
2008	6.190	634	488	2.664	349	9.145	1.667	3.129	1.608	6.185.463	104.852.334	19.688.808	67.641.075	15.682.362	83,2%	74,8%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2009	20	63	64	3	74
2009	6.256	653	486	2.781	379	9.272	1.768	3.126	1.562	6.422.298	106.820.203	18.333.890	73.087.492	15.368.559	82,7%	71,4%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2010	20	57	58	3	69
2010	6.281	660	484	2.729	380	9.172	1.786	3.352	1.608	6.165.670	109.196.469	19.270.693	74.748.734	16.810.795	83,3%	75,0%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2011	20	62	63	3	75
2011	6.304	668	482	2.829	402	9.180	1.845	3.412	1.614	6.381.081	109.581.613	18.604.073	74.976.499	15.705.847	83,2%	73,2%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2012	22	63	64	3	74
2012	6.355	680	477	2.750	384	8.940	1.792	3.518	1.639	6.594.244	112.807.633	19.663.117	77.759.193	16.884.221	82,4%	74,2%	STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN – PREUßISCHER KULTURBESITZ INSTITUT FÜR MUSEUMSFORSCHUNG, 2013	22	63	64	3	75

Tab. 73| Die für die Auswertung relevanten Daten aus den Erhebungen des 'Institut für Museumsforschung', sowie der Verweis ihrer Provenienz.
Quelle: Selbst und Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013 und frühere

29.2 Glossar zur Schadensterminologie: 'Associazione Giovanni Seccosuardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration'

LESSICO TECNICO MULTILINGUE DI CONSERVAZIONE E RESTAURO Dipinto su Tela - Supporto
LEXIQUE MULTILINGUE SUR LA TECHNIQUE ET LA CONSERVATION DES BIENS CULTURELS Peinture sur toile
GLOSSARY MULTILINGUAL TECHNICAL SCIENTIFIC IN CONSERVATION-RESTAURATION Canvas painting - Support
GLOSARIO MULTILINGUE TECNICO-CIENTIFICO DE CONSERVACION Y RESTAURACION DE BIENES CULTURALES Pintura sobre lienzo - Soporte
MEHRSPRACHIGES TECHNISCH- WISSENSCHAFTLICHES LEXIKON ZUR KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG
Gemälde auf textilem Bildträger

TERMINE / TERME / TERM / VOZ / BEGRIFF

2.3.1.2 Delle/ Beule

… Ital … Fra … Eng … Esp X Deu

TERMINI CORRISPONDENTI/ TERMES CORRESPONDANTS / CORRESPONDING TERMS / VOZ CORRESPONDIENTE / KORRESPONDIERENDER BEGRIFF

Ital	Fra	Eng	Esp	Deu
Avvallamento/ Imborsamento	Enfoncement/ Bossellement	Dents/ Protrusions	Abultamientos/ hundimientos	Delle/ Beule

ETIMOLOGIA / ÉTYMOLOGIE / ETYMOLOGY / ETIMOLOGÍA / ETYMOLOGIE

-)

DEFINIZIONE / DÉFINITION / DEFINITION / DEFINICIÓN / DEFINITION

Dellen und Beulen sind lokale Deformationen in der Gemäldestruktur. Eine Delle ist eine partielle konkave Vertiefung, eine Beule eine partielle konvexe Verwölbung.
162 caratteri (spazi inclusi)

DESCRIZIONE / DESCRIPTION / DESCRIPTION / DESCRIPCIÓN / BESCHREIBUNG

Beulen oder Dellen entstehen durch lokale mechanische Krafteinwirkung mit einem stumpfen Gegenstand auf die Gemäldevorderseite **<Druckdelle>** oder die Gemälderückseite **<Druckbeule>**. Die anfängliche Dehnung der Fäden bei Krafteinwirkung begradigt zunächst den Fadenverlauf im Gewebe. Bis zu diesem Punkt wäre eine elastische Rückfederung der Verformung noch möglich. Bei weiterer Krafteinwirkung findet eine Überdehnung der Fäden in Form einer irreversiblen plastischen Verformung in der Weise statt, dass die Einzelfasern des durch den Spinnprozess zusammen gedrehten Fadens abgleiten und der Faden sich im Bereich der lokalen Krafteinwirkung insgesamt verlängert. Dellen und Beulen können auch durch Spannungen im textilen Bildträger entstehen **<Spannungsbeulen>** etwa durch rückseitig aufgeklebte <**Flicken>** wobei hier häufig die lokalen Spannungen durch das unterschiedliche, hygroskopische Verhalten der in die Gewebestruktur eingedrungenen Klebemittel hervorgerufen werden. Extreme, bauchartige Beulen bilden sich bei großformatigen Gemälden häufig im Bereich der unteren Randzone durch eine Überdehnung des textilen Bildträgers **<Ausleiern>** unter dem Eigengewicht der gesamten Gemäldestruktur
1192 caratteri (spazi inclusI)

Abb. 242| Arbeitsvorlage des Glossar zur Schadensterminologie anhand des exemplarischen Schadensbildes 'Delle/Beule' (Seite 1). Quelle: 'Associazione Giovanni Seccosuardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration'

LESSICO TECNICO MULTILINGUE DI CONSERVAZIONE E RESTAURO Dipinto su Tela - Supporto
LEXIQUE MULTILINGUE SUR LA TECHNIQUE ET LA CONSERVATION DES BIENS CULTURELS Peinture sur toile
GLOSSARY MULTILINGUAL TECHNICAL SCIENTIFIC IN CONSERVATION-RESTAURATION Canvas painting - Support
GLOSARIO MULTILINGUE TECNICO-CIENTIFICO DE CONSERVACION Y RESTAURACION DE BIENES CULTURALES Pintura sobre lienzo - Soporte
MEHRSPRACHIGES TECHNISCH- WISSENSCHAFTLICHES LEXIKON ZUR KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG
Gemälde auf textilem Bildträger

TERMINE / TERME / TERM / VOZ / BEGRIFF

2.3.1.2 Delle/ Beule

… Ital … Fra … Eng … Esp X Deu

TERMINI CORRISPONDENTI/ TERMES CORRESPONDANTS / CORRESPONDING TERMS / VOZ CORRESPONDIENTE / KORRESPONDIERENDER BEGRIFF

Ital	Fra	Eng	Esp	Deu
Avvallamento/ Imborsamento	Enfoncement/ Bossellement	Dents/ Protrusions	Abultamientos/ hundimientos	Delle/ Beule

ETIMOLOGIA / ÉTYMOLOGIE / ETYMOLOGY / ETIMOLOGÍA / ETYMOLOGIE

-)

DEFINIZIONE / DÉFINITION / DEFINITION / DEFINICIÓN / DEFINITION

Dellen und Beulen sind lokale Deformationen in der Gemäldestruktur. Eine Delle ist eine partielle konkave Vertiefung, eine Beule eine partielle konvexe Verwölbung.
162 caratteri (spazi inclusi)

DESCRIZIONE / DESCRIPTION / DESCRIPTION / DESCRIPCIÓN / BESCHREIBUNG

Beulen oder Dellen entstehen durch lokale mechanische Krafteinwirkung mit einem stumpfen Gegenstand auf die Gemäldevorderseite **<Druckdelle>** oder die Gemälderückseite **<Druckbeule>**. Die anfängliche Dehnung der Fäden bei Krafteinwirkung begradigt zunächst den Fadenverlauf im Gewebe. Bis zu diesem Punkt wäre eine elastische Rückfederung der Verformung noch möglich. Bei weiterer Krafteinwirkung findet eine Überdehnung der Fäden in Form einer irreversiblen plastischen Verformung in der Weise statt, dass die Einzelfasern des durch den Spinnprozess zusammen gedrehten Fadens abgleiten und der Faden sich im Bereich der lokalen Krafteinwirkung insgesamt verlängert. Dellen und Beulen können auch durch Spannungen im textilen Bildträger entstehen **<Spannungsbeulen>** etwa durch rückseitig aufgeklebte <**Flicken>** wobei hier häufig die lokalen Spannungen durch das unterschiedliche, hygroskopische Verhalten der in die Gewebestruktur eingedrungenen Klebemittel hervorgerufen werden. Extreme, bauchartige Beulen bilden sich bei großformatigen Gemälden häufig im Bereich der unteren Randzone durch eine Überdehnung des textilen Bildträgers **<Ausleiern>** unter dem Eigengewicht der gesamten Gemäldestruktur
1192 caratteri (spazi inclusI)

Abb. 243| Arbeitsvorlage des Glossar zur Schadensterminologie anhand des exemplarischen Schadensbildes 'Delle/Beule' (Seite 2). Quelle: 'Associazione Giovanni Seccosuardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration'

LESSICO TECNICO MULTILINGUE DI CONSERVAZIONE E RESTAURO Dipinto su Tela - Supporto
LEXIQUE MULTILINGUE SUR LA TECHNIQUE ET LA CONSERVATION DES BIENS CULTURELS Peinture sur toile
GLOSSARY MULTILINGUAL TECHNICAL SCIENTIFIC IN CONSERVATION-RESTAURATION Canvas painting - Support
GLOSARIO MULTILINGUE TECNICO-CIENTIFICO DE CONSERVACION Y RESTAURACION DE BIENES CULTURALES Pintura sobre lienzo - Soporte
MEHRSPRACHIGES TECHNISCH- WISSENSCHAFTLICHES LEXIKON ZUR KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG
Gemälde auf textilem Bildträger

TERMINE / TERME / TERM / VOZ / BEGRIFF

2.3.1.2 Delle/ Beule

… Ital … Fra … Eng … Esp X Deu

TERMINI CORRISPONDENTI/ TERMES CORRESPONDANTS / CORRESPONDING TERMS / VOZ CORRESPONDIENTE / KORRESPONDIERENDER BEGRIFF

Ital	Fra	Eng	Esp	Deu
Avvallamento/ Imborsamento	Enfoncement/ Bossellement	Dents/ Protrusions	Abultamientos/ hundimientos	Delle/ Beule

ETIMOLOGIA / ÉTYMOLOGIE / ETYMOLOGY / ETIMOLOGÍA / ETYMOLOGIE

-)

DEFINIZIONE / DÉFINITION / DEFINITION / DEFINICIÓN / DEFINITION

Dellen und Beulen sind lokale Deformationen in der Gemäldestruktur. Eine Delle ist eine partielle konkave Vertiefung, eine Beule eine partielle konvexe Verwölbung.
162 caratteri (spazi inclusi)

DESCRIZIONE / DESCRIPTION / DESCRIPTION / DESCRIPCIÓN / BESCHREIBUNG

Beulen oder Dellen entstehen durch lokale mechanische Krafteinwirkung mit einem stumpfen Gegenstand auf die Gemäldevorderseite **<Druckdelle>** oder die Gemälderückseite **<Druckbeule>**. Die anfängliche Dehnung der Fäden bei Krafteinwirkung begradigt zunächst den Fadenverlauf im Gewebe. Bis zu diesem Punkt wäre eine elastische Rückfederung der Verformung noch möglich. Bei weiterer Krafteinwirkung findet eine Überdehnung der Fäden in Form einer irreversiblen plastischen Verformung in der Weise statt, dass die Einzelfasern des durch den Spinnprozess zusammen gedrehten Fadens abgleiten und der Faden sich im Bereich der lokalen Krafteinwirkung insgesamt verlängert. Dellen und Beulen können auch durch Spannungen im textilen Bildträger entstehen **<Spannungsbeulen>** etwa durch rückseitig aufgeklebte <**Flicken>** wobei hier häufig die lokalen Spannungen durch das unterschiedliche, hygroskopische Verhalten der in die Gewebestruktur eingedrungenen Klebemittel hervorgerufen werden. Extreme, bauchartige Beulen bilden sich bei großformatigen Gemälden häufig im Bereich der unteren Randzone durch eine Überdehnung des textilen Bildträgers **<Ausleiern>** unter dem Eigengewicht der gesamten Gemäldestruktur
1192 caratteri (spazi inclusI)

Abb. 244| Arbeitsvorlage des Glossar zur Schadensterminologie anhand des exemplarischen Schadensbildes 'Delle/Beule' (Seite 3). Quelle: 'Associazione Giovanni Seccosuardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration'

29.3 Widersprüchlichkeit der Terminologie in der Restaurierung am Beispiel des Begriffes Craquelé

In ►Kapitel 9| wird die These aufgestellt, dass in der Restaurierung die Fachbegriffe inhaltlich sehr unterschiedlich verstanden und verwendet werden. Im Folgenden wird ein Beleg exemplarisch anhand des Terminus' Craquelé erbracht.[674]

Grundsätzlich ist bei dem Wort Craquelé eine variierende Schreibweise festzustellen, wobei sich hier an der von DUDEN empfohlenen orientiert wird.[675] Dessen ungeachtet wird dieser Begriff in der Fachliteratur vergleichsweise detailliert und zugleich antagonistisch erörtert. EIBNER wird in diesem Zusammenhang als erster Autor angeführt, da er bereits in den 20er Jahren des vorangegangenen Jahrhunderts eine Zusammenstellung der Literatur verschiedener Autoren vornimmt. Daraus entwickelt er eine Begriffsbestimmung und unternimmt eine Systematisierung. So wirft er die Frage auf, „[…] welche der auf alten Ölbildern unterscheidbaren Sprungarten Frühsprünge [!] sind [und] welche Alterssprünge. Nur erstere sind für die Charakterisierung des alten Farbmateriales und damit der Art der Technik der Meister wertvoll; die Holz-, Leinwand- und Zufallssprünge nicht."[676] Anhand des Zitates wird deutlich, dass diese Definition keinesfalls dem Status quo entspricht. Unter der Überschrift „Eigenschaften und Verhalten von Grundierschichten"[677] gibt hingegen KÜHN an, dass „[f]ast alle alten Bilder auf Holz oder Leinwand […] mit einem Netzwerk feiner Sprünge überzogen [sind], das man als Craquelé bezeichnet."[678] Weiter untergliedert der Autor seine Begriffsbildung in dem er „[…] Alterssprünge und Frühschwundrisse [unterscheidet]"[679] und damit zwei weitere Begriffe einführt. Letztgenannte „[…] sind breiter als Alterssprünge und zeigen unregelmäßige Rissränder."[680] Die Entstehung von Frühschwundrissen führt er auf „[…] das Schwinden des Ölbindemittels beim Trocknen [zurück, welche] infolgedessen nur in den Malschichten [auftreten]."[681] Damit ist eine Abgrenzung zu den Alterssprüngen gegeben, die nach seiner Definition „[…] auf die Versprödung der Grundier- und Malschichten im Alter zurückzuführen [ist]. Sie entstehen durch die Bewegung des Bildträgers infolge wechselnder Luftfeuchtigkeit und bei Leinwandbildern außerdem durch die direkte Einwirkung mechanischer Kräfte wie Stoß, Druck

674 Eine vollständige und präzise Erörterung der unterschiedlichen Definition der Fachbegriffe, im Kontext der Schadensbilder, ist nicht Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Die Ausführung ist daher rein exemplarisch, wobei die Grundaussage unterschiedlicher Definitionen aus Autorensicht auch auf andere Begriffe übertragbar ist.

675 Duden (Wörterbuch: Craquelé), 2013. In der Fachliteratur findet sich die Schreibweisen: Craquelé [Vergleiche: Kühn, 2001, Seite 59; Nicolaus, 1998, Seite 165 ff.] Krakelur [Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 79 ff.] Craquelure [Vergleiche: Eibner, 1974, Seite 15] Krakelee [Vergleiche: Lüthy, 1971, Seite 44] u. A..

676 Eibner, 1974, Seite 22

677 Kühn, 2001, Seite 39

678 Kühn, 2001, Seite 39

679 Kühn, 2001, Seite 39

680 Kühn, 2001, Seite 39

681 Kühn, 2001, Seite 39, sowie vergleiche: Seite 53

und Zug. Typisch für Altersspünge ist, dass sie ziemlich fein sind, glatte Rissränder aufweisen und durch Grundier- und Malschichten hindurchgehen. Das Muster der Altersspünge hängt von der Dicke und Elastizität der Mal- und Grundierschichten ab und ist deshalb auf den Bildern stellenweise verschieden. Da es zudem von der Art des Bildträgers abhängt, unterscheidet sich das Aterscraquelé [!] von Holztafel- und Leinwandbildern. Die Altersspünge von Holztafelbildern zeigen oft eine Vorzugsrichtung längs der Holzmaserung, auf Leinwandbildern wird ihre Form durch die Struktur und Webart der Leinwand bestimmt. Dieses primäre Leinwandcraquelé [!] ist jedoch häufig von Sprungfiguren mannigfaltiger Art überlagert, die zum Beispiel beim Nachspannen der Leinwand oder an Druckstellen entstehen."[682] Der zitierte Autor belegt seine Beschreibung in zwei aussagekräftigen Abbildung (►Abb. 245| und Abb. 246|). Der Begriff Craquelé taucht in dem zitierten Werk jedoch noch ein weiteres Mal, im Zusammenhang mit den „Eigenschaften und Verhalten von Firnisschichten"[683] auf. Unter dem Stichwort „Craquelébildung"[684] gibt der Autor an, dass sich „[ä]hnlich wie in den Grundier- und Malschichten […] auch in dickeren spröderen Firnisschichten häufig feine Sprünge (Craquelé) [bilden]."[685] Dieses ermöglicht den Rückschluss, dass, nach KÜHN, mit einem Craquelé ganz allgemein ein Netz feiner Sprünge bezeichnet wird welches bezüglich seiner Lage in den verschiedenen Bildschichten verortet sein kann. Eine weitere Präzisierung der gestalthaften Erscheinung ist nicht möglich. Indirekt unterscheidet der Autor jedoch zwischen einem „primäre Leinwandcraquelé [!]"[686] – hervorgerufen durch natürliche Alterungsprozesse, sich äußernd in einer Vorzugsrichtung, der Art des Bildträgers entsprechend – und einer begrifflichen Auslassung, welche jedoch den Rückschluss ermöglicht, dass es neben einem primären- auch ein sekundäres Leinwandcraquelé geben muss. Diese entsteht durch die Einwirkung mechanischer Kräfte zu einem späteren Zeitpunkt (Nachspannen, Druckstellen) und ist charakterisiert von „[...] Sprungfiguren [?]."[687] In Abgrenzung zur obigen Herleitung ist dieses mutmaßlich der Rubrik 'Beschädigung' zuzuordnen. Hervorzuheben ist die Systematisierung bei KÜHN, wonach Frühschwundrisse und Altersspünge dem Oberbegriff Craquelé unterstellt sind. Grundsätzlich ist der Zeitpunkt ihrer Entstehung das sie differenzierende Moment.
SANDNER führt sein Verständnis des Begriff Craquelé in einem eigenständigen Kapitel aus. So gibt er an, dass „[i]m Laufe der Jahre […] auf der Bildfläche ein Netz von haarfeinen Sprüngen [entsteht], die man als Krakeluren [sic] bezeichnet. Ihre Formen und ihre Aus-



Abb. 245| Frühschwundrisse nach KÜHN.
Quelle: Kühn, 2001, Seite 40

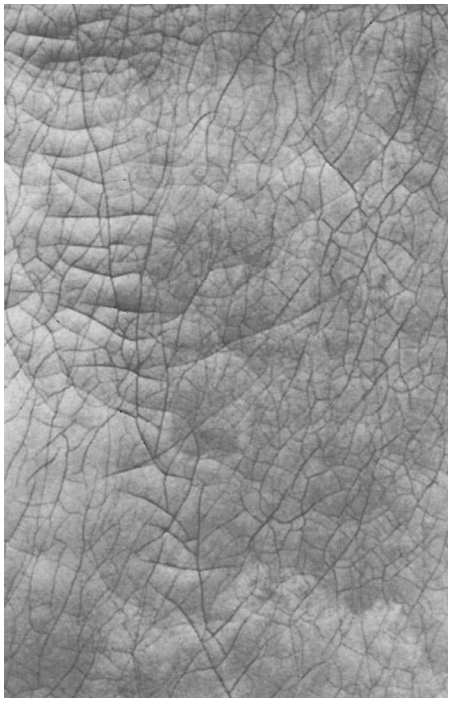


Abb. 246| Altersspünge nach KÜHN.
Quelle: Kühn, 2001, Seite 41

682 Kühn, 2001, Seite 39 f. Der Umfang des Zitates wurde bewusst gewählt, da aufgezeigt werden soll, dass der zitierte Autor zum Thema Altersspünge weitere, präzisierende Termini, wie Aterscraquelé und Leinwandcraquelé verwendet.

683 Kühn, 2001, Seite 59

684 Kühn, 2001, Seite 59

685 Kühn, 2001, Seite 59

686 Kühn, 2001, Seite 59

687 Kühn, 2001, Seite 41

maße sind vielfältig."[688] Neben den Zeitläufen verweist der Autor auf den Ursprung durch maltechnische Besonderheiten.[689] Zudem versucht sich der Autor in einer systematischen Charakterisierung der unterschiedlichen Erscheinungsformen anhand optischer Merkmale. Diese sind folgend aufgeführt und geben einen Überblick über die verwendete Begrifflichkeit.

„

a) Längs- oder Parallelkrakelur
   die Hauptrichtung dieser Form verläuft parallel zu den Längsseiten des Bildes (häufiger beim Holztafelbild anzutreffen […].
b) Gitterkrakelur
   Diese Form wird durch Risse charakterisiert, die parallel zu beiden Hauptachsen des Bildes verlaufen.
c) Netzkrakelur
   Die Linien stehen senkrecht zueinander, sind aber zu den Haupachsen des Bildes diagonal angelegt (typische Form bei Leinwandbildern).
d) Krokodil- oder Borkenkrakelur
   Die Oberfläche ist durch kleine abgeteilte Farbinselchen charakterisiert. Die Risse sind besonders breit.
e) Palmenkrakelur
   Die Linien sind fein und über die Fläche unregelmäßig verteilt. Sie berühren sich nicht.
f) Distelkrakelur
   Die Risse haben eine bestimmte Richtung im [sic] Hinblick auf die Bildachse und ähneln den unregelmäßigen Verzweigungen von Distelblättern.
g) Spiralkrakelur
   Die Risse verlaufen in Kurven über die Bildfläche (besonders bei Malgründen mit hohem Bindemittelanteil, z. B. Ölgründe oder starke Vorleimung).
h) Kreis- oder Strahlenkrakelur
   Diese Form ist charakterisiert durch ein Zentrum, von dem die Risse kreis- und strahlenförmig ausgehen. Die Ursache ist Stoß von Vorder- oder Rückseite.
i) Spannkrakelur
   Die Risse verlaufen diagonal zu den Bildecken. Sie entstehen durch das Überdehnen der Leinwand beim Nachkeilen."[690]

Bei SANDNER sind die Ausführungen zum Thema Craquelé grundsätzlich der Kategorie „Schäden an Geweben, Grundierungen und Farbschichten [unterstellt]."[691] Damit hat der Autor das Craquelé eindeutig als Schadensmerkmal klassifiziert. Äquivalent zu KÜHN unterscheidet SANDNER die oben beschriebenen Craquelé-Formen in zwei Gruppen, wobei der Zeitpunkt ihrer Entstehung für die

688 Sandner, 1990, Seite 79

689 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 79

690 Sandner, 1990, Seite79

691 Sandner, 1990, Seite 75 ff.

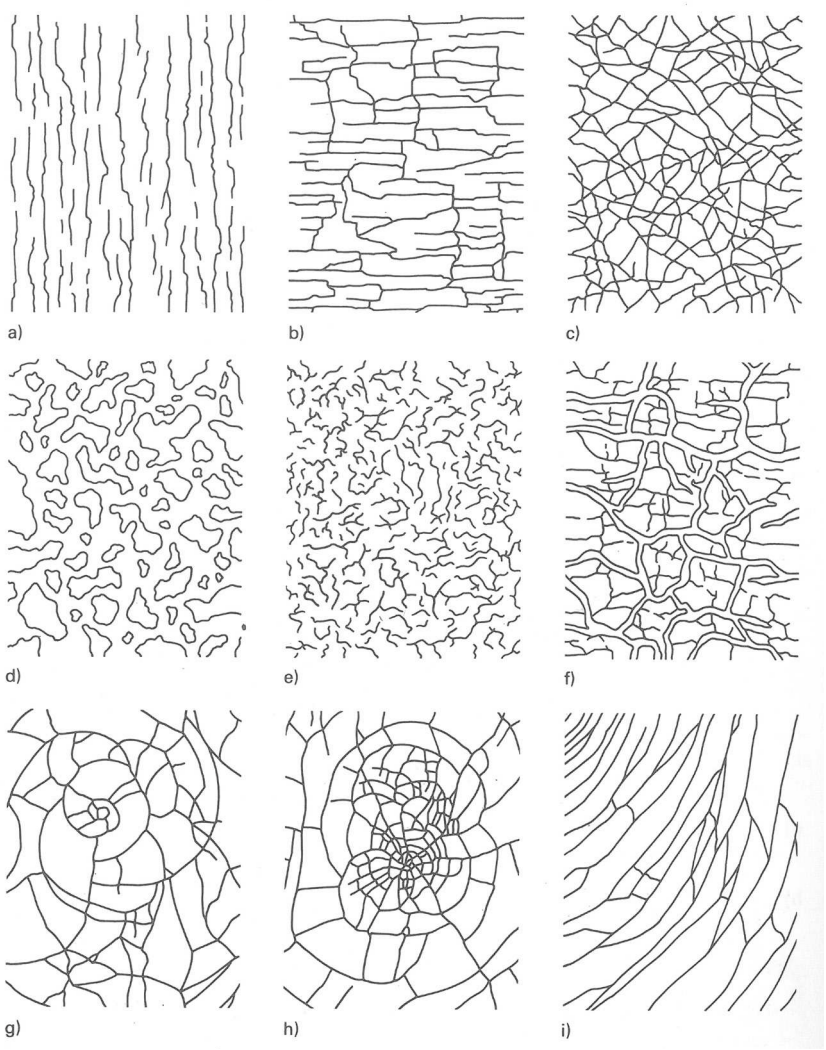


Abb. 247| „Verschiedene Krakelurformen (schematische Darstellung).
a) Längs- oder Parallelkrakelur
b) Gitterkrakelur
c) Netzkrakelur
d) Krokodil- oder Borkenkrakelur
e) Palmenkrakelur
f) Distelkrakelur
g) Spiralkrakelur
h) Kreis- oder Strahlenkrakelur
i) Spannkrakelur"
Quelle: Sandner, 1990, Seite 80

Gruppenzugehörigkeit in „[...] alte und frühe Krakeluren [...entscheident ist]."[692] Letztgenannte führt er analog zu KÜHN auf den Trocknungsprozess der Malfarbe zurück und verweist damit auf den Entstehungsprozess des Gemäldes.[693] Hiermit ist also das Veränderungsmerkmal Frühschwundriss gemeint.[694] Als Ursache führt der Autor maltechnische Besonderheiten und/oder Fehler an und verweist auf einen ungünstig ablaufenden physikalisch-/chemische Trocknungsprozess in Abhängigkeit zum verwendeten Malmaterial (Pigmente, Bindemittel, Sikkative und Schichtstärke).[695] Auch die Merkmalsbeschreibung der Frühschwundrisse von SANDNER stimmt mit der von Kühn überein – „[Frühschwundrisse] bilden sich nur in Farbschichten aus, ohne [die] Grundierung zu erreichen."[696] Seine Ausführungen sind jedoch weitaus präziser. Er führt weiter aus, dass

692 Sandner, 1990, Seite 79

693 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 81

694 Dieser Terminus wurde, wie oben belegt, im gleichen Kontext so auch bereits von KÜHN verwendet. Zudem handelt es sich um eine aktuelle und allgemein gebräuchliche Bezeichnung für den geschilderten Sachverhalt. Daher wird auch hier (außerhalb der Zitate) bei zutreffendem Merkmal dieser Begriff verwendet.

695 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 83 f.

696 Sandner, 1990, Seite 84

die „[…] Risse breiter [sind] als bei alten Krakeluren […], [und sie] […] in der Regel abgerundete Ränder [aufweisen], da das Reißen bei noch weichem Ölfilm allmählich geschieht (alte Krakeluren entstehen dagegen durch das Reißen bereits erhärteter Schichten).“[697] Weiter schränkt er das beschriebene Merkmal auf bestimmte Bildpartien ein.[698] Verwunderlich ist bei dem zitierten Werk, dass SANDNER unter systematischen Gesichtspunkten ‘Krakeluren in den Firnisschichten’ hirarchisch der Rubrik ‘Frühe Krakeluren (Frühschwundrisse)’ unterstellt.[699] In diesem Zusammenhang führt er aus: „Firnisse, die leicht verspröden, bilden auf der Bildoberfläche ein Netz von haarfeinen Rissen. Harte Firnisschichten begünstigen das Reißen darunterlegender Malschichten besonders dann, wenn sie zu früh, d. h. auf noch nicht völlig durchgetrocknete Malschichten, aufgetragen werden.“[700] Zuvor hat der Autor auf der selben Seite eingeschränkt, dass sich Frühschwundrisse nur in den Farbschichten ausbilden können (s.o.). Gegebenenfalls liegt hier ein Fehler vor und seine Ausführungen zum besagtem Thema sind der Rubrik ‘Alte Krakeluren’ zuzuordnen.[701] Darüber hinaus finden sich auch in der Literatur keine weiteren Ausführungen oder gar Abbildungen. Unter diese Kategorie fallen Veränderungen des Malschichtaufbaus die „[…] im Laufe der Zeit zu Riß- und Schollenbildung [führen]. Die Formen der sich dabei bildenden Risse sind abhängig von der Art des jeweiligen Bildträgers und von der Grundierung.“[702] Als Ursache für die Merkmalsausprägung benennt der Autor schwankendes Umgebungsklima und dessen Auswirkungen auf das hygroskopische Materialgefüge des Gemäldes aber auch die Einwirkung mechanischer Kräfte.[703] Weiter verweist er auf Zusammenhänge zwischen der geometrischen Form des Sprungnetzes und maltechnischen Gegebenheiten. Hier führt er die Art der Aufspannung, die Form der Keilrahmen, die Leimkonzentration in der Grundierung, die Imprimitur und die Art des verwendeten Bindemittels auf.[704] Die „Merkmale alter Krakeluren“[705] qualifiziert SANDNER weiter durch „[…] feine Risse mit scharfen Rändern[,] in der Regel durch Grundierung, Farbschicht und Firnis gehend[,] meist gleichmäßig über die ganze Bildfläche verteilt[,] Risse oft verschmutzt (sichtbar besonders in hellen Bildpartien).“[706]
Bei NICOLAUS erfolgt die Ausführungen zum Thema Craquelé im Rahmen eines eigenständigen Kapitels.[707] In dem zitierten Standard-

697 Sandner, 1990, Seite 84

698 Aufgrund der zuvor vorgenommenen Präzision durch den zitierten Autor ist es naheliegend, dass damit die laterale Ausprägung der Frühschwundrisse gemeint ist welche in Abhängigkeit zur Farbigkeit steht. Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 84

699 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 81 ff.

700 Sandner, 1990, Seite 84

701 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 81

702 Sandner, 1990, Seite 81

703 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 81

704 Vergleiche: Sandner, 1990, Seite 81

705 Sandner, 1990, Seite 81

706 Sandner, 1990, Seite 81

707 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 165 ff.. In seinen Ausführungen orientiert er sich

werk nimmt der Autor eine ausführliche Beschreibung und Systematisierung vor. Prinzipiell unterscheidet sich NICOLAUS von dem vorher zitierten Autor, indem er das Craquelé als Alterserscheinung klassifiziert.[708] Ferner bezeichnet er das Craquelé als ein „[...] Sprung- oder Rissnetz […].“[709] Dieses steht hinsichtlich seiner Ausprägung in Abhängigkeit zum verwendeten Material, der Maltechnik und den Umgebungsbedingungen denen es ausgesetzt wurde.[710] Analog zur vorher geschilderten Vorgehensweise anderer Autoren untergliedert auch NICOLAUS den Begriff Craquelé in die Kategorien Frühschwundrisse und Alterssprünge. Bei der folgenden Beschreibung der unterschiedlichen Merkmalsausprägungen ist er vergleichsweise stringent. Ausgangspunkt seiner Argumentation ist der Hinweis, auf die uneinheitliche Terminologie in der Fachliteratur.[711] Weiter definiert er zunächst ganz grundsätzlich die Begriffe Riss und Sprung und grenzt sie gegeneinander ab. Dabei kommt er zu dem Schluss, dass die Elastizität des Materialgefüges dafür ausschlaggebend ist, ob es sich um Risse oder um Sprünge handelt.[712] Anhand der Übertragung auf Gemälde definiert NICOLAUS, dass „[…] alle Craqueléformen, die im Rahmen des Troknungs- und/oder Oxidationsprozesses entstehen, »Risse« [sind], genauer »Frühschwundrisse«, während in der trockenen, durchoxidierten und polymerisierten, unelastisch gewordenen Farbschicht durch äußere mechanische Einflüsse »Sprünge«, genauer: »Alterssprünge« entstehen können.“[713] Darüber hinaus ist NICOLAUS der einzige Autor, der die Merkmalsausprägungen quantifiziert. Die Breite der zuerst genannten Frühschwundrisse gibt er mit größer als einem Millimeter an, „[...] wobei sie maximal durch die Malschicht bis zur Grundierung reichen, jedoch nie die Grundierung durchdringen.“[714] Zudem untergliedert NICOLAUS, ähnlich SANDNER, Frühschwundrisse weiter entsprechend ihrer optischen Charakteristika, wobei er die Begriffe ‘Flimmerriss’, ‘Pinselstrichriss’, ‘Netzriss’, ‘Spiralriss’ und ‘Gitterriss’ als neue Terminologie einführt.[715] Als Ursache für ihre Entstehung gibt er ausschließlich maltechnische

wesentlich an den Veröffentlichungen von KECK [Vergleiche: Keck, 1969] und BUCKLOW. Vergleiche: Bucklow, 1997

708 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 165 und 177

709 Nicolaus, 1998, Seite 165

710 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 165

711 Der Autor: „So spricht Eibner sowohl von »Frühschwundsprung« wie auch von »Frühschwundriß« und bezeichnet damit die gleiche Erscheinung.“ [Nicolaus, 1998, Seite 165] NICOLAUS gibt bei seinen Ausführungen als Beleg auf das Werk von EINBNER keine Seitenzahl als Referenz an - meint jedoch sehr wahrscheinlich: Eibner, 1974, Seite 15

712 Dabei argumentiert NICOLAUS, vom allgemeinen Sprachgebrauch ausgehend, dass „[..] Papier oder Leinwand »reißt«, während Glas oder Porzellan »springt«. Elastische Stoffe reißen, die Risse entstehen durch Einflüsse, die vom Material ausgehen, und/ oder werden durch Fremdeinwirkung hervorgerufen. Unelastische Stoffe wie Glas oder Porzellan springen durch physikalische Fremdeinflüsse. Porzellan kann Risse wie auch Sprünge aufweisen und eignet sich deshalb sehr gut als Beispiel für eine Präzisierung in der Terminologie: Risse, sogenannte Schwundrisse treten in den Anfangsjahren der Porzellanherstellung beim Brennen, also im Rahmen des Trocknungsprozesses auf, während das erhärtete Material durch unachtsame Behandlung oder Hitzeeinwirkung, das heißt durch meachnisch-pyhsikalische Einflüsse, Sprünge bekommt.“ Nicolaus, 1998, Seite 165

713 Nicolaus, 1998, Seite 165

714 Nicolaus, 1998, Seite 165

715 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 169 ff.

Fehler an.[716] Die zweitgenannten Altersssprünge hingegen, quantifiziert NICOLAUS mit „[…] 1 mm breite Trennungen in der Bildsicht, die bis auf den Bildträger reicht […].“[717] Als weitere charakteristische Merkmale führt er an, dass Altersssprünge als dichtes „[...] Netz oder Gitter feiner Sprünge mit schmaler Öffnung [in Erscheinung treten, wobei sie] gerade oder in leichten Bögen verlaufen.“[718] Weiter differenziert NICOLAUS – so wie die bereits zitierten Autoren – zwischen ‘Leinwandsprüngen’ und ‘Holztafelsprüngen’. Die ‘Leinwandsprünge’ werden zusätzlich in die Rubrik ‘Gittersprung’, ‘Netzsprung’ und in ‘Keil-/Spannrahmensprung’ untergliedert.[719] Als Ursache für das beschriebene Veränderungsmerkmal benennt er die Einwirkung mechanischer Kräfte.[720] Darüber hinaus führt er chemische Reaktionen an, die im Lauf der Zeit zur Versprödung das Materialgefüges führen, sodass „[...] dann geringe Bewegungen des Bildträgers [ausreichen um ihn] brechen zu lassen.“[721] NICOLAUS illustriert seine Ausführungen durch eine anschauliche Abbildung, welche nebenstehend wiedergegeben ist (Abbildung 257). Seine vorgenommene Systematisierung stellt er in einer Grafik dar die ebenfalls hier abgedruckt ist (►Abb. 249|).

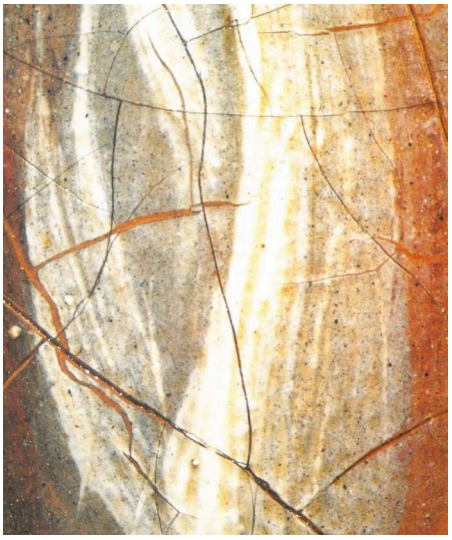


Abb. 248| „Frühschwundrisse reichen maximal bis zur Grundierung, Altersssprünge (dunkle Linie) durch sämtliche Schichten des Gemäldeaufbaus bis zum Bildträger. Altersssprünge verlaufen vielfach in den Tiefen ehemaliger Frühschwundrisse“ Nicolaus, 1998 Seite 167.
Quelle: Nicolaus, 1998, 1990, Seite 166 f.

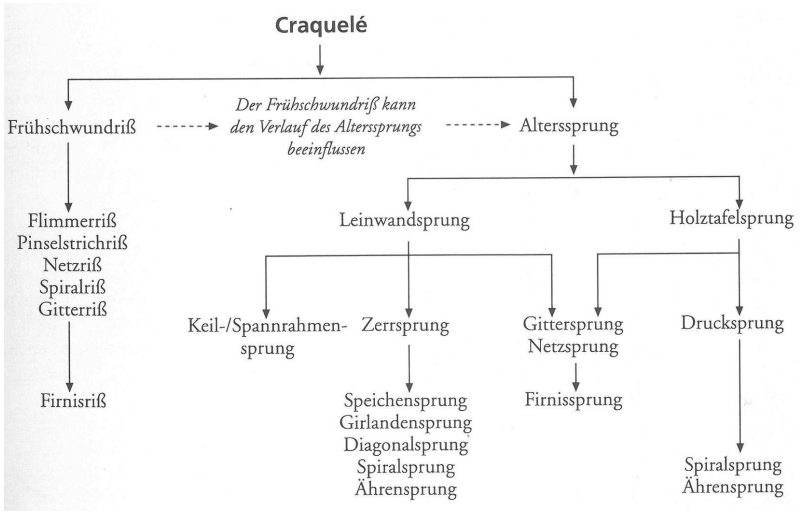


Abb. 249| Systematisierung der verschiedenen Erscheinungsbilder des Craquelé nach NICOLAUS.
Quelle: Nicolaus, 1998, Seite 165

Anhand der Gegenüberstellung der oben zitierten Autoren wird die Heterogenität des Terminus Craquelé deutlich, wobei grundsätzliche Überschneidungen zum Schadensbild ‘Frühschwundrisse’ bestehen. Als übereinstimmendes Merkmal zur Definition eines Craquelé kann ein Netz feiner Linien festgehalten werden, was sich auf der Gemäldeoberfläche abzeichnet. Darüber ob es sich bei dem Craquelé um Risse oder Sprünge handelt besteht ein Dissens. Bei den zitierten Autoren herrscht darüber Konsens, dass aufgrund der thematischen Komplexität eine terminologische Untergliederung in Frühschwund-

716 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 165

717 Nicolaus, 1998, Seite 167

718 Nicolaus, 1998, Seite 174

719 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 179 f.

720 Vergleiche: Nicolaus, 1998, Seite 167

721 Nicolaus, 1998 , Seite 177

risse und Alterssprünge zweckdienlich ist. Zudem kann aufgezeigt werden, dass weitere autorenspezifische Begriffe eingeführt werden. Anstatt unmissverständlicher Beschreibungen verweisen alle aufgeführten Autoren auf exemplarische Fotos, wobei SANDNER zum weiteren Beleg auch verdeutlichende Grafiken zeigt. Die Erklärung erfolg daher allgemein indirekt über das Medium Bild. Zusammenfassend kann belegt werden, dass alle Autoren das Thema Craquelé durch Beschreibungen seiner Merkmale mit Ausführungen zu ihrer Entstehung kombinieren und maltechnische Aspekte zu ihrer Erklärung mit anfügen.

29.4 Broschüre zu den Sensorspezifikationen: 'COMET 5 3D-Digitalisierung, high-end Sensor'



Abb. 250| Werbebroschüre von 'Steinbichler' zu den Sensorspezifikationen des 'COMET 5'-Systems (Seite 1).
Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012



COMET®5 11M
3D-DIGITALISIERUNG - HIGH-END SENSOR

Das besonders innovative Sensorkonzept von COMET 5 bietet größte Flexibilität und Präzision für herausfordernde Aufgabenstellungen. Dabei erlaubt die modulare Bauweise ein einfaches und schnelles Anpassen des Systems an verschiedene Messfeldgrößen und ermöglicht so eine individuelle Konfiguration für die jeweiligen Messaufgaben. Der High-End Sensor COMET 5 11 M mit einer 11 Megapixel-Kamera bietet mit seiner hohen Auflösung eine bisher unerreichte Detailgenauigkeit zur Digitalisierung filigraner Objekte oder für Anwendungen mit sehr hohen Anforderungen an die Detailtreue (z.B. Vermessung von Turbinenschaufeln, etc.). Die extreme Flexibilität des Sensorsystems erlaubt eine Wahlmöglichkeit im Messmodus zwischen maximaler Auflösung und maximaler Aufnahmegeschwindigkeit; der Benutzer kann somit das gewünschte optimale Leistungsmerkmal für die anstehende Digitalisieraufgabe bzw. Messaufnahme nutzen.

Das System benötigt selbst bei großen Messfeldern nur einen äußerst geringen Arbeitsabstand; speziell bei beengten räumlichen Verhältnissen ist so ein unkompliziertes und zeitsparendes Sensorhandling garantiert. In Verbindung mit der besonders schnellen Datenaufnahme sorgt COMET 5 11 M für eine hohe Effizienz der Messabläufe.

steinbichler

- 11 Megapixel Kameraauflösung für höchste Detailgenauigkeit
- extreme Flexibilität durch wählbaren Messmodus: Maximale Auflösung bzw. maximale Aufnahmegeschwindigkeit
- exzellente Datenqualität
- hohe Messgeschwindigkeit
- unterschiedliche Messfelder verfügbar
- einfaches Sensorhandling

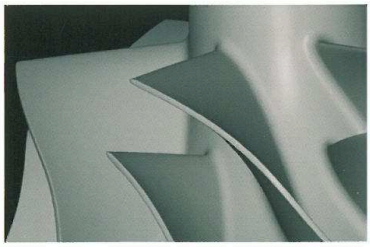
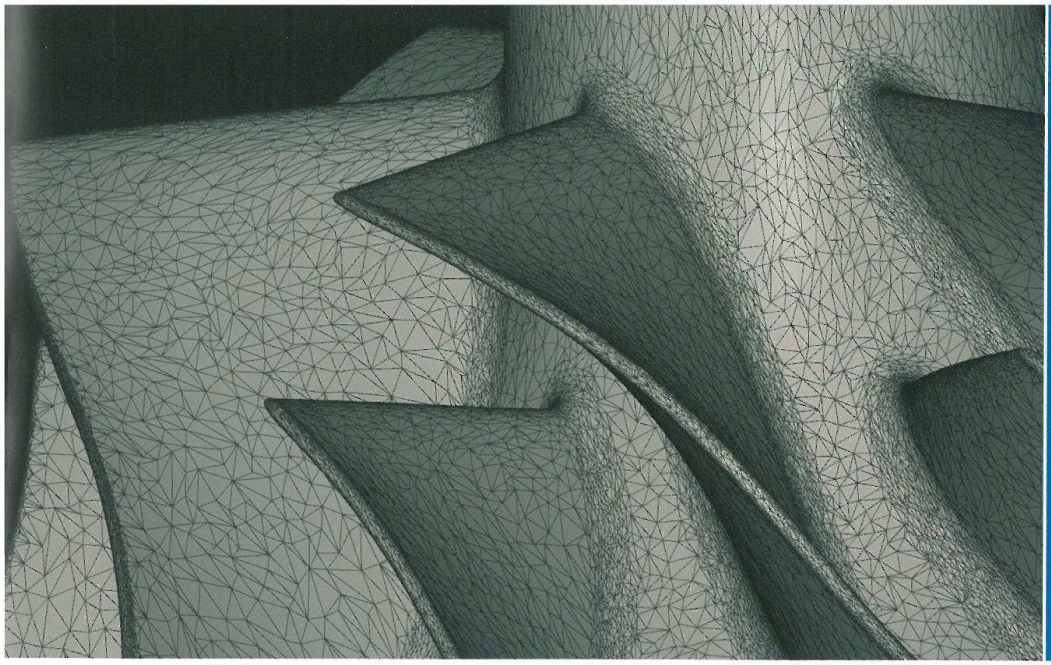


Abb. 251| Werbebroschüre von 'Steinbichler' zu den Sensorspezifikationen des 'COMET 5'-Systems (Seite 2).
Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012



TECHNISCHE DATEN

	COMET 5 11M
Kameraauflösung	4016 x 2688
Messfeld 80	Messvolumen: 75 x 50 x 50 mm
150	Messvolumen: 155 x 105 x 70 mm
350	Messvolumen: 345 x 230 x 200 mm
600	Messvolumen: 560 x 375 x 370 mm
1000	Messvolumen: 900 x 600 x 600 mm
3D Punktabstand in µm 80 / 150 / 350 / 600 / 1000	3D Punktabstand 80: 18 µm / 150: 38 µm / 350: 85 µm 600: 140 µm / 1000: 225 µm
Messfeld 80	Arbeitsabstand: 450 mm
150	Arbeitsabstand: 450 mm
350	Arbeitsabstand: 850 mm
600	Arbeitsabstand: 850 mm
1000	Arbeitsabstand: 1400 mm
Schnellste Messzeit in Sekunden	4 sec.
PC	HighEnd Workstation: 1 x Intel Xeon Quadcore, 24 GB DDR3-RAM optionales Upgrade: 1 x Intel Xeon Quadcore, bis zu 96 GB DDR3-RAM
Sensorpositionierung	Dreibein- oder Säulenstativ mit motorisierter Dreh-/Schwenkachse, Roboter
automatische Objektpositionierung	Rotationstisch, Roboter

Abb. 252| Werbebroschüre von 'Steinbichler' zu den Sensorspezifikationen des 'COMET 5'-Systems (Seite 3).
Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012

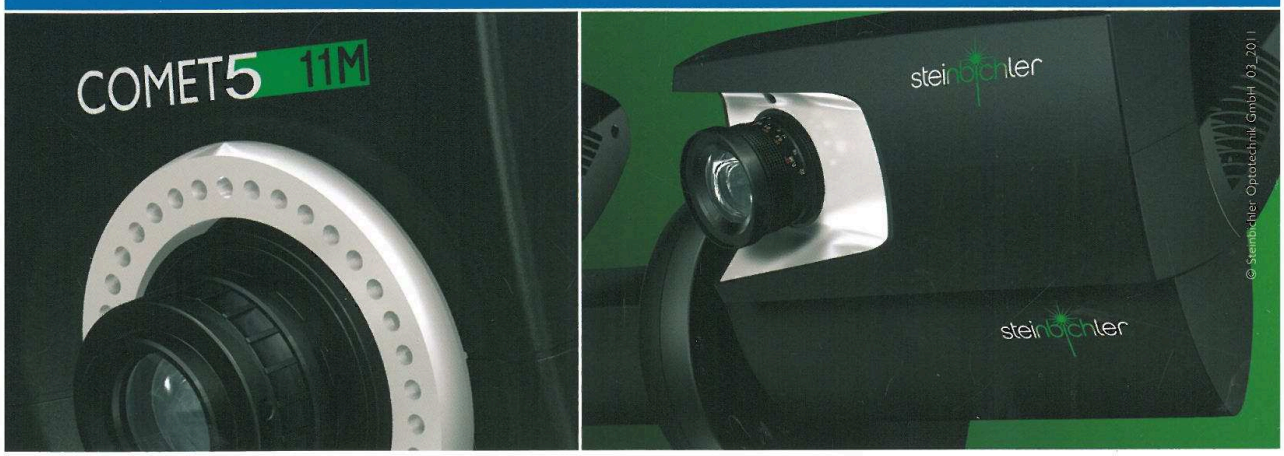
Steinbichler Vision Systems, Inc. USA
46995 Five Mile Road, Plymouth, MI 48170
phone +1-248-994-2204, fax +1-734-927-1549
info@steinbichler-vision.com
www.steinbichler-vision.com

Steinbichler do Brasil Ltda. BRAZIL
Alameda Amazonas, 686, Lateral A
Alphaville Empresarial, Barueri SP CEP 06454-070
phone / fax +55-11-4195-4495
info@steinbichler.com.br
www.steinbichler.com.br

S&S Optotechnik (Beijing) Co., Ltd. P.R. CHINA
No. 1217 Zhong Kun Plaza
59 Gao Liang Qiao Byway, Haidian District
100044 Beijing
phone +86-10-8214-9808, fax +86-10-8214-9809
info@steinbichler.cn
www.steinbichler.cn

Steinbichler Vision Systems Pvt. Ltd. INDIA
68, Chinnappa Garden Link Road
Nandidurga Road, Jayamahal Extension
Bangalore - 560046
phone +91-80-409098-40/-38/-39, fax +91-80-40909842
info@steinbichler.in
www.steinbichler.in

Steinbichler Portugal Lda. PORTUGAL
Edificio OPEN, Zona Industrial da Marinha Grande
Rua da Bélgica Lte 18, 2431-901 Marinha Grande
phone +351-244-570-010, fax +351-244-570-019
info@steinbichler.pt
www.steinbichler.pt



steinbichler

Steinbichler Optotechnik GmbH HEADQUARTERS
Georg-Wiesböck-Ring 12, 83115 Neubeuern GERMANY
phone +49-8035-8704-0, fax +49-8035-1010
sales@steinbichler.de
www.steinbichler.com

Abb. 253| Werbebroschüre von 'Steinbichler' zu den Sensorspezifikation des 'COMET 5'-Systems (Seite4).
Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation), 2012

29.5 Spezifikation des Leuchtmittels

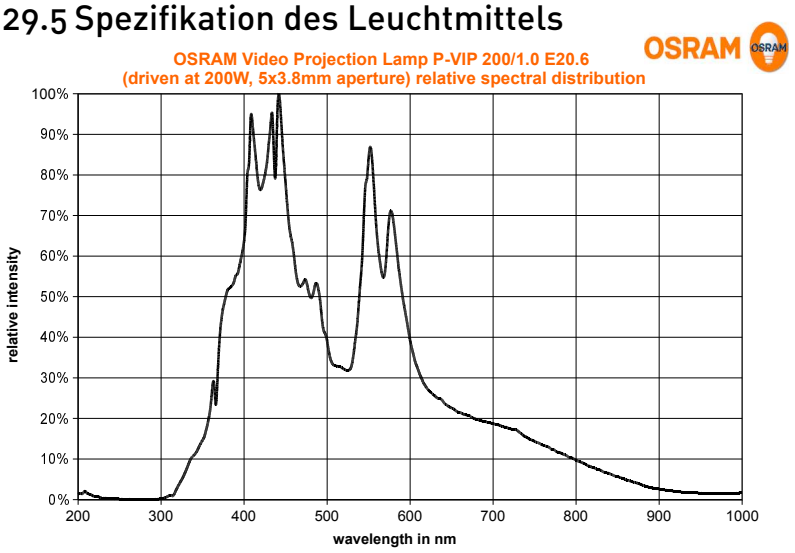


Abb. 254| Spektrum der Quecksilber-Hochdruck-Entladungslampe.
Quelle: Ohne Verf. (Leuchtmittel OSRAM), 2012

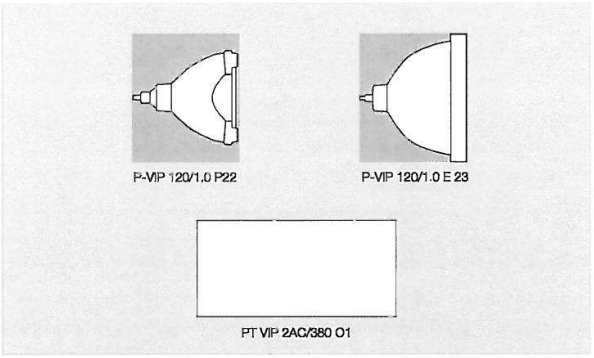
P-VIP_200E206_spectrum.xls

OSRAM P-VIP®

Hochdrucklampen für Projektionsanwendungen

OSRAM P-VIP-Lampensysteme bestehen aus Quecksilber Hochdrucklampen und speziell darauf abgestimmten elektronischen Betriebsgeräten (PT VIP). Der sehr kurze Bogenabstand von 0,8–1,0 mm, eine Effizienz von 65 lm/W bei einem Betriebsdruck von bis zu 300 bar sowie eine Farbtemperatur von 8500 K machen sie für den Einsatz in Projektionssystemen besonders geeignet. Die P-VIP-Lampen sind sowohl in parabolischen als auch elliptischen Reflektoren lieferbar.

P-VIP-Systeme für den Einsatz in Microdisplay Rückprojektionsfernsehern erreichen eine Lebensdauer von bis zu 10000 h. Die elektrische Leistung reicht von 100 W bis 180 W.



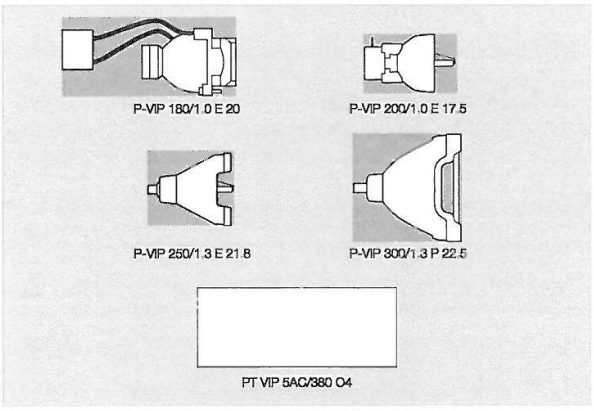
P-VIP-Lampensysteme im Leistungsbereich 180 W bis 330 W sind auf maximalen Lichtstrom bei kleinsten Etendues und auf eine mittlere Lebensdauer von 3000 h bis 6000 h optimiert.

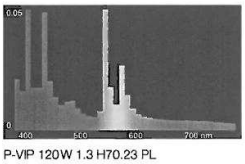
Sie werden in extrem lichtstarken Daten- und Videoprojektionsgeräten (Beamern) verwendet.

Bei den 330 W P-VIP-Lampensystemen werden Rekordleuchtdichten von bis zu 500000 cd/m² erreicht.

Speziell entwickelte Lampen mit kleinen Reflektoren in Kombination mit sehr kompakten elektronischen Betriebsgeräten kommen in Kleinstprojektoren mit einem Gewicht von unter einem Kilogramm zum Einsatz.

Die UART Schnittstellen des Betriebsgerätes ermöglichen eine intelligente Kommunikation des Lampensystems mit dem Fernseher bzw. Beamer und eröffnen eine Vielzahl neuer Möglichkeiten zur Performanceverbesserung des Gesamtsystems.





P-VIP 120W 1.3 H70.23 PL

High pressure lamps for projection applications

OSRAM P-VIP lamp systems consist of mercury high-pressure lamps and matching PT VIP electronic control gear. The very short arc gap of 0.8 to 1.0 mm, an efficiency of 65 lm/W at an operating pressure of over 300 bar and a color temperature of 8,500 K make them ideal for use in projection systems. P-VIP lamps are available with parabolic or elliptical reflectors.

P-VIP systems for use in micro-display rear projection TV sets achieve a life from 6,000 hours to beyond 10,000 hours. The wattages range from 100 W to 180 W.

P-VIP lamp systems in the wattage range from 180 W to 330 W are optimised for maximum luminous flux with very small etendues and an average life of 3,000 to 6,000 hours.

They are used in extremely bright data and video projection equipment (beamers).

Record luminances of up to 500,000 cd/m² are achieved with 330 W P-VIP lamp systems.

Specially developed lamps with small reflectors in combination with extremely compact electronic control gear are used in ultra-portable projectors with a weight of less than one kilogram.

The UART interfaces of the control gear allow intelligent communication between the lamp system and the TV set bzw. Beamer and open up a large number of new possibilities for improving the performance of the overall system.

Abb. 255| Datenblatt des Leuchtmittels: 'OSRAM P-VIP 200/1.0 E20 6n'.
Quelle:Ohne Verf. (Leuchtmittel OSRAM), 2012

zurück zur Objektivübersicht

Rogonar
Rogonar-S
Rodagon
Apo-Rodagon-N
Rodagon-WA
Apo-Rodagon-D

Zubehör: Modular-Focus

Objektive für Vergrößerung und CCD-/Video-Aufnahmen

Rodagon

Das Rodagon mit brillanter Abbildung im gesamten Maßstabsbereich üblicher Vergrößerungsgeräte hat sich im Laboreinsatz bei anspruchsvollen Amateuren ebenso wie bei Profis zum universellen Arbeitspferd entwickelt. Es erfüllt die hohen Anforderungen professioneller Reprografie und wird daher gern in den Brennweiten bis 135 mm in Kombination mit dem Fokussier-Schneckengang Modular-Focus und entsprechenden Kameraadaptern als hochauflösendes Aufnahmeobjektiv für CCD-Kameras und als exzellentes Makroobjektiv für Spiegelreflexkameras eingesetzt. Üblichen Makroobjektiven ist es im Auflösungsvermögen und Kontrast meistens klar überlegen.

Der 6linsige Aufbau garantiert die Wiedergabe feinster Details bei gleichmäßig hohem Kontrast bis zum Bildrand. Weitgehende Maßstabsunempfindlichkeit gewährleistet Spitzenqualität vom Mini-Print bis zu Extremvergrößerungen. Die empfohlene Arbeitsblende wird mit Abblendung um nur 2 Stufen erreicht.

Alle Rodagone bieten eine komfortable beleuchtete Blendenanzeige und sind mit der praktischen Vorwahl- und Rastblende ausgestattet, die bei den Modellen bis 135 mm Brennweite auf stufenlose Einstellung umschaltbar ist. Das Rodagon 28 mm ist alternativ in kleinerer Fassung mit 32,5-mm-Gewinde nur mit einer Rastblende lieferbar.

Rodagon	empfohlener Maßstabsbereich	maximales Filmformat
28 mm f/4	5× - 30×	18×24 mm
35 mm f/4	5× - 30×	24×24 mm
50 mm f/2,8	2× - 15×	24×36 mm
60 mm f/4	2× - 10×	40×40 mm
80 mm f/4	2× - 10×	6×7 cm
105 mm f/5,6	2× - 10×	6×9 cm
135 mm f/5,6	2× - 10×	4×5 inch
150 mm f/5,6	2× - 10×	4×5 inch



Datenblätter

Formate, Maße, Gewicht
empf. Abbildungsmaßstab
Ausstattungsmerkmale

Leistungsdaten
Rodagon 50 mm f/2,8

Rodagon: Das Allround-Vergrößerungsobjektiv für professionelle Qualität im Amateur- und Fachlabor sowie bei Aufnahmen im Nah- und Makrobereich

Abb. 256| Datenblatt (Seite 1) für das Kameraobjektiv des 80er Messfeldes, 'Rodagon 105 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

29.6 Datenblätter Kameraobjektive (Firma 'Rodenstock')

Rodagon

zurück zur Beschreibung

Technische Daten

Objektiv	max. empf. Filmformat	empf. Maßst.	kleinste Blende	Vorwahlblende	Rastblende schaltbar	Leuchtblende	Filtergewinde	Auflagemaß [1]	Gesamtlänge	max. Durchm.	Anschraubgewinde	Anlage bis Hinterkante
28 mm f/4	18×24 mm	5-30×	16				M 30,5×0,5	27,7 mm	30,0 mm	40,5 mm	M 32,5×0,5 [2]	6,7 mm
28 mm f/4	18×24 mm	5-30×	16	•	•	•	M 40,5×0,5	23,0 mm	37,2 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	6,5 mm
35 mm f/4	24×24 mm	5-30×	16	•	•	•	M 40,5×0,5	31,2 mm	37,2 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	6,5 mm
50 mm f/2,8	24×36 mm	2-15×	16	•	•	•	M 40,5×0,5	43,5 mm	43,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	13,0 mm
60 mm f/4	40×40 mm	2-10×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	56,0 mm	41,8 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	10,2 mm
80 mm f/4	6×7 cm	2-10×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	74,5 mm	44,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	13,7 mm
105 mm f/5,6	6×9 cm	2-10×	32	•	•	•	M 40,5×0,5	101,5 mm	42,3 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	11,6 mm
135 mm f/5,6	4×5 inch	2-10×	32	•	•	•	M 40,5×0,5	128,0 mm	45,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	14,5 mm
150 mm f/5,6	4×5 inch	2-10×	45			•	M 52×0,75	146,0 mm	49,8 mm	60,0 mm	M 50×0,75	20,1 mm

[1] Auflagemaß bei Maßstab ∞, [2] Adapter für M 39×1/26" wird mitgeliefert

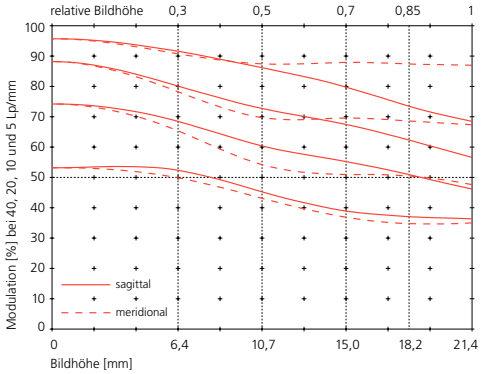
Abb. 257| Datenblatt (Seite 2) für das Kameraobjektiv des 80er Messfeldes, 'Rodagon 105 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

'Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren'

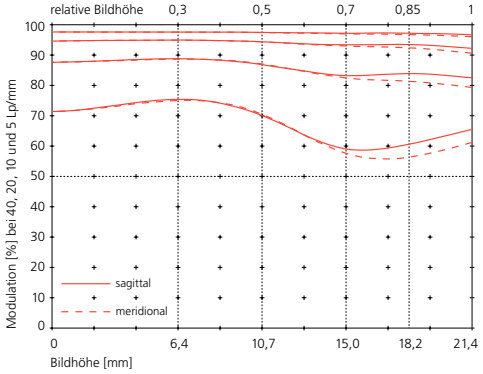
Rodagon 50 mm f/2,8

zurück zur Beschreibung

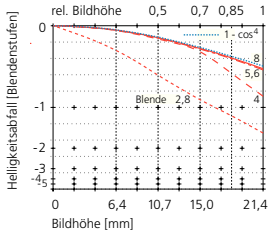
Modulationsübertragungsfunktion M = 10x Blende 2,8



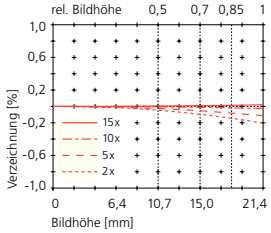
Modulationsübertragungsfunktion M = 10x Blende 5,6



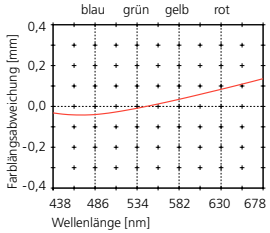
Relativer Helligkeitsabfall M = 10x



Verzeichnung M = 15x ... 2x



Farblängsabweichung M = 10x



Alle Ortsfrequenzen [Linienpaare/mm] und Bildhöhen [mm] beziehen sich auf die Filmseite, Maßstäbe auf die Bildseite

Abb. 258| Datenblatt (Seite 3) für das Kameraobjektiv des 80er Messfeldes, 'Rodagon 105 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

zurück zur Objektivübersicht

- Rogonar
- **Rogonar-S**
- Rodagon
- Apo-Rodagon-N
- Rodagon-WA
- Apo-Rodagon-D

Zubehör: Modular-Focus

Objektive für Vergrößerung und CCD-/Video-Aufnahmen

Rogonar-S

Das für seinen noch relativ einfachen optischen Aufbau und daher recht attraktiven Preis bereits sehr leistungsfähige Universalobjektiv Rogonar-S ist für gehobene Anforderungen von Amateur- und Fachlaboren konzipiert.

Das Haupteinsatzgebiet des Rogonar-S ist die Vergrößerung in dem für Bilder in den gängigen Standardformaten nötigen Maßstabsbereich. Hier liefert das aus 4 Linsen in 3 Gruppen aufgebaute Objektiv mit nur geringem Lichtabfall zum Bildrand bereits qualitativ hochwertige Ergebnisse. Für optimalen Kontrast und beste Randschärfe sollte um etwa 2 bis 3 Stufen abgeblendet werden.

Der weite empfohlene Maßstabsbereich bietet interessante Möglichkeiten sogar für stärkere Ausschnittvergrößerungen.

Das in zahlreichen Versionen für Filmformate bis zu Rollfilm 6×9 cm lieferbare Rogonar-S bietet eine hör- und fühlbare Rastblende, die bei den Modellen ab 50 mm auf stufenlose Einstellung für exakten Abgleich bei Verwendung von Analysern und Laborbelichtungsmesser-Timern mit vorgewählter Belichtungszeit umschaltbar ist. Diese Modelle sind auch mit einer beleuchteten Blendenanzeige und einer praktischen Vorwahlblende zur schnellen und sicheren Umschaltung zwischen Einstell- und Arbeitsblende ausgestattet.

Rogonar-S	empfohlener Maßstabsbereich	maximales Filmformat
25 mm f/4	10× - 30×	13×17 mm
35 mm f/2,8	10× - 30×	18×24 mm
50 mm f/2,8	2× - 10×	24×36 mm
60 mm f/4,5	2× - 10×	40×40 mm
75 mm f/4,5	2× - 10×	6×6 cm
90 mm f/4,5	2× - 8×	6×7 cm
105 mm f/4,5 *	2× - 8×	6×9 cm

* Produkt läuft aus



Datenblätter

- Formate, Maße, Gewicht
  empf. Abbildungsmaßstab
  Ausstattungsmerkmale
- Leistungsdaten
  Rogonar-S 50 mm f/2,8

Rogonar-S: Das Objektiv mit dem optimalen Preis-Leistungs-Verhältnis für Prints in Standardformaten

Abb. 259| Datenblatt (Seite 1) für das Kameraobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Rogonar-S 50 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

RODENSTOCK

Rogonar-S

zurück zur Beschreibung

Technische Daten

Objektiv	max. empf. Filmformat	empf. Maßst.	kleinste Blende	Vorwahlblende	Rastblende schaltbar	Leuchtblende	Filter-gewinde	Auflage-maß [1]	Gesamt-länge	max. Durchm.	Anschraub-gewinde	Anlage bis Hinterkante
25 mm f/4	13×17 mm	10-30×	16				M 30,5×0,5	23,0 mm	28,0 mm	40,5 mm	M 32,5×0,5 [2]	4,5 mm
35 mm f/4	18×24 mm	10-30×	16				M 30,5×0,5	34,0 mm	28,0 mm	40,5 mm	M 32,5×0,5 [2]	4,5 mm
50 mm f/2,8	24×36 mm	2-10×	16	•	•	•	M 40,5×0,5	47,0 mm	37,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	6,5 mm
60 mm f/4,5	40×40 mm	2-10×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	52,5 mm	36,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	5,9 mm
75 mm f/4,5	6×6 cm	2-10×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	65,5 mm	36,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	5,9 mm
90 mm f/4,5	6×7 cm	2-8×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	80,0 mm	36,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	5,9 mm
105 mm f/4,5	6×7 cm	2-8×	22	•	•	•	M 40,5×0,5	95,0 mm	36,5 mm	50,0 mm	M 39×1/26"	5,9 mm

[1]) Auflagemaß bei Maßstab ∞, [2]) Adapter für M 39×1/26" wird mitgeliefert

Abb. 260| Datenblatt (Seite 2) für das Kameraobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Rogonar-S 50 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

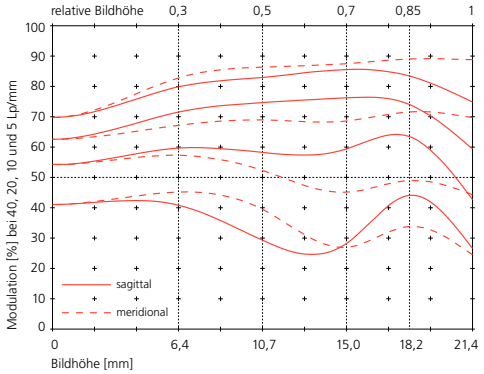
Rodenstock Photo Optics
a brand of the LINOS Photonics GmbH & Co. KG

RODENSTOCK

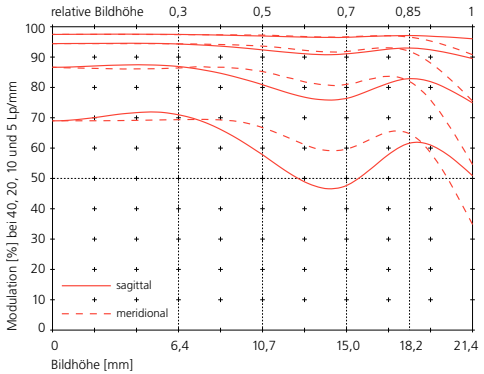
Rogonar-S 50 mm f/2,8

zurück zur Beschreibung

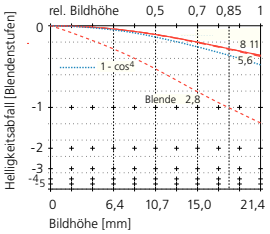
Modulationsübertragungsfunktion M = 10x Blende 2,8



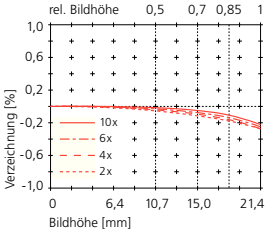
Modulationsübertragungsfunktion M = 10x Blende 5,6



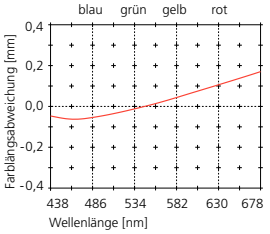
Relativer Helligkeitsabfall M = 10x



Verzeichnung M = 10x ... 2x



Farblängsabweichung M = 10x



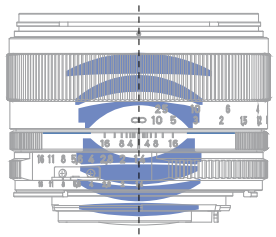
Alle Ortsfrequenzen [Linienpaare/mm] und Bildhöhen [mm] beziehen sich auf die Filmseite, Maßstäbe auf die Bildseite

Abb. 261| Datenblatt (Seite 3) für das Kameraobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Rogonar-S 50 mm' der Firma 'Rodenstock'.
Quelle: Rodenstock (Objektivspezifikation), 2012

.Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren'

Planar T* 1,4/50

Technische Daten/Technical Specifications



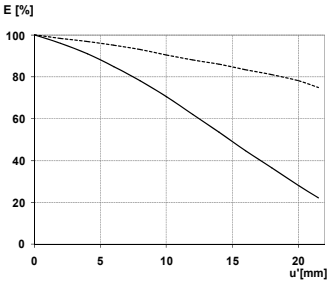
Brennweite/Focal length	50 mm
Blendenbereich/Aperture range	f/1,4 – f/16
Linsen / Gruppen/Lens elements / Groups	7/6
Fokussierbereich/Focusing range	0,45 m (17.72″) – ∞
Arbeitsabstand/Free working distance	0,35 m (13.78″) – ∞
Bildfeld*/Angular field* (diag. / horiz. / vert.)	45° / 38° / 26°
Bildkreisdurchmesser/Diameter of image field	43 mm (1.69″)
Anlagemaß/Flange focal distance	ZF, ZF.2: 46,50 mm (1.83″) ZE: 44,00 mm (1.73″)
Objektfeld bei Naheinstellung* Coverage at close range (MOD)*	160 x 240 mm (6.30 x 9.45″)
Abbildungsmaßstab bei Naheinstellung Image ratio at MOD	1:6.7
Filterdurchmesser/Filter thread	M58 x 0.75
Lage der Eintrittspupille (vor der Bildebene) Entrance pupil position (in front of image plane)	54,13 mm (2.13″)
Drehwinkel des Fokussierrings (inf – MOD) Rotation angle of focusing ring (inf – MOD)	223°
Durchmesser max./Diameter max.	ZF, ZF.2: 66,0 mm (2.60″) ZE: 71,3 mm (2.81″)
Durchmesser des Fokussierrings Diameter of focusing ring	ZF, ZF.2: 66,0 mm (2.60″) ZE: 71,3 mm (2.81″)
Länge (ohne Objektivdeckel)/Length (without lens caps)	ZF, ZF.2: 45 mm (1.77″) ZE: 48 mm (1.89″)
Länge (mit Objektivdeckeln)/Length (with lens caps)	ZF, ZF.2: 69 mm (2.72″) ZE: 71 mm (2.80″)
Gewicht/Weight	ZF, ZF.2: 330 g (0.73″) ZE: 380 g (0.84″)

* bezugnehmend auf das 24x36mm Format/referring to 36 mm format

Abb. 262| Datenblatt (Seite 1) für das Projektorobjektiv des 80er Messfeldes, 'Planar' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

Planar T* 1,4/50

Relative Beleuchtungsstärke/Relative Illuminance

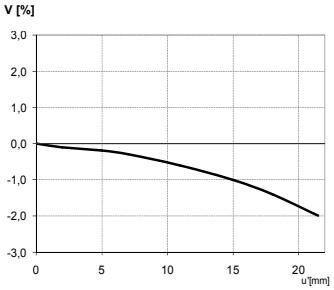


Die relative Beleuchtungsstärke zeigt die Abnahme der Bildhelligkeit von der Mitte des Bildes zu den Ecken. Angabe in Prozent.

The relative illumination shows in percent the decrease in image brightness from the image center to edge.

___ Blendenzahl: k = 1,4 / f-number = 1.4
… Blendenzahl: k = 4 / f-number = 4

Relative Verzeichnung/Relative Distortion



Die Relative Verzeichnung zeigt die Abweichung der aktuellen von der idealen Bildhöhe.

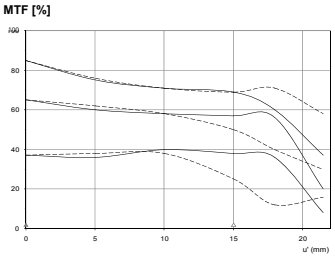
The relative distortion shows in percent the deviation of the actual from the ideal image height.

Angaben für unendlich.
Data for infinity.

Abb. 263| Datenblatt (Seite 2) für das Projektorobjektiv des 80er Messfeldes, 'Planar' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

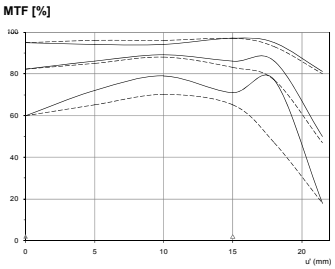
Planar T* 1,4/50

MTF Charts



Blendenzahl: k = 2 / f-number = 2

__ Sagittal
... Tangential



Blendenzahl: k = 4 / f-number = 4

__ Sagittal
... Tangential

Modulationsübertragung MTF als Funktion der Bildhöhe (u') und Spaltorientierung. Weißes Licht. Ortsfrequenzen R=10, 20 und 40 Perioden/mm. // Modulation transfer MTF as a function of the image height (u´) and slit orientation. White light. Spatial frequencies R=10, 20 and 40 cycles/mm.

Abb. 264| Datenblatt (Seite 3) für das Projektorobjektiv des 80er Messfeldes, 'Planar' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

Planar T* 1,4/50

Schärfentiefe/Depth of Field (DOF)*

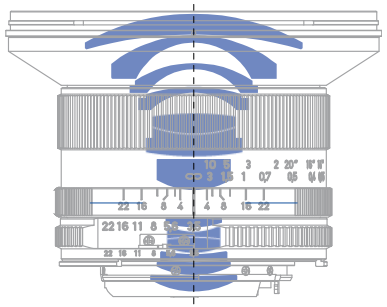
Engraved Distance	f/1.4		f/2.8		f/4		f/5.6		f/8		f/11		f/16	
Meter	From	to	From	to	from	to	from	to	from	to	from	to	from	to
infinity	47,60	∞	34,10	∞	23,90	∞	17,10	∞	12,00	∞	8,70	∞	6,00	∞
10m	8,29	12,60	7,76	14,10	7,09	17,00	6,30	24,00	5,50	58,00	4,70	∞	3,80	∞
5m	4,54	5,60	4,38	5,80	4,16	6,30	3,90	7,00	3,56	8,40	3,22	11,40	2,80	28,00
3m	2,83	3,19	2,77	3,27	2,68	3,41	2,57	3,60	2,42	3,90	2,26	4,50	2,04	5,80
2m	1,93	2,08	1,90	2,12	1,86	2,17	1,80	2,25	1,73	2,37	1,65	2,55	1,53	2,90
1,5m	1,46	1,54	1,44	1,56	1,42	1,59	1,39	1,63	1,35	1,69	1,30	1,78	1,22	1,95
1,2m	1,17	1,23	1,16	1,24	1,15	1,26	1,13	1,28	1,10	1,32	1,07	1,37	1,02	1,46
1m	0,98	1,02	0,98	1,03	0,97	1,04	0,95	1,05	0,93	1,08	0,91	1,11	0,88	1,17
0,80m	0,79	0,81	0,78	0,82	0,78	0,82	0,77	0,83	0,76	0,85	0,74	0,87	0,72	0,90
0,70m	0,69	0,71	0,69	0,71	0,68	0,72	0,68	0,72	0,67	0,74	0,66	0,75	0,64	0,77
0,60m	0,59	0,61	0,59	0,61	0,59	0,61	0,58	0,62	0,58	0,62	0,57	0,63	0,56	0,65
0,50m	0,50	0,50	0,49	0,51	0,49	0,51	0,49	0,51	0,49	0,52	0,48	0,52	0,47	0,53
0,45m	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,46	0,44	0,46	0,44	0,46	0,43	0,47	0,43	0,48

* Schärfentiefetabelle für das 24x36mm Format, Zerstreuungskreis 0.029mm (D/1500), gerundet auf 0.01m
Depth-of-field table for sensor format 24x36mm, circle of confusion 0.029mm (D/1500), rounded to 0.01m

Abb. 265| Datenblatt (Seite 4) für das Projektorobjektiv des 80er Messfeldes, 'Planar' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

Distagon T* 3,5/18

Technische Daten/Technical Specifications



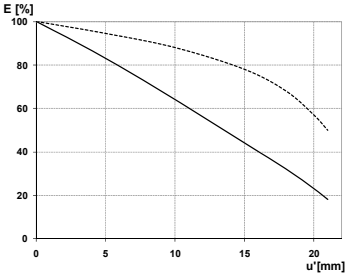
Brennweite/Focal length	18 mm
Blendenbereich/Aperture range	f/3.5 – f/22
Linsen / Gruppen/Lens elements / Groups	13/11
Fokussierbereich/Focusing range	0,3 m (11.81″) – ∞
Arbeitsabstand/Free working distance	0,19 m (7.48″) – ∞
Bildfeld*/Angular field* (diag. / horiz. / vert.)	99° / 90° / 67°
Bildkreisdurchmesser/Diameter of image field	43 mm (1.69″)
Anlagemaß/Flange focal distance	ZF, ZF.2: 46,50 mm (1.83″) ZE: 44,00 mm (1.73″)
Objektfeld bei Naheinstellung* **Coverage at close range (MOD)***	440 x 290 mm (17.32 x 11.42″)
Abbildungsmaßstab bei Naheinstellung **Image ratio at MOD**	1:12
Filterdurchmesser/Filter thread	M82 x 0.75
Lage der Eintrittspupille (vor der Bildebene) **Entrance pupil position (in front of image plane)**	82,4 mm (3.23″)
Drehwinkel des Fokussierrings (inf – MOD) **Rotation angle of focusing ring (inf – MOD)**	96°
Durchmesser max./Diameter max.	ZF, ZF.2, ZE: 87 mm (3.43″)
Durchmesser des Fokussierrings **Diameter of focusing ring**	ZF, ZF.2: 63,3mm (2.49″) ZE: 71 mm (2.80″)
Länge (ohne Objektivdeckel)/Length (without lens caps)	ZF, ZF.2: 59 mm (2.32″) ZE: 61 mm (2.40″)
Länge (mit Objektivdeckeln)/Length (with lens caps)	ZF, ZF.2: 84 mm (3.31″) ZE: 85 mm (3.35″)
Gewicht/Weight	ZF, ZF.2: 470 g (1.04 lbs) ZE: 510 g (1.12 lbs)

* bezugnehmend auf das 24x36mm Format/referring to 36 mm format

Abb. 266| Datenblatt (Seite 1) für das Projektorobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Distagon' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

Distagon T* 3,5/18

Relative Beleuchtungsstärke/Relative Illuminance

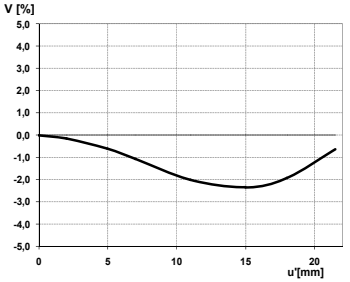


Die relative Beleuchtungsstärke zeigt die Abnahme der Bildhelligkeit von der Mitte des Bildes zu den Ecken. Angabe in Prozent.

The relative illumination shows in percent the decrease in image brightness from the image center to edge.

__ Blendenzahl: k = 3,5 / f-number = 3.5
… Blendenzahl: k = 8 / f-number = 8

Relative Verzeichnung/Relative Distortion



Die relative Verzeichnung zeigt die Abweichung der aktuellen von der idealen Bildhöhe.

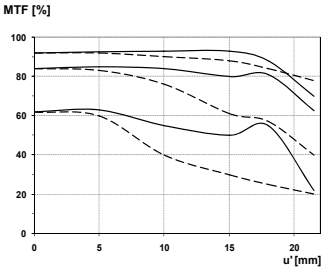
The relative distortion shows in percent the deviation of the actual from the ideal image height.

Angaben für unendlich.
Data for infinity.

Abb. 267| Datenblatt (Seite 2) für das Projektorobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Distagon' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

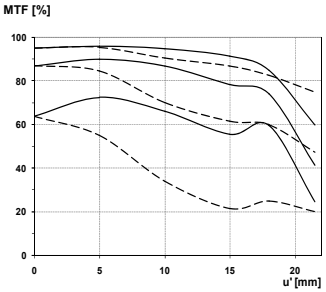
Distagon T* 3,5/18

MTF Charts



Blendenzahl: k = 3,5 / f-number = 3.5

__ Sagittal
… Tangential



Blendenzahl: k = 8 / f-number = 8

__ Sagittal
… Tangential

Modulationsübertragung MTF als Funktion der Bildhöhe (u') und Spaltorientierung. Weißes Licht. Ortsfrequenzen R=10, 20 und 40 Perioden/mm. // Modulation transfer MTF as a function of the image height (u') and slit orientation. White light. Spatial frequencies R=10, 20 and 40 cycles/mm.

Abb. 268| Datenblatt (Seite 3) für das Projektorobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Distagon' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

Distagon T* 3,5/18

Schärfentiefe/Depth of Field (DOF)*

Engraved Distance	f/3.5		f/4		f/5.6		f/8		f/11		f/16		f/22	
Meter	from	to	from	to	from	to	from	to	from	to	from	to	from	to
infinity	3,40	∞	3,00	∞	2,20	∞	1,50	∞	1,10	∞	0,80	∞	0,60	∞
3m	1,60	23,00	1,50	∞	1,30	∞	1,10	∞	0,90	∞	0,70	∞	0,50	∞
1,5m	1,08	2,50	1,04	2,80	0,93	4,50	0,80	∞	0,70	∞	0,60	∞	0,50	∞
1m	0,80	1,35	0,78	1,42	0,72	1,70	0,65	6,80	0,58	6,80	0,50	∞	0,40	∞
0,70m	0,60	0,84	0,59	0,87	0,56	0,96	0,52	1,60	0,47	1,60	0,42	4,10	0,40	∞
0,50m	0,45	0,56	0,45	0,57	0,43	0,60	0,41	0,77	0,38	0,77	0,35	1,06	0,32	2,10
0,40m	0,37	0,43	0,37	0,44	0,36	0,46	0,34	0,54	0,33	0,54	0,30	0,64	0,28	0,87
0,35m	0,33	0,37	0,33	0,38	0,32	0,39	0,31	0,44	0,30	0,44	0,28	0,50	0,26	0,62
0,30m	0,29	0,32	0,29	0,32	0,28	0,33	0,27	0,36	0,26	0,36	0,25	0,39	0,24	0,45

* Schärfentiefetabelle für das 24x36mm Format, Zerstreuungskreis 0.029mm (D/1500), gerundet auf 0.01m
Depth-of-field table for sensor format 24x36mm, circle of confusion 0.029mm (D/1500), rounded to 0.01m

Abb. 269| Datenblatt (Seite 4) für das Projektorobjektiv des 1000er Messfeldes, 'Distagon' der Firma 'Zeiss'.
Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifikation), 2012

.Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren'

29.8 Bestimmung des Messvolumens von 'COMET 5 11M 80'

Für die messtechnische Bestimmung des Messvolumens wird der Sensor zunächst kalibriert. Daran folgt seine senkrechte Ausrichtung zu einer ebenen Fläche. Die optische Achse der Kamera entspricht daraufhin einem Normalenvektor der Reflexionsebene und das Streifenmuster wird analog zur Sensorgeometrie verzerrt projiziert (►Abb. 270|).

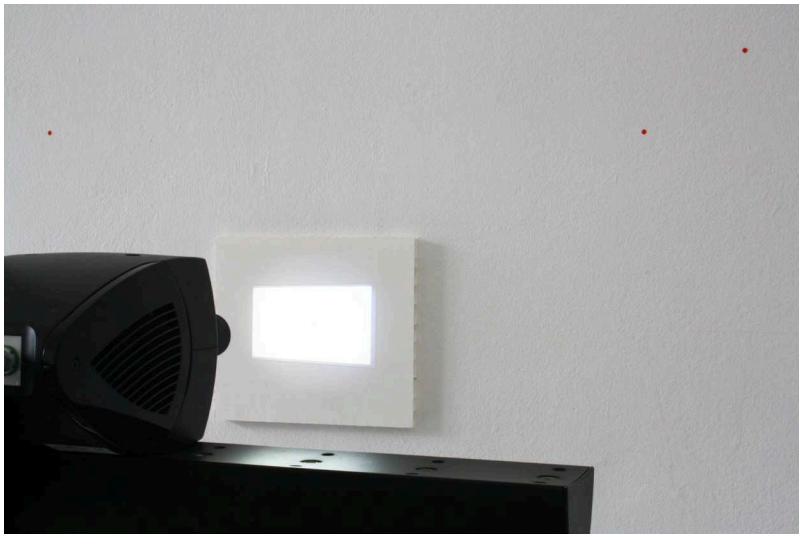


Abb. 270| Bei senkrechter Ausrichtung der Kamera wird das Streifenmuster in Form eines Parallelogramms verzerrt. Hier abgebildet der Sensor 'COMET 5 11M 80'. Als Projektionsebene diente eine ebene Aluminiumplatte. Im Hintergrund sind die orangefarbenen Markierungspunkte zu erkennen, die aus der Messvolumenbestimmung des 1000er Messvolumens hervorgegangen sind.
Quelle: Selbst

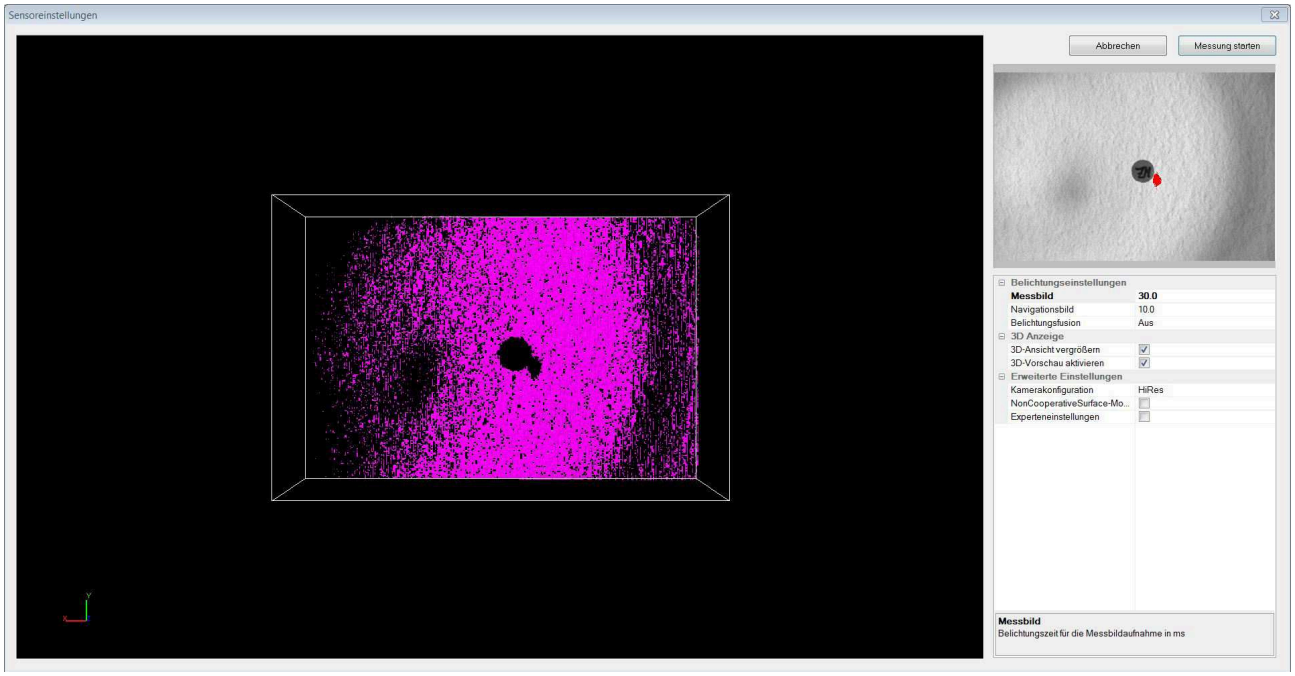


Abb. 271| Bei der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' ist eine orthogonale Ausrichtung des Sensors zur Reflexionsebene verhältnismäßig schwierig. Beide stehen windschief zueinander. Bereits kleinste Veränderungen der räumlichen Ausrichtung führen zur über- bzw. unterschrittenen Messvolumengrenze. Zudem fällt eine Korellation von Messpunkten, bzw. Messlücken mit einem Grauschleier im Kamerabild auf. Letzteres wird anhand des Live-Bildes, oberhalb der Belichtungseinstellung (rechts), deutlich. Anzunehmen sind hier Objektivfehler (die jedoch nicht weiter untersucht wurden).
Quelle: Selbst

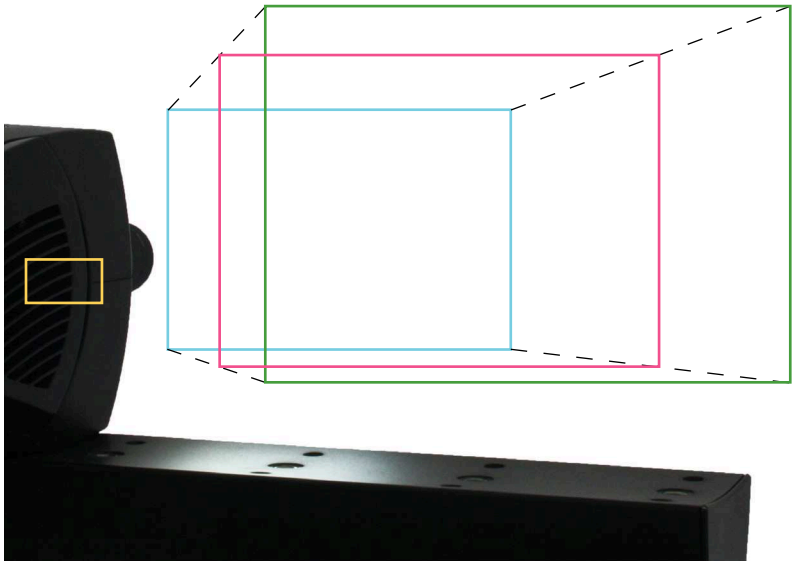


Abb. 272| In der Farbe Grün dargestellt ist aus Kamerasicht die hintere Messvolumengrenze [Z''], wobei Pink der Mitte des Messvolumens entspricht [Z'] und Blau [Z] der kamerazugewandten Grenze. Die Seitenflächen ergeben sich durch die grau-gestrichelte Markierung entlang der Achse der Kamera. Die Chipebene ist gelb hervorgehoben.
Quelle: Selbst

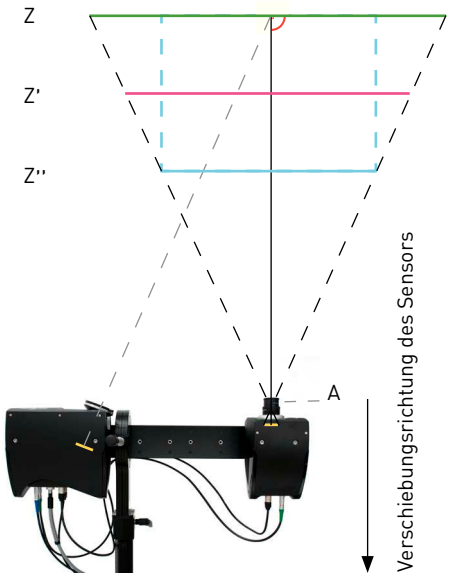


Abb. 273| Geometrische Anordnung des Sensors während der Bestimmung der Messvolumina. Die Sensorkamera ist senkrecht zur Reflexionsebene ausgerichtet. Die Verschiebungsrichtung des Sensors erfolgt von der Reflexionsebene weg.
Quelle: Selbst

Zur Bestimmung des dreidimensionalen Messvolumens sollen, aus Sicht der Kamera, sowohl die beiden seitlichen Grenzflächen bestimmt werden, als auch die obere- und untere, sowie die hintere- und vordere Grenzfläche (►Abb. 272|). Bis zu diesem Zeitpunkt wird als Messvolumen ein virtueller Quader angenommen. Als Grenzflächen werden in diesem Zusammenhang jene Ebenen verstanden, bei denen am Rand des Messvolumens gerade keine Messpunkte mehr erzeugt werden können. Zur Ermittlung der Lage der vorderen Messvolumengrenze, also jener, die parallel zur Chipebene verläuft und dieser zugewandt ist, wird der Sensor so lange lotrecht auf eine Projektionsebene hin bewegt, bis gerade keine Messpunkte mehr erzeugt werden können.[722] Der kugelgelagerte, horizontale Arm des Sensorstatives ermöglicht ein präzises Verfahren, ohne dabei das Ebenenlot der Ausrichtung zu verändern.[723] Die auf diese Weise bestimmte Messvolumenebene wird mit der Position Z'' festgelegt (►Abb. 272| und Abb. 273|). Zugleich stellte sie den Ausgangspunkt für die folgende Bestimmung der anderen Grenzflächen dar. So wird hier der Abstand von der Objektivkante (A) zur Projektionsfläche (Z'') gemessen. Die Werte finden sich in ►Tab. 74| unter der Rubrik 'Distanz' (Strecke AZ'').

722 Bei der Ermittlung der zum Kamerachip zugewandten Grenze des Messvolumens ergeben sich Probleme bei der lotrechten Ausrichtung des Sensors. Bereits geringfügige Veränderungen der Position des Sensors äußern sich unmittelbar in einem windschiefen Verzug der Grenzfläche der Messpunkte. In ►Abb. 271| wird dieses anhand des Vergleiches zur Lage der Messpunkte mit dem Live-Bild der Kamera deutlich. Im linken Bildbereich können keine Messpunkte mehr erhoben werden, wohingegen ihre Anzahl zur Mitte hin ansteigt, bzw. die Verortung analog eines nach rechts gerichteten Gradienten besteht. Aus dieser Beobachtung ergibt sich der Rückschluss einer Fehlerquelle, sodass eine Toleranz mit ± 1mm geschätzt wird.

723 Gemäß der Festlegung in dieser Arbeit: entlang der Z-Achse.

Grenze Messvolumen	Z	Z'	Z''
Distanz Objektivkante Messvolumengrenze Strecke [AZ*] in mm	478	463	432

Tab. 74| Distanz zwischen der Objektivkante und der Projektionsfläche zur Bestimmung der Messvolumengrenzen von 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

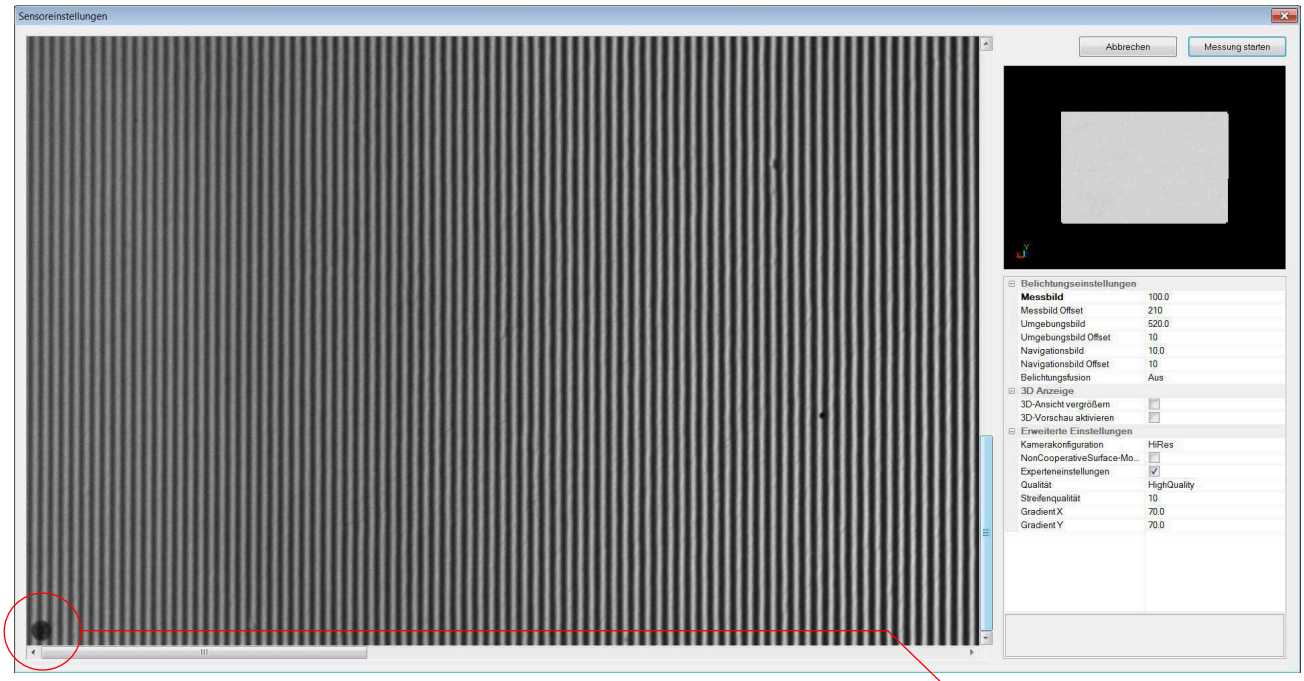


Abb. 274| Positionierung der Markierungspunkte zur Bestimmung der Grenzen des Messvolumens. Hier gezeigt anhand des Livebildes der Kamera im Einstellungsdialog des Sensors. Unten links befindet sich ein Grenzpunkt. Die projizierten Streifen verlaufen parallel zu den Kanten des Kamerabildes. Dieses spricht für die Qualität der Ausrichtung in Bezug zur senkrechten Ausrichtung des Sensors.
Quelle: Selbst

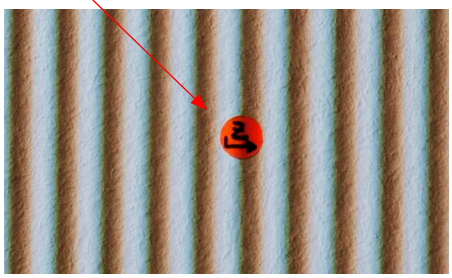


Abb. 275| Detailfoto eines Markierungspunktes zur Bestimmung der linken, unteren Messvolumengrenze (hier für das 1000er Messvolumen, an der exemplarisch gewählten Z-Ebene).
Quelle: Selbst

Die Quantifizierung der lateralen Dimension der zuvor verorteten vorderen Grenzfläche erfolgt über Markierungen auf der Projektionsebene. Diese werden anhand des Livebildes der Sensorkamera soweit in den Ecken positioniert, dass sie dort gerade noch sichtbar sind. Damit repräsentieren sie aus Kamerasicht die Ecken der vorderen Messvolumengrenze (►Abb. 272|, Abb. 274| und Abb. 275|). Die Entfernungen zwischen den vier Markierungen entsprechen damit der Höhe, respektive der Breite der Grenzfläche, bzw. des Messvolumens. Die Abmessungen sind in ►Tab. 75| zusammengefasst.

Grenze Messvolumen	Z	Z'	Z''
Höhe (Y-Achse) in mm	51,5	48,5	44,5
Breite (X-Achse) in mm	78	73	67
Ebenendiagonale in mm	93,4	87,6	8,04

Tab. 75| Angaben zu den Abmessungen der drei gemessenen Ebenen des Messvolumens 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

In einem weiteren Schritt erfolgt die Bestimmung der Lage und der Dimension der mittleren Projektionsebene des Messvolumens – festgelegt mit Z'. Hierzu wird der Sensor entlang des selben Ebenenlotes, wie zuvor, von der Projektionsebene wegbewegt, bis Laserpunkt und Lichtkreuz deckungsgleich übereinander liegen.[724] Hierbei wird die

724 Nach Herstellerangaben entspricht diese Position der Mitte des Messvolumens. Vergleiche: Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung), 2009, Seite 5

zurückgelegte Strecke bestimmt, sodass der Abstand von Objektivkante zur Projektionsfläche ermittelt werden kann (►Tab. 74|, Strecke AZ'). Die Bestimmung von Höhe und Breite erfolgt abermals über die Entfernungen der Markierungspunkte, welche zuvor anhand der Ecken des Live-Bildes der Sensorkamera auf der Projektionsebene angebracht wurden (►Tab. 75|).
Gemäß des bisherigen Schemas erfolgt abschließend noch die Bestimmung der hinteren Messvolumengrenze, also jener die parallel zur Chipeben verläuft, jedoch von dieser am weitesten entfernt ist (►Tab. 74|, Strecke AZ und Tab. 75|).

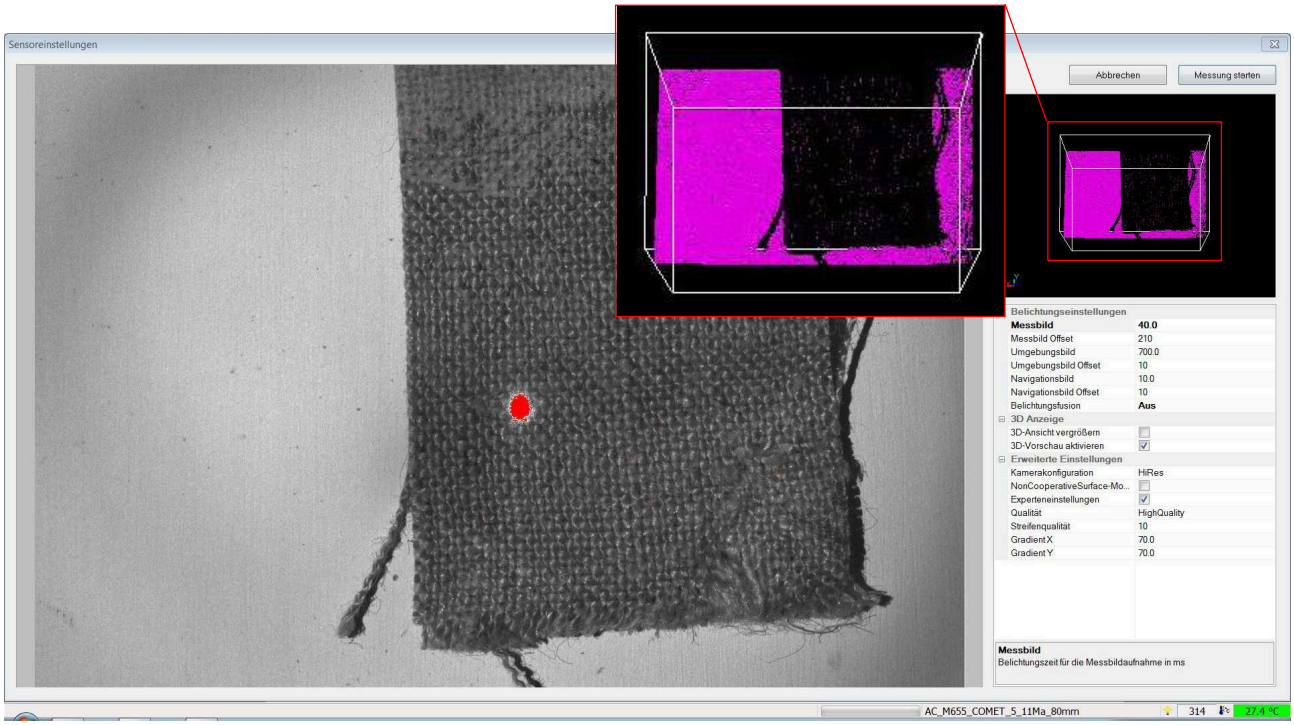


Abb. 276| Bildschirmfoto der aktivierten 3D-Vorschau zur Veranschaulichung der Geometrie des Messvolumens. Diese wird als perspektivisch verzerrter Quader, also als ein Pyramidenstumpf dargestellt.
Quelle: Selbst

Anhand der vorgenommenen Bestimmung der Ebenenabmessungen wird deutlich, dass die vordere Grenzfläche Z'' kleiner ist als die hintere Grenzfläche Z. Aufgrund der Optik der Sensorkamera weist der Messraum die Geometrie eines virtuellen Pyramidenstumpfes auf (►Abb. 276| und Abb. 277|). Demzufolge haben die Seitenflächen des Messraumes die Form eines gleichschenkeligen Trapezes. Aufgrund optisch-konstruktiver Merkmale ergibt sich gleichsam auch seitens des projizierten Streifenmusters die Geometrie eines Pyramidenstumpfes. Dabei hat der eine, projektorseitige Pyramidenstumpf seine Deckfläche in der Ebene des LCoS-Displays, wohingegen der zweite kameraseitige Pyramidenstumpf mit seiner Deckfläche der Chipebene der Digitalkamera entspricht (►Abb. 277|). Diese beiden Pyramidenstümpfe durchdringen einander. So kennzeichnet sich der Messraum durch die Geometrie eines Polyeders. Da zur Berechnung der 3D-Koordinaten der Messpunkte ein kartesisches Koordinatensystem erforderlich ist, wird softwareseitig entsprechend der Begrenzungsflächen des Polyeders, mathematisch ein virtueller Quader mit maximaler Ausdehnung in seiner Mitte bestimmt. Dabei definiert die Blickrichtung der Kamera die Z-Richtung eines rechtshändigen,

kartesischen Koordinatensystems. Die maximale Ausdehnung des Koordinatensystems wird dabei über die Dimension jener Grenzfläche der Messpunkt bestimmt die in ebenenparalleler Ausrichtung dem Kamerachip zugewandt sind. Diese entspricht der bestimmten, kleinsten Ebene Z'' (►Abb. 273| und Abb. 277| blau gestrichelt).[725,726]

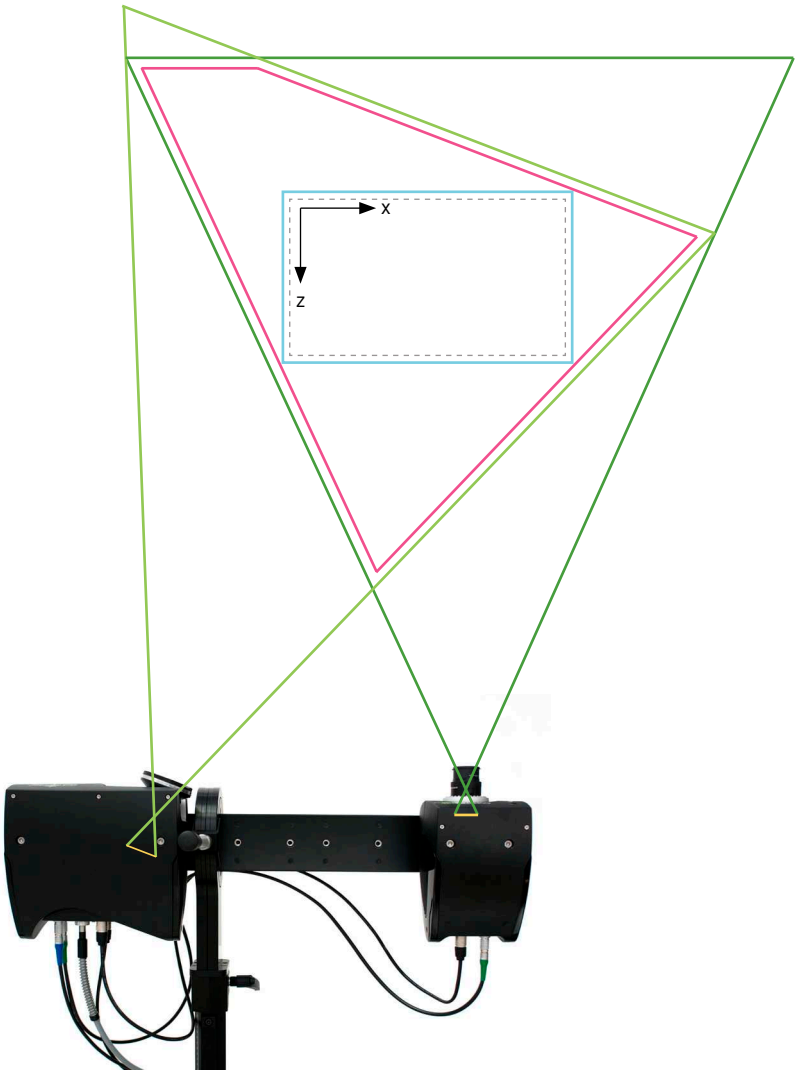


Abb. 277| Grafik zur Geometrie der Messvolumina. Hier exemplarisch gewählt das 1000er Messvolumen in der Aufsicht. Der Projektionsraum des Projektors ist hellgrün markiert, wobei die Deckfläche des Pyramidenstumpfes der Ebene des LCoS-Displays entspricht (gelb dargestellt). Der Detektionsraum der Kamera ist hingegen dunkelgrün visualisiert. Auch hier entspricht die Deckfläche des Pyramidenstumpfes der Chipebene (gelb dargestellt). Die Durchdringung der beiden virtuellen Pyramidenstümpfe entspricht dem tatsächlichen Messvolumen, welches die Form eines Polyeders aufweist (rot und lediglich zweidimensional dargestellt). Zur Berechnung der einzelnen Punkte im Messvolumen wird das tatsächliche Messvolumen von orthogonal zueinander stehende Flächen begrenzt (blau dargestellt). Zudem erfolgt im Zuge der Kalibrierung die Begrenzung dieses orthogonalen Messvolumens durch die Werteparameter 'CoorLimits' (gestrichelt dargestellt).
Quelle: Selbst

725 Unter Annahme eines Quaders bestimmt jeweils die kürzeste Kantenlänge einer Ebene die maximale Ausdehnung des Quaders.

726 Neben den oben aufgezeigten Limitierungen des Messvolumens, die sich aus optisch-geometrischen Gegebenheiten begründen, kommt eine weitere mathematische Verkleinerung hinzu. Zum Randbereich des Messvolumens nimmt die Datenqualität aufgrund optischer Fehler ab. Zur Gewährleistung optimaler Messwerte wird daher jedes Messvolumen, im Rahmen der Kalibrierung, zusätzlich softwareseitig begrenzt. In einer Initialisierungsdatei sind die begrenzenden Werteparameter (sog. ‚CoorLimits') für die X-, Y- und Z-Achse des Messvolumens hinterlegt. Deren Festlegung erfolgt durch die Kalibrierung. In ►Abb. 277| ist diese zusätzliche Beschränkung des Messvolumens als grau gestrichelte Linie visualisiert. Aus den genannten Gründen sind die Angaben zu den Größen der Messvolumina nicht als absolute Werte zu verstehen. Für das 80er Messvolumen ist die Dateibezeichnung ‚CoorLimits': ‚AC_M655_COMET_5_11Ma_80mm.ini'. Entsprechend ist die Datei für das 1000er Messvolumen benannt: ‚AC_M655_COMET_5_11Ma_1000mm.ini'.

Folglich definiert sich das Messvolumen von 'COMET 5 11M 80' durch die Abmessungen:

Höhe [H] = Z'' = 44,5 mm
Breite [B] = Z'' = 67,0 mm
Tiefe [T] = Z – Z'' = 46,0 mm
Raumdiagonale [d] = √ 44,52 + 672 + 462 = 92,6 mm
Volumen [V] = 44,5 x 67 x 46 = 137.149 mm³

29.9 Bestimmung des Messvolumens von 'COMET 5 11M 1000'

Nach der oben beschriebenen Vorgehensweise erfolgt die Bestimmung des Messvolumens von 'COMET 5 11M 1000' ex aequo. Die Ergebnisse der Entfernungsbestimmung von der Objektivkante zur Projektionsebene, sowie die zugehörigen Ebenenabmessungen sind in den folgenden Tabellen zusammengetragen (►Tab. 76|, Strecke AZ und Tab. 77|).

Grenze Messvolumen	Z	Z'	Z''
Distanz Objektivkante Messvolumengrenze Strecke [AZ*] in mm	1670	1380	1085

Tab. 76| Distanz zwischen der Objektivkante und der Projektionsfläche zur Bestimmung der Messvolumengrenzen von COMET 5 11M 1000'.
Quelle: Selbst

Grenze Messvolumen	Z	Z'	Z''
Höhe (Y-Achse) in mm	754	622	486
Breite (X-Achse) in mm	1125	930	730
Ebenendiagonale in mm	1125	930	877

Tab. 77| Angaben zu den Abmessungen der drei gemessenen Ebenen des Messvolumens 'COMET 5 11M 1000'.
Quelle: Selbst

Folglich definiert sich das Messvolumen von 'COMET 5 11M 1000' durch die Abmessungen:

Höhe [H] = Z'' = 486 mm
Breite [B] = Z'' = 730 mm
Tiefe [T] = Z – Z'' = 1670–1085= 585 mm
Raumdiagonale [d] =√ 4862 + 7302 + 5852 = 1054.192 mm
Volumen [V] = 44,5 x 67 x 46 = 207.546.300 mm³

Zusammenfassung der ermittelten Messvolumina des 'COMET-Systems' für die verwendeten Sensorkonfiguration (►Tab. 78|).

Sensorbezeichnung	Messvolumen	Arbeitsabstand Entspricht Distanz [AZ*]
COMET 5 11M 80	44,5 x 67 x 46 mm³	463 mm
COMET 5 11M 1000	486 x 730 x 585 mm³	1380 mm

Tab. 78| Übersicht zu den messtechnisch ermittelten Dimensionen der zwei Messvolumina.
Quelle: Selbst

29.10 Einordnung der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 1000'

Gemäß einer iterativen Vorgehensweise erfolgt zunächst die Bestimmung des Auflösungsvermögens von 'COMET 5 11M 1000'. Der hierfür zuerst verwendete Untersuchungsgegenstand

– 'Rauheitsnormal (ITO)',[727] (►Abb. 278| und Abb. 279|) – kennzeichnet sich sowohl vorderseitig, als auch rückseitig durch eine Treppenstruktur. Im Gegensatz zu den feinen Strukturen auf der Vorderseite ist die Rückseite durch eindeutigere Stufenhöhen gegliedert – Letztgenannte wird daher zuerst untersucht. Die Fragestellung gilt sowohl der Möglichkeit einer prinzipiellen Unterscheidung der verschiedenen Ebenen, als auch, im Falle eines positiven Nachweises, der Quantifizierung der Stufenhöhen. Zur Gewährleistung optimaler Messergebnisse wird der Sensor vor Versuchsbeginn kalibriert.

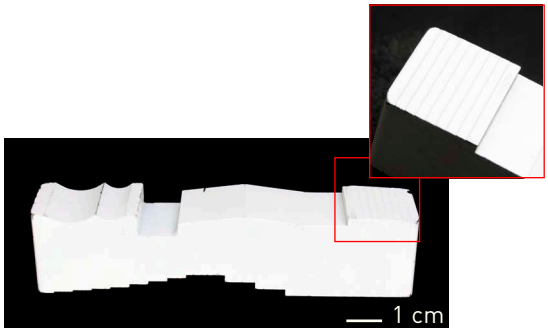


Abb. 278| Foto des 'Rauheitsnormals (ITO)' (Vorderseite), sowie ein Detailfoto der fein strukturierten Oberfläche aus schrägem Blickwinkel.
Quelle: Elisabeth George

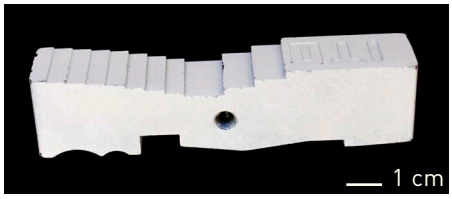


Abb. 279| Foto des 'Rauheitsnormals (ITO)' (Rückseite).
Quelle: Elisabeth George

Datenerhebung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

Ziel der Digitalisierung ist ein virtuelles Modell des Konturnormal – nach Möglichkeiten ohne Messlücken. Daher wird der Untersuchungsgegenstand aus mehreren Messwinkeln gescannt. Zur Anwendung kommt der hochauflösende Belichtungsmodus: 'HiRes' ohne 'NCS-Mode'. Die Messparameter sind dem zugehörigen Messprotokoll vorangestellt.[728]

Auswertung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

In Vorbereitung zur Datenauswertung werden die triangulierten Messdaten in 'COMETplus' ausgerichtet. Aufgrund der orthogonalen Form des Untersuchungsgegenstandes ist hierfür die '3-Ebenen Ausrichtung' prädestiniert. Das 3D-Modell ist folglich kantenparallel zum Koordinatensystem. In 'INSPECTplus' wird zur Bestimmung der Stufenhöhe eine virtuelle zentrale Bezugsebene erstellt. Diese wird durch die X-/Y-Achse aufgespannt und ist damit ebenenparallel zu den Auftrittsflächen der Stufen des 3D-Modells. Im 'Viewer' ist sie an ihrer grünen Farbe erkennbar (►Abb. 280|).

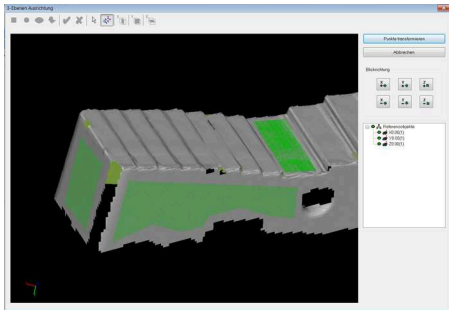


Abb. 280| Für die folgende Berechnung der Auflösungsgrenze muss zunächst eine Bezugsebene erzeugt werden. Hierfür ist die ebenenparallele Ausrichtung des virtuellen Modells zu den Schnittebenen der Koordinatenachsen die Grundvoraussetzung. Die Ausrichtung erfolgte in 'COMETplus' über die '3-Ebenen Ausrichtung'.
Quelle: Selbst

Zur Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse wird durch Klicken mehrerer virtueller Punkte auf jeder Auftrittsfläche des digitalisierten Konturnormals jeweils eine virtuelle Ebene aufgespannt (►Abb. 281|). Die so erzeugten Ebenen sind repräsentativ für die einzelnen Stufen. Visuell sind sie anhand ihrer blauen Färbung zu erkennen. Mit Hilfe virtueller, lotrechter Messschieber können im weiteren Verlauf die Abstände der einzelnen Ebenen zu der gemeinsamen Ausgleichsebene bestimmt werden, sodass wiederum durch die Berechnung ihrer Differenz im Rückschluss die Stufenhöhe quantifiziert werden kann. Die Entfernungen sind über das Feld 'Eigenschaften' abzulesen, bzw. wie im Protokoll dargestellt, anhand der zugehörigen Flyer ersichtlich (►Abb. 282|).

Für die Auswertung werden die Messschieberlängen in eine Tabelle importiert (►Tab. 79|). Aufgrund konstruktiver Merkmale des Konturnormals lassen sich die Abstufungen in drei Gruppen zusammenfassen. Die erste Gruppe umfasst 'Schieblehre_01' bis

727 Bei dem Konturnormal handelt es sich um einen nicht-zertifizierten Eigenbau des beteiligten Projektpartners (ITO). Gemäß ihrer eigentlichen Bestimmung unterliegen Konturnormale einer Normung, welche in der Bundesrepublik Deutschland durch die Direktive der ‚Physikalisch-Technischen Bundesanstalt' vorgenommen wird. Für eine erste grobe Bestimmung ist das ‚Rauheitsnormal (ITO)' jedoch zweckmäßig. Das ausschlaggebende Kriterium für dessen Wahl begründete sich durch seine generelle Verfügbarkeit.

728 Diese Dokumentation und Gliederung der Metadaten gilt für alle Experimente der vorliegenden Schrift.

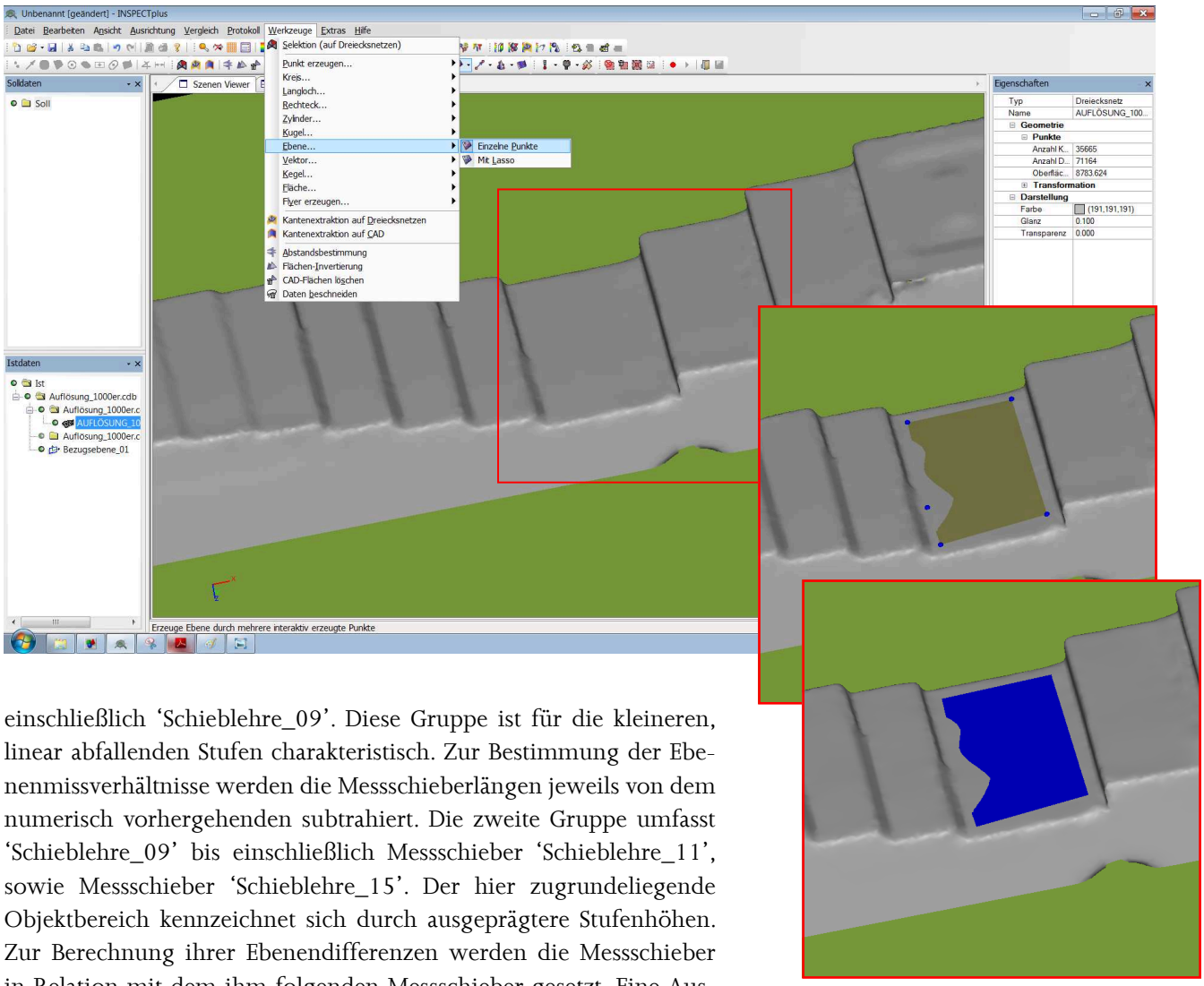


Abb. 281| Erstellen einer Ebene auf der Oberfläche des virtuellen Modells des Normal. Hierzu wird eine Ebene aufgespannt, indem sie definierende Punkte durch Auswahl platziert werden. Nach ihrer Berechnung wird sie durch die Farbe Blau dargestellt und im Datenexplorer mit 'Ebene_1' benannt.
Quelle: Selbst

einschließlich 'Schieblehre_09'. Diese Gruppe ist für die kleineren, linear abfallenden Stufen charakteristisch. Zur Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse werden die Messschieberlängen jeweils von dem numerisch vorhergehenden subtrahiert. Die zweite Gruppe umfasst 'Schieblehre_09' bis einschließlich Messschieber 'Schieblehre_11', sowie Messschieber 'Schieblehre_15'. Der hier zugrundeliegende Objektbereich kennzeichnet sich durch ausgeprägtere Stufenhöhen. Zur Berechnung ihrer Ebenendifferenzen werden die Messschieber in Relation mit dem ihm folgenden Messschieber gesetzt. Eine Ausnahme bildete hier, abermals konstruktionsbedingt, 'Schieblehre_11' welche von 'Schieblehre_15' subtrahiert wird. Die dritte Gruppe umfasste die Verbleibenden: 'Schieblehre_12' bis einschließlich wiederholt 'Schieblehre_15'. Dieser Bereich (gefräster Schriftzug 'ITO') ist durch eine besonders fein reliefierte Oberfläche strukturiert. Einer visuellen Beurteilung zufolge ist dieses Areal jenes, welches auf der Rückseite des Normals den geringsten Niveauunterschied erwarten lässt und daher für die Bestimmung der Auflösungsgrenze von Bedeutung ist. 'Schieblehre_15' repräsentiert die Ebene, in die der Schriftzug eingefräst wurde. Die Buchstabensohlen werden wiederum von 'Schieblehre_12' ('O'), 'Schieblehre_13' ('T') und 'Schieblehre_14' ('I') repräsentiert, sodass zur Bestimmung des Ebenenmissverhältnisses letztgenannte von 'Schieblehre_15' subtrahiert werden kann.

Ergebnis: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

Dem Grundsatz nach kann die Rückseite des Normals vom Sensor aufgelöst werden. So sind alle Stufenhöhen auch quantitativ zu bestimmen (►Tab. 79| und Abb. 283| und Abb. 284|). Demnach definiert sich das geringste Ebenenmissverhältnis mit 0,428 mm. Dieses

wird durch 'Schieblehre_02' und 'Schieblehre_03' bestimmt, wobei diese auf die gemeinsame Bezugsebene referenzieren. Damit ist die oben postulierte These nicht haltbar, dass das geringsten Ebenenmissverhältnis im Bereich des gefrästen Schriftzuges verortet ist. Trotz des numerischen Beleges wird auf eine verifizierende Messung mit der hochauflösenden Sensorkonfiguration verwiesen. Ferner kann anhand der Gliederung der Messschieberlängen aufgezeigt werden, dass die Rückseite des Konturnormals durch gruppierte, teils sich wiederholende Stufenhöhen bestimmt wird.

Nachdem durch die Versuchsreihe eine erste Einschätzung zur Auflösung vorgenommen werden konnte, wird empfohlen diese an einem geeigneten Normal mit Rauheitskenngrößen kleiner 0,5 mm weiter einzuschränken.

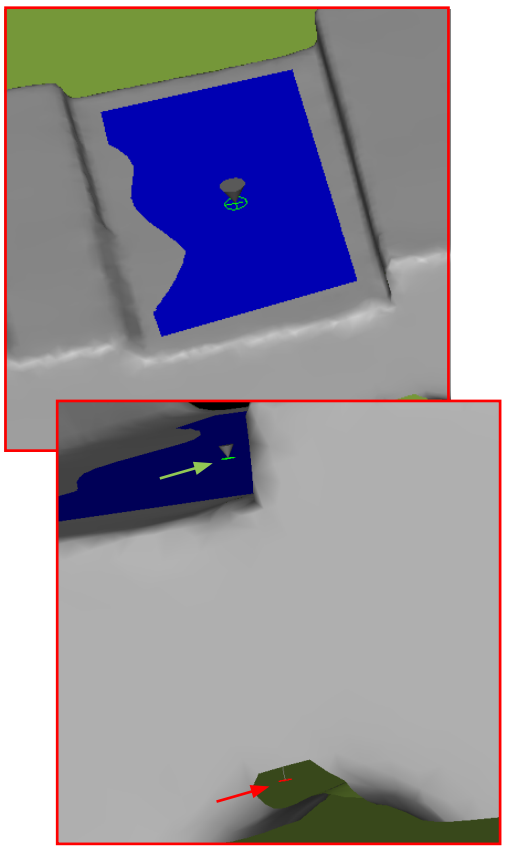


Abb. 282| Ein virtueller Messschieber. Anfang ist grün, sein Ende rot markiert.
Quelle: Selbst

	Länge (mm)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch vorhergehenden Messschieber)		Ebenenmissverhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch nachfolgenden Messschieber, wobei 'Schieblehre_11' konstruktionsbedingt auf 'Schieblehre_15' referenziert)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf 'Schieblehre_15')
Schieblehre_01	10,632	0,000			
Schieblehre_02	10,184	0,448			
Schieblehre_03	9,756	0,428			
Schieblehre_04	9,323	0,433			
Schieblehre_05	8,882	0,441			
Schieblehre_06	7,944		0,938		
Schieblehre_07	6,994		0,950		
Schieblehre_08	6,064		0,930		
Schieblehre_09	5,164		0,900	2,103	
Schieblehre_10	7,267			2,089	
Schieblehre_11	9,356			2,414	
Schieblehre_12	11,290				0,480
Schieblehre_13	11,227				0,543
Schieblehre_14	11,149				0,621
Schieblehre_15	11,770				0,000
Standardabweichung		0,009	0,021	0,184	0,071
Spannweite		0,020	0,050	0,325	0,141

Tab. 79| Die ermittelte Länge der Abstufungen der strukturierten Oberfläche des Konturnormals. Die Angaben beziehen sich auf dessen Rückseite, wie in ►Abb. 279| gezeigt.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter	
Objekt	Rauheitsnormal (ITO)
Benennung	Bestimmung Auflösungsgrenzen (Rückseite)
Datum	02.07.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	10/diverse
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	diverse
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	240
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	18.664
	Anzahl Dreiecke	37.007
	Oberfläche (mm^2)	8.780.757

Tab. 80| Metadaten zu 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite. Die Angabe des Messwinkels folgt bei dieser und allen weiteren Messungen den Vorgaben des Geräteherstellers. So definiert 0 ° die senkrechte Ausrichtung der Sensorkamera zur Objektoberfläche.
Quelle: Selbst

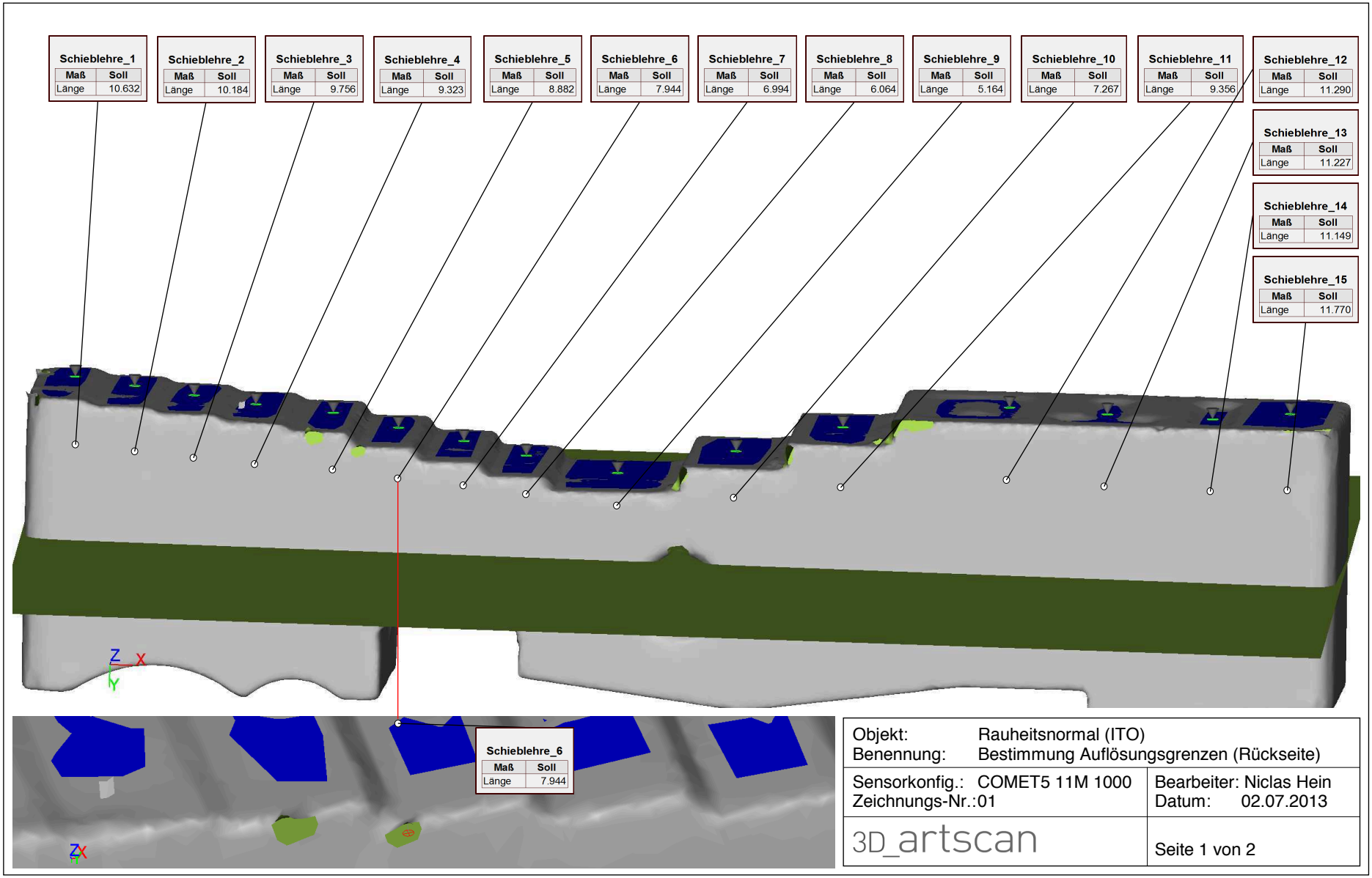
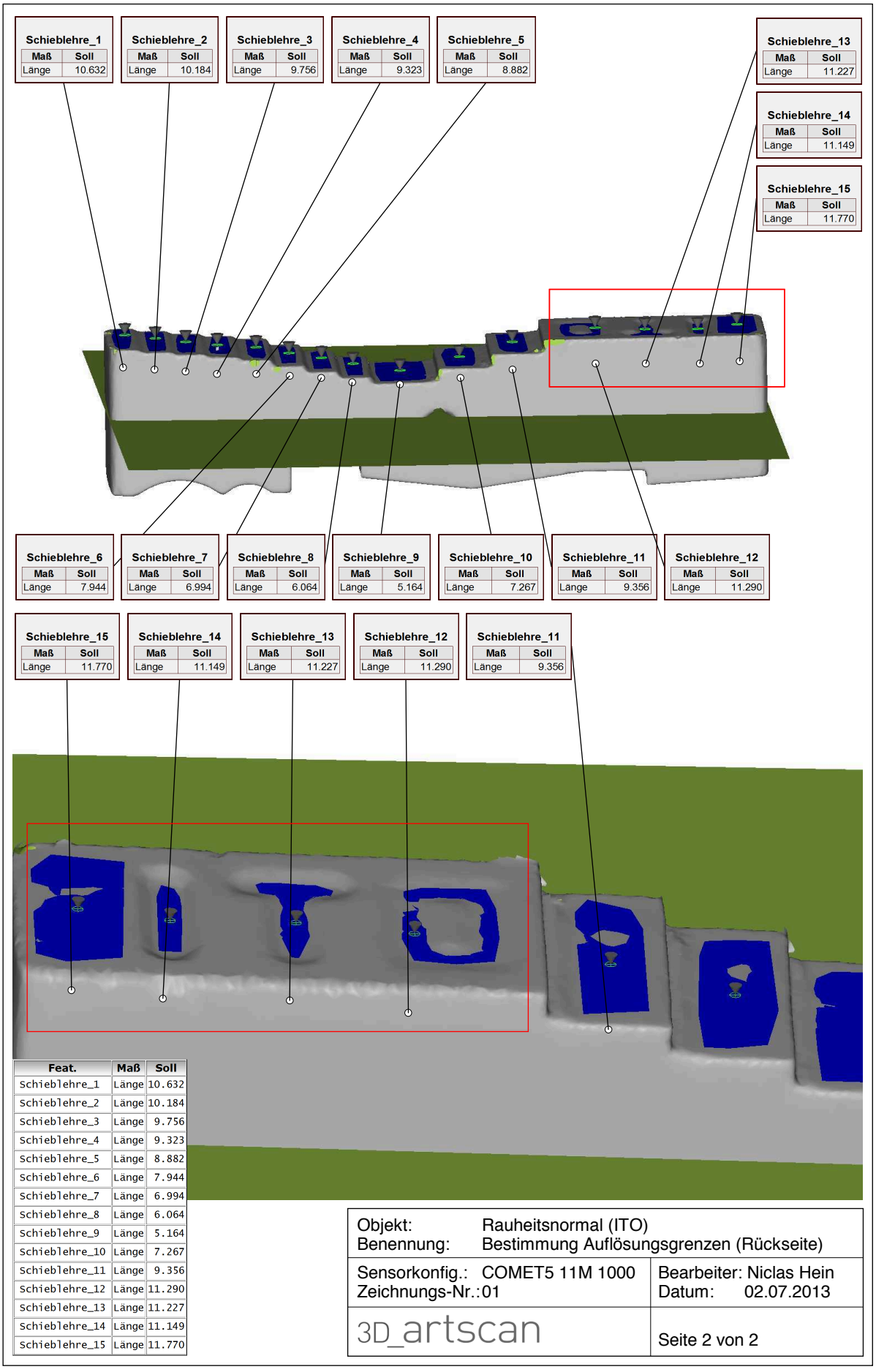


Abb. 283| Wiedergabe der Protokollseite 1 zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 1000' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_1	Länge	10.632
Schieblehre_2	Länge	10.184
Schieblehre_3	Länge	9.756
Schieblehre_4	Länge	9.323
Schieblehre_5	Länge	8.882
Schieblehre_6	Länge	7.944
Schieblehre_7	Länge	6.994
Schieblehre_8	Länge	6.064
Schieblehre_9	Länge	5.164
Schieblehre_10	Länge	7.267
Schieblehre_11	Länge	9.356
Schieblehre_12	Länge	11.290
Schieblehre_13	Länge	11.227
Schieblehre_14	Länge	11.149
Schieblehre_15	Länge	11.770

Objekt: Rauheitsnormal (ITO) Benennung: Bestimmung Auflösungsgrenzen (Rückseite)	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 02.07.2013
3D_artscan	Seite 2 von 2

Abb. 284| Wiedergabe der Protokollseite 2 zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 1000' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite
Die Digitalisierung der Vorderseite des Normals folgt dem oben beschriebenem Muster.

Auswertung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite
Auch die Datenauswertung orientiert sich am oben beschriebenem Ablauf. Allerdings können die feinen Stufen des 3D-Modells nur schwer oder gar nicht voneinander unterschieden werden. Aus sehr schrägem Blickwinkel sind die Kanten im 'Viewer' von 'INSPECTplus' lediglich zu erahnen – eine unzweifelhafte Unterscheidung der Stufen bleibt jedoch aus (►Abb. 285|). Somit wird davon ausgegangen, dass die Auflösungsgrenze für 'COMET 5 11M 1000' unterschritten worden ist. Ungeachtet dessen erfolgt zum möglichen Thesenbeleg die Ebenenbestimmung der Auftrittsflächen und die Quantifizierung ihres Abstandes zur globalen Ausgleichsebene abermals bestmöglich über virtuelle Ausgleichsebenen und Messschieber. Zur Berechnung des Ebenenmissverhältnisses wird das Längenmaß eines Messschiebers einheitlich von dem ihm vorhergehenden subtrahiert (►Tab. 81| und Messprotokoll Abb. 286|). Auch die Radien der zwei Krümmungen des 3D-Modells werden über virtuelle Zylinder bestimmt (►Abb. 286|). Diese werden über eine Auswahl virtueller Bezugspunkte ermittelt (orange dargestellt).

Ergebnis: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite
Die oben bereits angesprochenen Unsicherheiten bei der Bestimmung des Ebenenmissverhältnises spiegeln sich in deutlichen Schwankungen der Längen der Messschieber wieder. So streuen die Daten gemäß ►Tab. 81| mit 0,025 mm um ihren Mittelwert. Sie weisen dabei eine Spannweite von 0,078 mm auf. Im Absoluten liegen die ermittelten Differenzen benachbarter Messschieber allesamt unterhalb des herstellerseitig angegebenen Punktabstandes. Die vorderseitige Treppenstruktur des Konturnormals kann vom Sensor 'COMET 5 11M 1000' nicht souverän aufgelöst werden. So lässt sich weder ein eindeutiger linearer Zusammenhang der Stufenhöhen belegen, noch ein gleichförmiger. Die Treppe wird als undifferenziert strukturierte, schräge Ebene bestimmt. Auffällig ist jedoch, dass 'Schieblehre_08' unter quantitativen Gesichtspunkten signifikant aus dem Gesamtverbund herausfällt. Erklären lässt sich dieser Sachverhalt nicht. So wird konstatiert, dass die Vorderseite des Normals für eine Präzision der Auflösungsgrenze dieses Messvolumens ungeeignet ist. Hier wird auf die folgende, vielversprechende und evaluierende Digitalisierung des Normals mit der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' verwiesen.

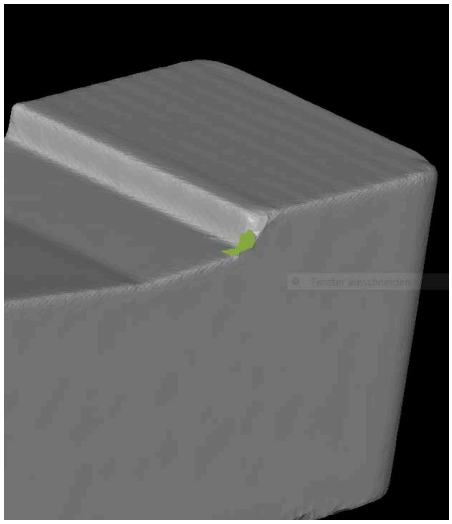


Abb. 285| Die in Abbildung 287 sichtbaren Strukturen auf der Vorderseite des Normals sind nach der Digitalisierung im virtuellen Modell kaum zu erkennen. Aus der abgebildeten Schrägsicht ist eine Unterscheidung der Strukturen im Zuge einer Schätzung möglich. Eine unzweifelhafte Positionierung der Ausgleichsebenen ist jedoch nicht möglich.
Quelle: Selbst

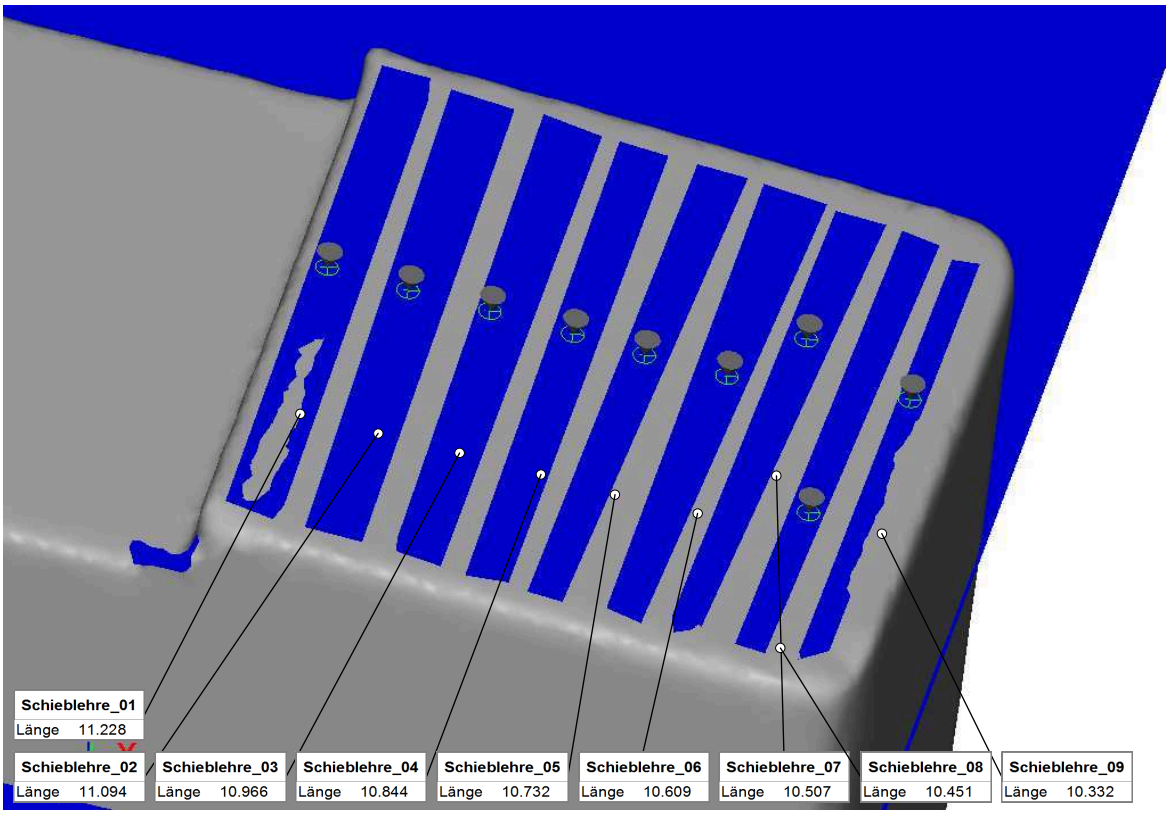
	Länge (mm)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch vorhergehenden Messschieber)	Radius (mm)	Zylindrizität (mm)
Zylinder_01			9,955	0,011
Zylinder_02			3,760	1,047
Schieblehre_01	11,228	0,000		
Schieblehre_02	11,094	0,134		
Schieblehre_03	10,966	0,128		
Schieblehre_04	10,844	0,122		
Schieblehre_05	10,732	0,112		
Schieblehre_06	10,609	0,123		
Schieblehre_07	10,507	0,102		
Schieblehre_08	10,451	0,056		
Schieblehre_09	10,332	0,119		
Standardabweichung		0,025		
Spannweite		0,078		

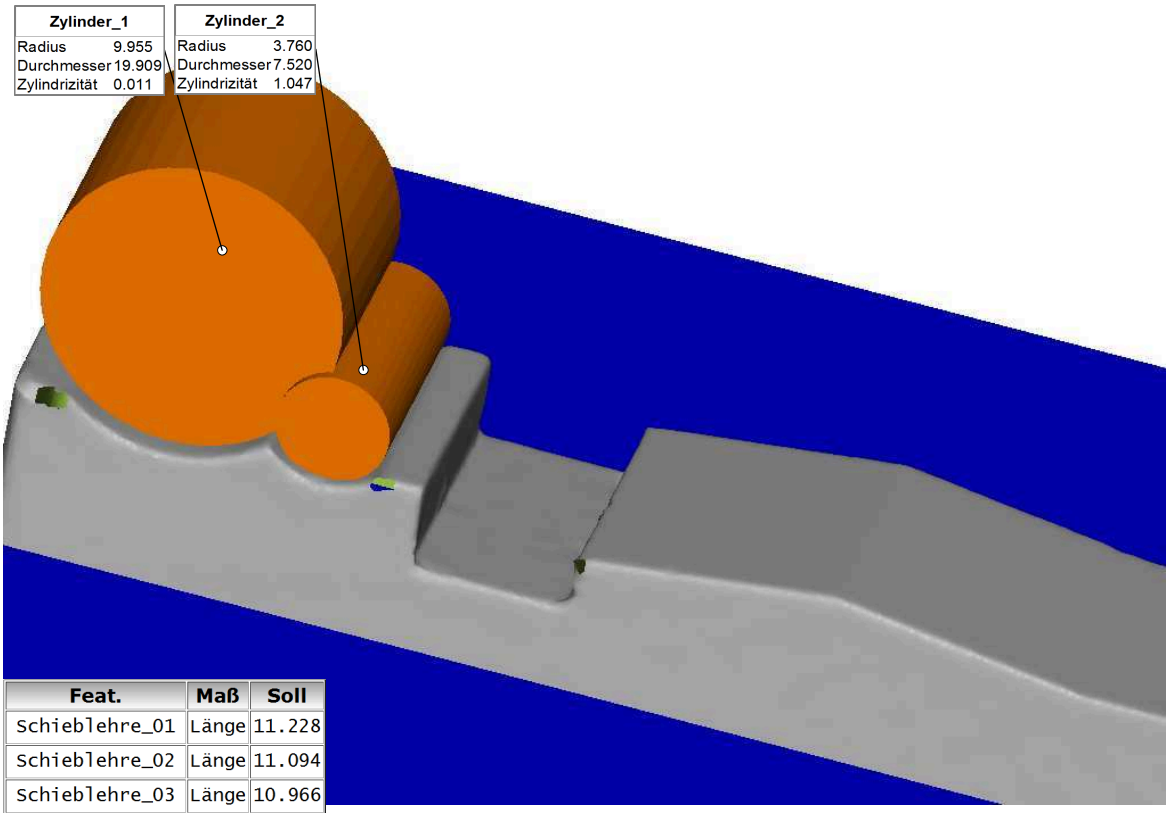
Tab. 81| Ermittelte Länge der Abstufungen der strukturierten Oberfläche des Konturnormals, sowie Angaben zu den erstellten virtuellen Zylindern. Die Angaben beziehen sich auf die Vorderseite wie in ►Abb. 278| kenntlich.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter	
Objekt	Rauheitsnormal (ITO)
Benennung	Bestimmung Auflösungsgrenzen (Vorderseite)
Datum	03.07.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	10/diverse
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	diverse
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	240
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	18.664
	Anzahl Dreiecke	37.007
	Oberfläche (mm^2)	8.780.757

Tab. 82| Metadaten zu 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite.
Quelle: Selbst





Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	11.228
Schieblehre_02	Länge	11.094
Schieblehre_03	Länge	10.966
Schieblehre_04	Länge	10.844
Schieblehre_05	Länge	10.732
Schieblehre_06	Länge	10.609
Schieblehre_07	Länge	10.507
Schieblehre_08	Länge	10.451
Schieblehre_09	Länge	10.332

Objekt: Rauheitsnormal (ITO) Benennung: Bestimmung Auflösungsgrenzen (Vorderseite)	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.: 02	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 03.07.2013
3D_artscan	Seite 1 von 1

Abb. 286| Messprotokoll zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 1000' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite.
Quelle: Selbst

29.11 Einordnung der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 80'

Die Bestimmung der Auflösungsgrenze der hochauflösenden Sensorvariante folgt dem selben Schema, wie es zuvor für das 1000'er Messvolumen geschildert wurde – der Untersuchungsgegenstand bleibt der selbe. Zugleich sollen die Ergebnisse des vorherigen Versuches auf ihre Verifizierbarkeit hin überprüft werden. Aufgrund der sehr viel höheren Auflösung wird davon ausgegangen, dass die Strukturen auf beiden Seiten von 'Rauheitsnormal (ITO)') vollständig erfasst werden können.

Datenerhebung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

Die Digitalisierung der Rückseite des Normals folgt dem oben beschriebenem Muster.

Auswertung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

Auch die Auswertungsstrategie folgt der oben beschriebenen Vorgehensweise, was auch für die Gruppierung der Ebenen, bzw. der Bezüge ihrer zugehörigen Messschieber, gilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle ►Tab. 84| zusammengestellt.

Ergebnis: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite

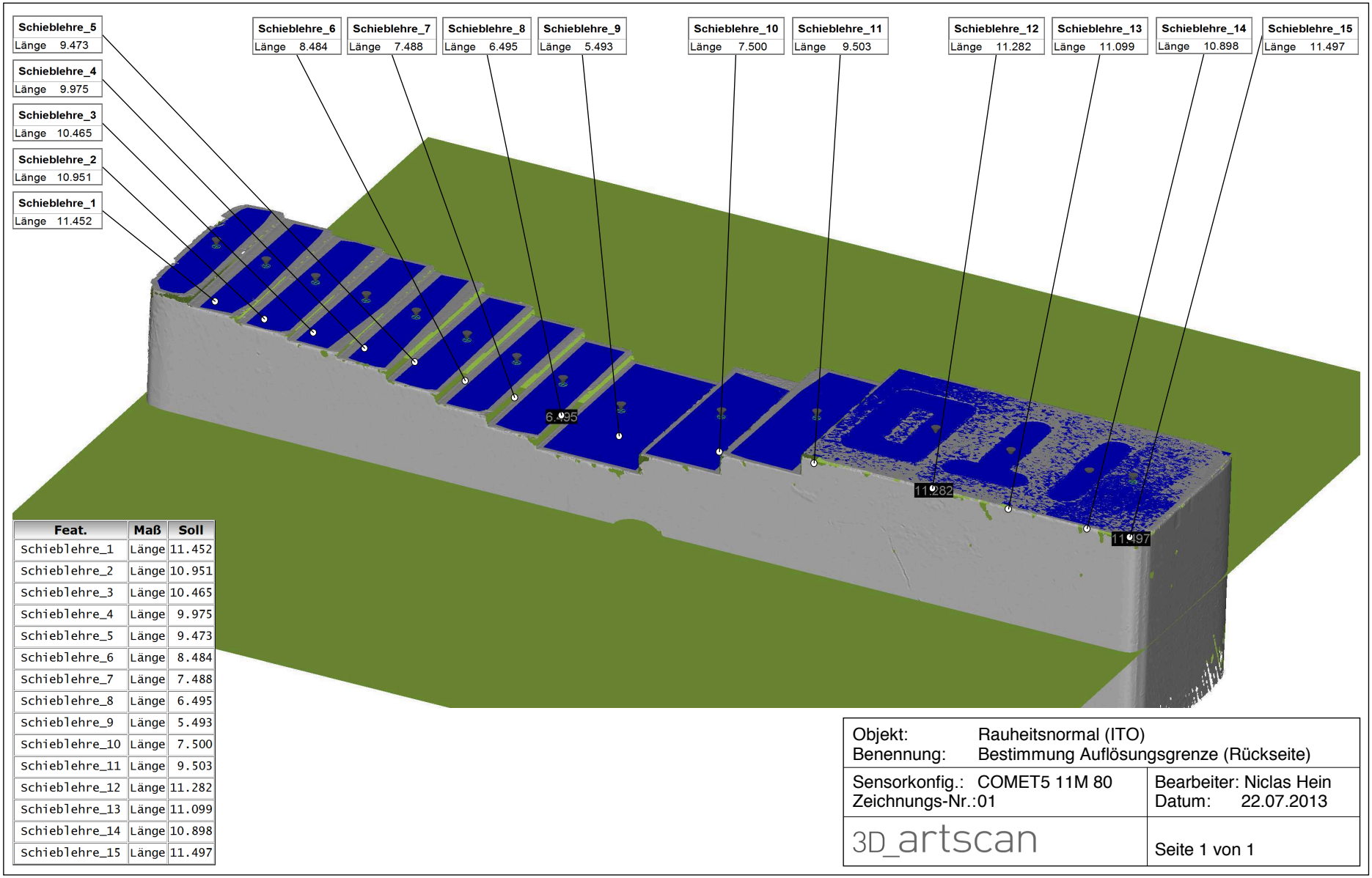
Die Daten bestätigten das erwartete Ergebnis: mit der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' können sämtliche Treppenstufen der Rückseite des Normals aufgelöst werden (►Abb. 287|). Dabei kann das kleinste Ebenenmissverhältnis über die Differenz von 'Schieblehre_12' und 'Schieblehre_15' mit 0,215 mm quantifiziert werden. Dieses entspricht dem Bereich des gefrästen Schriftzuges (Buchstabe 'O') im Verhältnis zum ihn umgebenden Ebenenplateau.[729] Darüber hinaus belegen die Ergebnisse, dass sich die Stufen analog gleichförmiger Abstufungen gruppieren lassen. Die erste Gruppe umfasst 'Schieblehre_01' bis einschließlich 'Schieblehre_05', die aufgrund der Standardabweichung von 0,008 mm allesamt nur geringfügig um ihren Mittelwert streuen. Die Spannweite beträgt hier 0,016 mm. Die zweite Gruppe umfasst 'Schieblehre_06' bis einschließlich 'Schieblehre_09' mit einer Standardabweichung von 0,005 mm und einer Spannweite von 0,013 mm. Die dritte und letzte Gruppe ergibt sich aus den Längen von 'Schieblehre_09' bis einschließlich 'Schieblehre_11', die sich wiederum durch eine Standardabweichung von 0,007 mm und einer Spannweite von 0,013 mm kennzeichnen. Die verbleibenden Ebenenmissverhältnisse von 'Schieblehre_12' bis 'Schieblehre_15' ergeben sich wiederum durch eine gleichmäßige Zunahme des Ebenenmissverhältnis von ca. 0,2 mm bei einer Standardabweichung von 0,192 mm.

729 Wie dieses in einer folgenden Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Sensorkonfiguration gezeigt werden wird bestehen damit Diskrepanzen (►Tab. 88|).

Metadaten und Messparameter	
Objekt	Rauheitsnormal (ITO)
Benennung	Bestimmung Auflösungsgrenzen (Rückseite)
Datum	22.07.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	10/diverse
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	diverse
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	635
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	k. A.
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 83| Metadaten zu 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_1	Länge	11.452
Schieblehre_2	Länge	10.951
Schieblehre_3	Länge	10.465
Schieblehre_4	Länge	9.975
Schieblehre_5	Länge	9.473
Schieblehre_6	Länge	8.484
Schieblehre_7	Länge	7.488
Schieblehre_8	Länge	6.495
Schieblehre_9	Länge	5.493
Schieblehre_10	Länge	7.500
Schieblehre_11	Länge	9.503
Schieblehre_12	Länge	11.282
Schieblehre_13	Länge	11.099
Schieblehre_14	Länge	10.898
Schieblehre_15	Länge	11.497

Objekt: Rauheitsnormal (ITO) Benennung: Bestimmung Auflösungsgrenze (Rückseite)	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.:01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 22.07.2013
3D_artscan	Seite 1 von 1

Abb. 287| Messprotokoll zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 80' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite.
Quelle: Selbst

	Länge (mm)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch vorhergehenden Messschieber)		Ebenenmissverhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch nachfolgenden Messschieber, wobei 'Schieblehre_11' konstruktionsbedingt auf 'Schieblehre_15' referenziert)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf 'Schieblehre_15')
Schieblehre_01	11,452	0,000			
Schieblehre_02	10,951	0,501			
Schieblehre_03	10,465	0,486			
Schieblehre_04	9,975	0,490			
Schieblehre_05	9,473	0,502			
Schieblehre_06	8,484		0,989		
Schieblehre_07	7,488		0,996		
Schieblehre_08	6,495		0,993		
Schieblehre_09	5,493		1,002	2,007	
Schieblehre_10	7,500			2,003	
Schieblehre_11	9,503			1,994	
Schieblehre_12	11,282				0,215
Schieblehre_13	11,099				0,398
Schieblehre_14	10,898				0,599
Schieblehre_15	11,497				0,000
Standardabweichung		0,008	0,005	0,007	0,192
Spannweite		0,016	0,013	0,013	0,384

Tab. 84| Die ermittelte Länge der Abstufungen der strukturierten Oberfläche des Konturnormals. Die Angaben beziehen sich auf dessen Rückseite, wie in ►Abb. 279| kenntlich.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite

Da die Struktur der Vorderseite durch das große Messvolumen bisher nicht aufgelöst werden konnte, erfolgt die Digitalisierung mit der hochauflösenden Sensorvariante.

Auswertung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite

Die Auswertung entspricht der bisherigen Vorgehensweise. Die Ergebnisse sind in einer Tabelle zusammengefasst, dessen Grundlage wie üblich ein Protokoll ist (►Tab. 85| und Abb. 288|).

Ergebnis: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite

Die Oberflächenstruktur der Vorderseite des Normals kann mit dieser Sensorkonfiguration ohne Einschränkung aufgelöst werden. Das kleinste Ebenenmissverhältnis wird mit 0,096 mm quantifiziert. Dabei beträgt die Standardabweichung 0,009 mm und die Spannweite 0,032 mm. Ferner ergeben sich zwei wesentliche Aussagen dieses Versuches. Einerseits lässt die geringe Standardabweichung den Rückschluss zu, dass die Treppenstruktur verhältnismäßig gleichförmig ist. Andererseits ist das Konturnormal für die Bestimmung der Auflösungsgrenze des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 80' ungeeignet, da es zu grob untergliedert ist. Zur iterativen Eingrenzung soll daher ein Konturnormal mit Strukturen kleiner 0,096 mm verwendet werden. Außerdem ergibt die hiesige Versuchsreihe Hinweise auf eine weitere Eingrenzung der unteren Auflösungsgrenze in Form einer lokalen Beschädigung des Untersuchungsgegenstandes. So findet sich an einer Ecke des Normals ein Fehler in der Lackierung. Nach visuellen Kriterien kann dieser am 3D-Modell eindeutig identifiziert werden. Dennoch scheint diese Imperfektion kleiner zu sein als die bisher bestimmten Ebenenmissverhältnisse. Zur weiteren Präzision wird somit in einer folgenden Versuchsreihe eine Quantifizierung der Schadenstruktur vorgenommen.

	Länge (mm)	Ebenenmiss-verhältnis (mm) (bezogen auf den numerisch vorhergehenden Messschieber)	Radius (mm)	Zylindrizität (mm)
Zylinder_01			9,956	0,013
Zylinder_02			4,977	0,012
Schieblehre_01	11,374	0,000		
Schieblehre_02	11,246	0,128		
Schieblehre_03	11,140	0,106		
Schieblehre_04	11,036	0,104		
Schieblehre_05	10,929	0,107		
Schieblehre_06	10,833	0,096		
Schieblehre_07	10,733	0,100		
Schieblehre_08	10,628	0,105		
Schieblehre_09	10,521	0,107		
Standardabweichung		0,009		
Spannweite		0,032		

Tab. 85| Ermittelte Länge der Abstufungen der strukturierten Oberfläche des Konturnormals, sowie die Angaben der erstellten Zylindern.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter

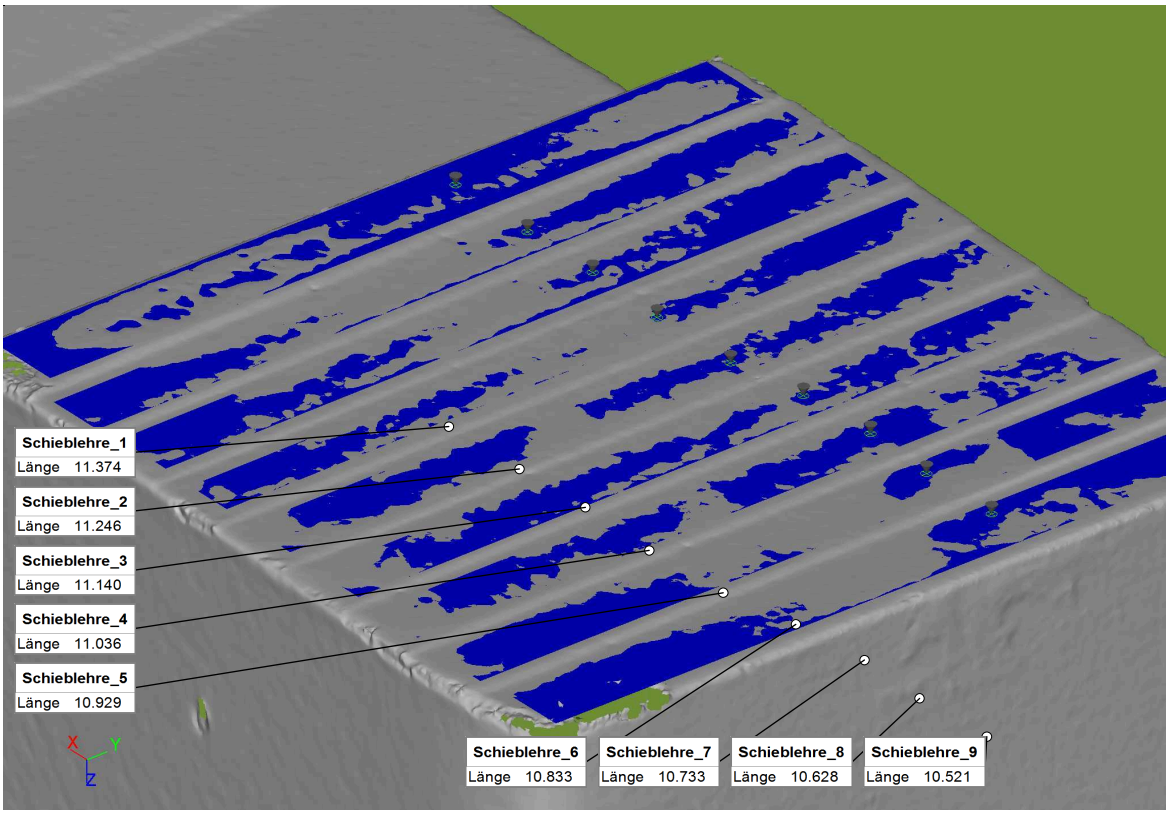
Objekt	Rauheitsnormal (ITO)
Benennung	Bestimmung Auflösungsgrenzen (Vorderseite)
Datum	21□□□□□□
Sensorkonfig.	OMET □11M 80

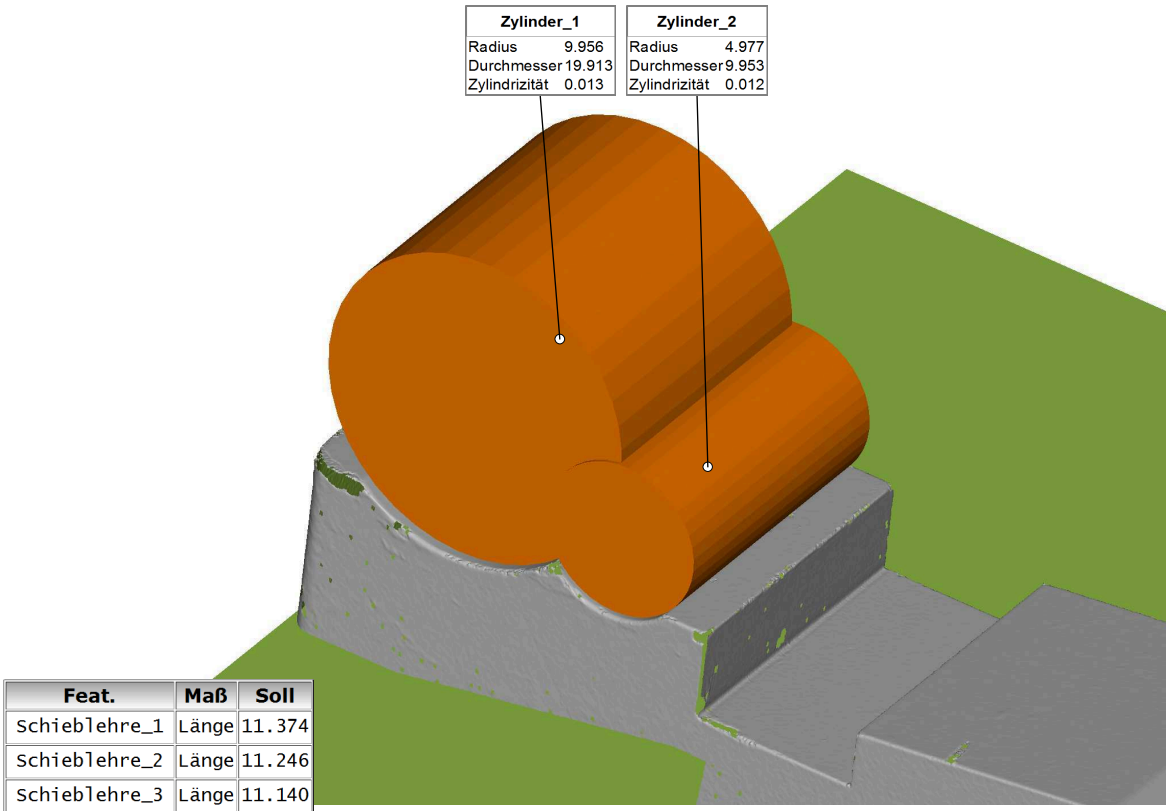
Anzahl Messungen	10diverse
Matchingstrategie	□eies l.m.
Mess□nkel	diverse

unkt□olke	
Belichtungseinstellungen	
Messbild	6□□
Belichtungsfusion	Aus
1. Messbild	□
2. Messbild	□
□Messbild	□
□amerakonfiguration	□Res
NS-Mode	off
E□perteneinstellungen	
□ualit□t	□ghuality
Streifen□ualit□t	10
□radient □	0,00
□radient Y	0,00

Dreiecksnetz	
Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
Zul□ssige Toleranz f□die Voraus□nung (mm)	0,0018
Zul□ssige Toleranz f□die Rauschreduzierung (mm)	0,00□□
Zul□ssige Toleranz f□die Aus□nung (mm)	18□□
Ma□□atenl□nge der Dreiecke (mm)	0,0800
Anzahl □otenpunkte	k. A.
Anzahl Dreiecke	k. A.
Oberfl□e (mm²)	k. A.

Tab. 86| Metadaten zu 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite.
Quelle: Selbst





Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_1	Länge	11.374
Schieblehre_2	Länge	11.246
Schieblehre_3	Länge	11.140
Schieblehre_4	Länge	11.036
Schieblehre_5	Länge	10.929
Schieblehre_6	Länge	10.833
Schieblehre_7	Länge	10.733
Schieblehre_8	Länge	10.628
Schieblehre_9	Länge	10.521

Objekt: Rauheitsnormal (ITO) Benennung: Bestimmung Auflösungsgrenze (Vorderseite)	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 02	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 23.08.2013
3D_artscan	Seite 1 von 1

Abb. 288| Messprotokoll zur Bestimmung der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 80' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Lackfehler

Auf den letzten Versuch rekurrierend soll die Auflösungsgrenze des Sensor 'COMET 5 11M 80' am Untersuchungsgegenstand 'Rauheitsnormal (ITO)' anhand eines Lackschadens weiter eingegrenzt werden (►Abb. 289|). Dem Grundsatz nach folgt die Datenerhebung hierzu dem bisherigen Schema. Anhand des 3D-Modells können bei starker Vergrößerung an weiteren Stellen Fehler in der Lackierung ausgemacht werden (►Abb. 290| - Abb. 294|).

Auswertung: 'Rauheitsnormal (ITO)', Lackfehler

Dem bisherigen Muster entsprechend, werden die Ebenenmissverhältnisse zwischen den Vertiefungen und der unbeschädigten Lackoberfläche ermittelt. Die quantitative Bestimmung des Niveauunterschiedes erfolgt über virtuelle Messschieber: Der Anfangspunkt in der Vertiefung ist repräsentativ für die Metalloberfläche, der Endpunkt auf einer Ausgleichsebene ist stellvertretend für die Lackoberfläche (►Abb. 291|). Bei der Überprüfung der Messschieber im 'Viewer' wird die Fehleranfälligkeit dieser Auswertungs- und Messstrategie offenkundig. So ist die Ausrichtung der Messschieber zwischen der Oberfläche des 3D-Modell und der Ausgleichsebene zwangsläufig nicht immer repräsentativ für die kürzeste Verbindung. Sie verlaufen teilweise schräg, was zu Messfehlern führt (►Abb. 292|). Eine optische Kontrolle im 'Viewer' ist daher geboten. Gegebenenfalls ist die Positionierung des Messschiebers zu wiederholen. Eine weitere Messunsicherheit ergibt sich aus der Subjektivität bei der Positionierung des Anfangspunktes des Messschiebers im Artefakt. So ist die tiefste Stelle nicht zweifelsfrei zu bestimmen, da die Darstellungs- und Beleuchtungsgeometrie verfälschend wirken kann. Hilfreich ist hier die kombinierte Darstellung des 3D-Modells mit eingeblendetem Dreiecksnetz (►Abb. 293| und Abb. 294|). Für die Auswertung sind die Längen der Messschieber in einer Tabelle des Protokolls zusammengefasst (►Tabelle im Messprotokoll, und Abb. 295|).

Ergebnis: 'Rauheitsnormal (ITO)', Lackfehler

Die Ebenenmissverhältnisse, die sich aus der fehlerhaften Lackierung ergeben, können im Minimum mit 0,006 mm und im Maximum mit 0,024 mm quantifiziert werden. Hier besteht eine Spannweite von 0,018 mm. Zugleich ergibt sich ein Hinweis auf den bereits eingangs angeführten Unterschied zwischen der Auflösung und dem Punktabstand (►Abb. 85| und Abb. 309|). So ist die, in diesem Versuch ermittelte, Geringfügigkeitsgrenze um den Faktor sechs kleiner als der vom Hersteller angegebene Punktabstand für das verwendete 80er Messvolumen. Die generelle Nachweisführung von Strukturunterschieden in diesem Bereich kann sich daraus begründen, dass das 3D-Modell aus mehreren Einzelaufnahmen besteht, wodurch sich Messpunkte positiv überlagern können. Bei günstigen Parametern der Datennachverarbeitung ist es denkbar, dass die Messpunkte nach der Triangulation lokal betrachtet näher beieinander liegen als dieses bei einer Einzelaufnahme technisch möglich ist.[730] Außerdem wurde

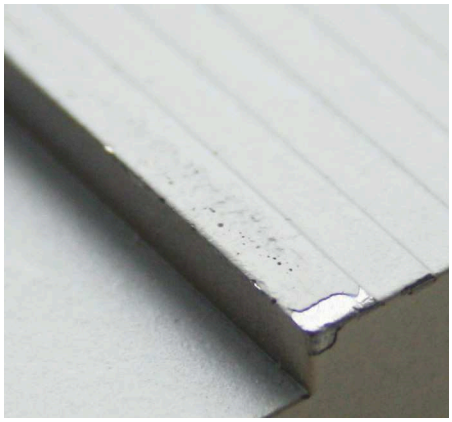


Abb. 289| Foto der Unebenheiten der Oberfläche des Konturnormals welche von einer fehlerhaften Lackierung herrühren.
Quelle: Selbst

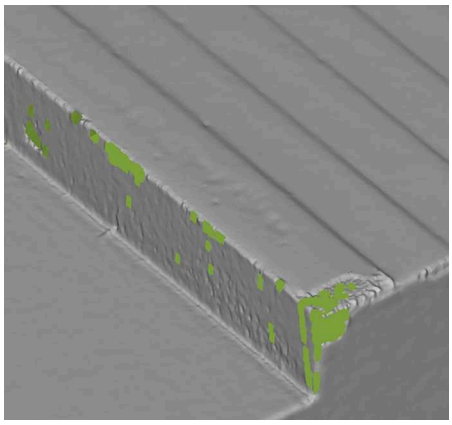


Abb. 290| Die oben beschriebenen Unebenheiten sind auch bei dem virtuellen Modell des Konturnormals deutlich sichtbar. Hier zum Vergleich der selbe Bildausschnitt wie in der vorhergehenden Abbildung.
Quelle: Selbst

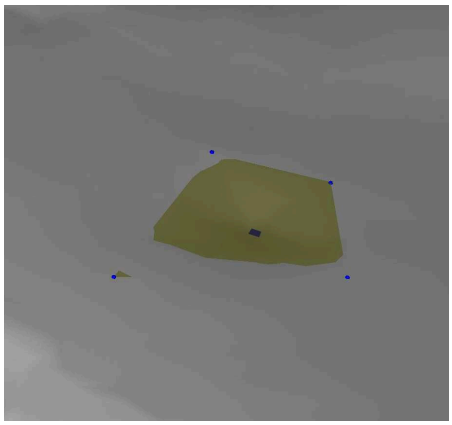


Abb. 291| Die kleine Ausgleichsebene zur näherungsweisen Wiedergabe des Scheitelpunktes der Vertiefung ist blau gekennzeichnet. Darüber befindet sich, semi-transparent, die von den blauen Kugeln aufgespannte Bezugsebene. Letztere liegt auf den Rändern der Vertiefung auf.
Quelle: Selbst

730 Vergleiche: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 (►Abb. 330| - Abb. 331|)

mit der bisher geschilderten Messstrategie nur indirekt die Grenze angegeben bis zu der eine Strukturauflösung möglich ist. Genau genommen quantifizieren die Messschieber lediglich den Niveauunterschied zwischen dem 3D-Modell und einer zugehörigen virtuellen Ausgleichsebene. Keinesfalls darf dieses daher als eine die Leistungsfähigkeit des Messsystems direkt definierende Geringfügigkeitsgrenze verstanden werden. Für die weiter gehende Bestimmung des Auflösungsbereiches ist ein fein strukturiertes und zugleich scharf konturiertes Normal erforderlich – die Form einer Treppe ist hierfür ideal geeignet.

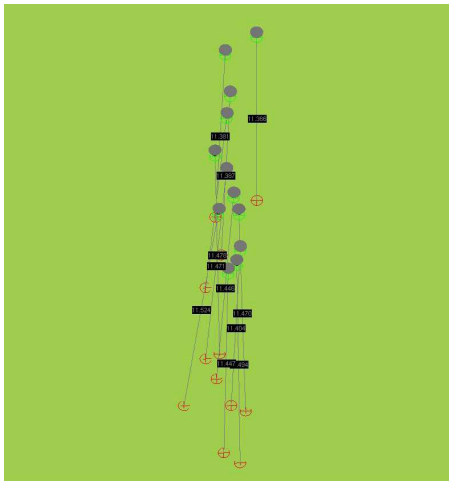


Abb. 292| Bei dieser Abbildung ist das virtuelle Modell ausgeblendet, sodass die schrägverlaufenden Messschieber augenscheinlich werden. Daraus resultieren die erörterten Messfehler.
Quelle: Selbst

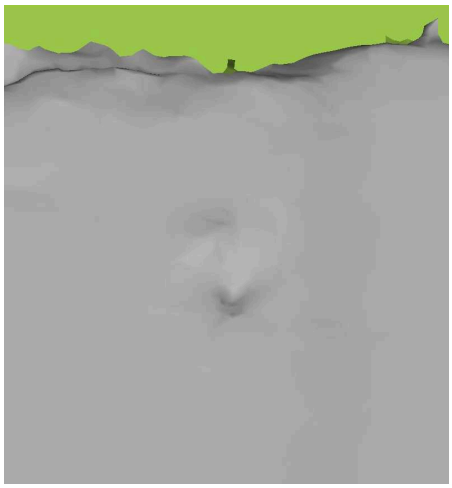


Abb. 293| Ansicht der Oberfläche des 3D-Modells im Modus 'Schattiert'. Der tiefste Punkt im Bereich des Lackfehlers ist in dieser Darstellung nur schwer zu identifizieren.
Quelle: Selbst

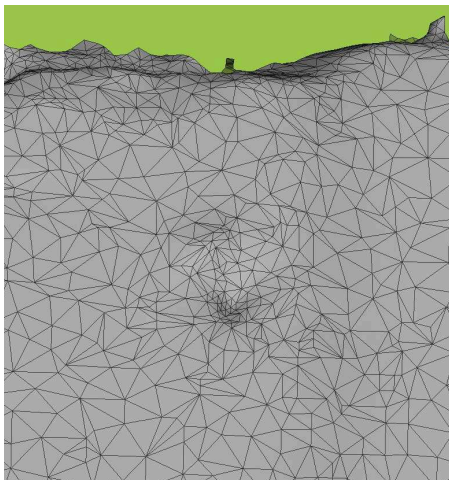
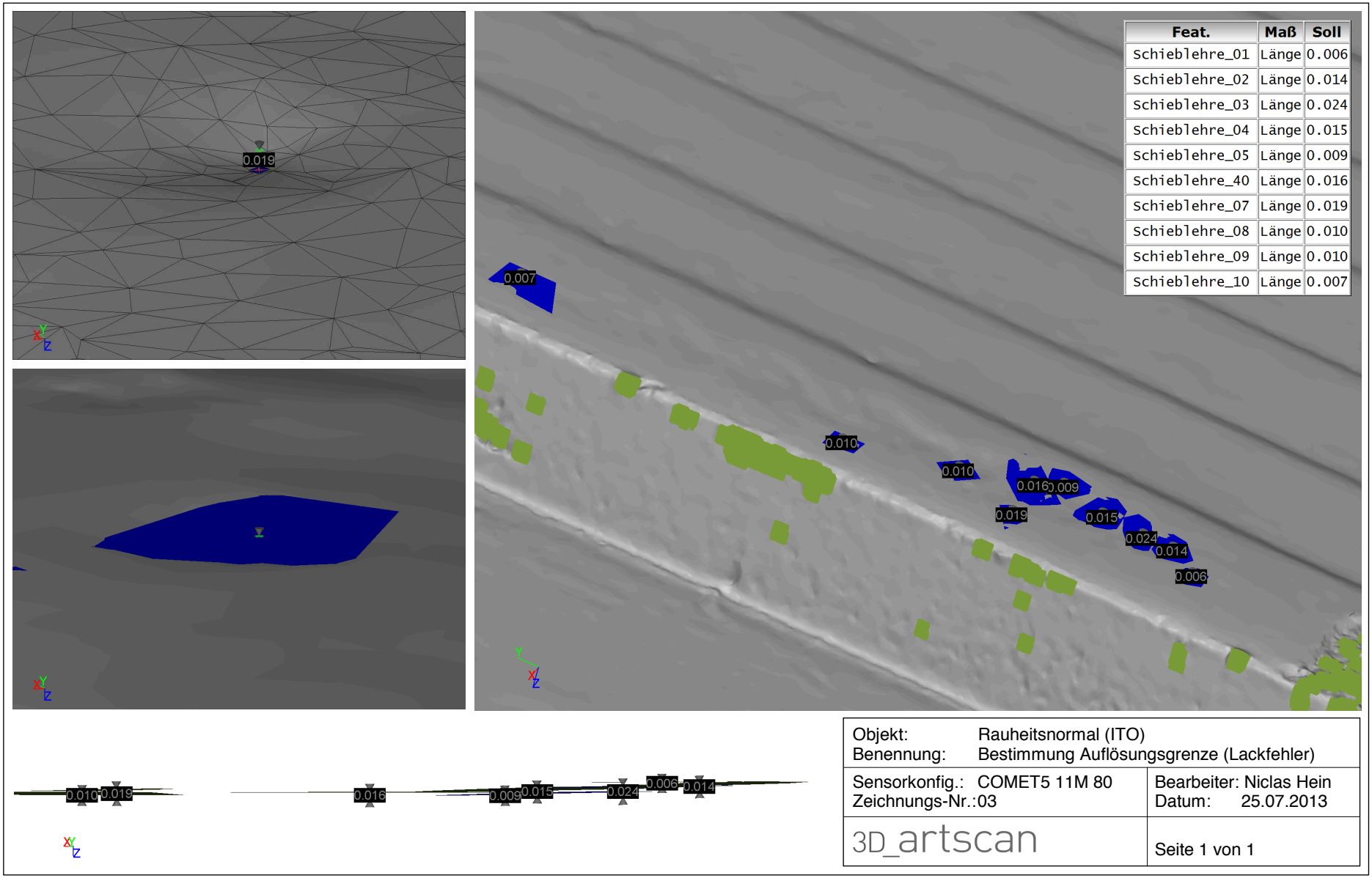


Abb. 294| Ansicht des selben Bildausschnitts wie in der obigen Abbildung, jedoch mit zusätzlich eingeblendeten Dreieckskanten. Der Scheitelpunkt der Vertiefung ist bei dieser Darstellungsform leichter auszumachen.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter	
Objekt	Rauheitsnormal (ITO)
Benennung	Bestimmung Auflösungsgrenzen (Vorderseite)
Datum	25.07.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 0

	Anzahl Messungen	1000
	Matchingstrategie	reies l.m.
	Mess nkel	diverse
Punkt olke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	635
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQualit
	Streifenqualität	10
	Gradient X	7000
	Gradient	7000
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz f die Vorausdnnung (mm)	0001
	Zulässige Toleranz f die Rauschreduzierung (mm)	00036
	Zulässige Toleranz f die Ausdnnung (mm)	0001
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0000
	Anzahl Knotenpunkte	k. A.
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 87| Metadaten zu 'Rauheitsnormal (ITO)', Lackfehler.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	0.006
Schieblehre_02	Länge	0.014
Schieblehre_03	Länge	0.024
Schieblehre_04	Länge	0.015
Schieblehre_05	Länge	0.009
Schieblehre_40	Länge	0.016
Schieblehre_07	Länge	0.019
Schieblehre_08	Länge	0.010
Schieblehre_09	Länge	0.010
Schieblehre_10	Länge	0.007

Objekt:	Rauheitsnormal (ITO)		
Benennung:	Bestimmung Auflösungsgrenze (Lackfehler)		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	03	Datum:	25.07.2013
3D_artscan		Seite 1 von 1	

Abb. 295| Messprotokoll zur weiteren Präzision der Auflösungsgrenzen des Sensors in der Konfiguration 'COMET 5 11M 80' – Objekt: 'Rauheitsnormal (ITO)', Lackfehler.
Quelle: Selbst

29.12 Evaluation und Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Sensorkonfiguration: 'Rauheitsnormal (IT0)'

Aus der ersten Versuchsreihe zur Eingrenzung der Auflösung können Erkenntnisse über die Systemeigenschaften und die Leistungsfähigkeit der beiden getesteten Sensorkonfigurationen abgeleitet werden. Durch eine direkte Gegenüberstellung soll hierzu eine quantitative Auswertung vorgenommen werden. Gleichwohl offenbaren die örtlich korrespondierenden Messschieber, die aus der Digitalisierung von 'COMET 5 11M 1000' hervorgegangen sind,[731] im Vergleich zu den Ergebnissen von 'COMET 5 11M 80' bereits auf den ersten Blick signifikante Längenunterschiede.[732] Die Begründung ergibt sich aus den voneinander abweichenden Lagen der Ausgleichsebenen in den 3D-Modellen, auf die wiederum die Messschieber referenzieren. Daher kann die Evaluation der Reproduzierbarkeit nur über die ermittelten Ebenenmissverhältnisse an sich gelingen, was in der folgenden Auswertung berücksichtigt wird.

Vergleich der Messergebnisse der beiden Sensorkonfigurationen: 'Rauheitsnormal (IT0)', Rückseite

In Bezug auf die Rückseite des Normals und der direkten Gegenüberstellung der ermittelten Ebenenmissverhältnisse je Sensorkonfiguration offenbaren sich Differenzen, die global mit einer Standardabweichung von 0,108 mm quantifiziert werden können (►Tab. 88|). Sie weisen dabei eine Spannweite von 0,398 mm auf. Ferner ist die Verortung des geringsten Ebenenmissverhältnisses des Konturnormals widersprüchlich.[733] Rein subjektiv bestätigt der visuelle Sinneseindruck das Ergebnis der hochauflösenden Messung. So besteht zwischen der Sohle des gefrästen Schriftzuges 'O' und das ihn umgebenden Plateau das geringste Ebenenmissverhältnis. Die diskrepanten Ergebnisse regen eine Fehlersuche an. Hierorts ist auf eine Fehlerquelle hinzuweisen, die sich aus der Positionierung der Messschieber ergibt. Wenn zur Bestimmung des Abstandes von der Bezugsebene einer Treppenstufe zur globalen Ausgleichsebene lediglich ein Messschieber verwendet wird, können etwaige windschiefe Ausrichtungen der Ebenen zueinander nicht ermittelt werden. Unter Umständen sind fehlerhafte Ergebnisse die Folge.[734] Darüber hinaus setzt eine repräsentative Ebenenposition im dreidimensionalen Raum grundsätzlich drei Messschieber voraus. Genau genommen wurden bisher nur einzelne Punkte der Ebenen eingemessen. Aus Gründen der Selbstreferenzierung und zum Ausschluss einer Fehlerquelle wird im weiteren Verlauf der Experimente eine differenzierte

731 Zusammengefasst in ►Tabelle 81 (Rückseite des Normal), bzw. ►Tabelle 83 (Vorderseite des Normal).

732 Zusammengefasst in ►Tabelle 85 (Rückseite des Normal), bzw. ►Tabelle 87 (Vorderseite des Normal).

733 Die Minimalwerte sind in ►Tabelle 89 hervorgehoben (‚COMET 5 11M 1000': 0,428 mm; ‚COMET 5 11M 80': 0,215 mm).

734 Ursächlich für eine windschiefe Ausrichtung können Unebenheiten in der Oberfläche des 3D-Modells sein. Beim Positionieren der virtuellen Bezugspunkte, aus denen letztlich die Ebenen berechnet werden, können Fehler entstehen. Die Berechnung der Ebenenlage ergibt sich aus dem Mittelwert der zuvor selektierten Oberflächenpunkte.

Auswertungsstrategie angewandt. Die Quantifizierung der Ebenenmissverhältnisse erfolgt ab diesem Zeitpunkt über mindestens drei virtuelle Messschieber.

Bestimmung Ebenenmissverhältnisse gemäß Messschieber	Ebenenmissverhältnisse je Sensorkonfiguration (mm)		Abweichungen der Ergebnissen zwischen den Sensorkonfiguration (mm)
	'COMET 5 11M 1000'	'COMET 5 11M 80'	
Schieblehre_01 – Schieblehre_02	0,448	0,501	0,053
Schieblehre_02 – Schieblehre_03	**0,428**	0,486	0,058
Schieblehre_03 – Schieblehre_04	0,433	0,490	0,057
Schieblehre_04 – Schieblehre_05	0,441	0,502	0,061
Schieblehre_05 – Schieblehre_06	0,938	0,989	0,051
Schieblehre_06 – Schieblehre_07	0,950	0,996	0,046
Schieblehre_07 – Schieblehre_08	0,930	0,993	0,063
Schieblehre_08 – Schieblehre_09	0,900	1,002	0,102
Schieblehre_10 – Schieblehre_09	2,103	2,007	0,096
Schieblehre_11 – Schieblehre_10	2,089	2,003	0,086
Schieblehre_15 – Schieblehre_11	2,414	1,994	0,420
Schieblehre_15 – Schieblehre_12	0,480	**0,215**	0,265
Schieblehre_15 – Schieblehre_13	0,543	0,398	0,145
Schieblehre_15 – Schieblehre_14	0,621	0,599	0,022
		Standardabweichung	0,108
		Spannweite	0,398

Tab. 88| Gegenüberstellung der Ergebnisse zur Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse beider Sensorkonfiguration am Untersuchungsgegenstand ‚Rauheitsnormal (ITO)', Rückseite.
Quelle: Selbst

Vergleich der Messergebnisse der beiden Sensorkonfigurationen: 'Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite

In Bezug auf die Vorderseite des Konturnormals ist der Vergleich der Ergebnisse beider Sensorkonfigurationen nur eingeschränkt möglich. Wie oben angefügt, befindet sich die Treppenstruktur bereits unterhalb der Auflösungsgrenze von 'COMET 5 11M 10000'. Ein Vergleich beschränkt sich dort alleinig auf die ermittelten Eigenschaften der virtuellen Zylinder (►Tab. 89|, Messung 1). Auch hier ist ein ambivalentes Ergebnis festzuhalten. 'Zylinder_01' kann mit beiden Sensorkonfigurationen eindeutig verifiziert werden. Die radiale Abweichung beträgt 0,001 mm und die geringe Zylindrizitätsabweichung wird mit 0,002 mm quantifiziert. Demgegenüber sind die Abweichung von 'Zylinder_02' unverhältnismäßig groß: Radiale Abweichung: 1,217 mm, Zylindrizitätsabweichung 1,035 mm. Dieses deutet auf Fehler bei der Auswertung hin. Voraussetzung dieser These ist, dass die Krümmung des Realobjektes einer perfekten Zylinderform entspricht. Von einer solchen wird jedoch fertigungsbedingt ausgegangen.[735] Zum Thesenbeleg erfolgt in einem Nebenversuch eine wiederholte Bestimmung von 'Zylinder_02' in 'INSPECTplus' (►Tab. 89|, Messung 2). In der Tat kann auf diese Weise eine signifikante Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Dieses bezieht sich auf das Digitalisat von 'COMET 5 11M 10000', wo der Radius dieses Mal mit 4,838 mm bestimmt wird und die Zylindrizität mit 0,045 mm. Dieses lässt zwei Rückschlüsse zu: Zum einen gelten die Zylinderformen des Normals grundsätzlich als verifiziert. Zum ande-

735 Die Ergebnisse der Bestimmung von ‚Zylinder_01' deuten mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Herstellung der Rundung mit einem 20 mm Fräskopf hin. Unter der vorgebrachten Annahme verringert die aufgetragene Lackschicht den Radius der Form entsprechend.

ren wird die Fehlerursache einem Anwendungs- bzw. Auswertungsfehler zugeordnet. Für die Bestimmung der Zylinderform wurden auf dem 3D-Modell zu wenige die Oberfläche repräsentierende virtuelle Referenzpunkte gesetzt. Am geschilderten Fall, aber auch anhand der obigen Ausführung, wird das Fehlerpotenzial der Datenerhebung und Auswertungsstrategie deutlich. Eine kritische Haltung gegenüber der eigenen Arbeitsweise sowie gegenüber den Messdaten ist geboten.

Gegenüberstellung der Ergebnisse zur Bestimmung der Zylinder mit beiden Sensorkonfiguration					
Messung		Radius (mm)		Zylindrizität (mm)	
		Zylinder_01	Zylinder_02	Zylinder_01	Zylinder_02
'COMET 5 11M 1000'	1	9,955	3,760	0,011	1,047
'COMET 5 11M 80'	1	9,956	4,977	0,013	0,012
Abweichung		0,001	1,217	0,002	1,035
Wiederholung der Bestimmung von Zylinder_02 für 'COMET 5 11M 1000'					
'COMET 5 11M 1000'	2	9,955	4,838	0,011	0,045
'COMET 5 11M 80'	1	9,956	4,977	0,013	0,012
Abweichung		0,001	0,139	0,002	0,033

Tab. 89| Gegenüberstellung der Ergebnisse zur Bestimmung der Zylindrizitätsabweichung beider Sensorkonfigurationen.
Quelle: Selbst

29.13 Präzision der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 1000'

Unter Berücksichtigung einer verbesserte Strategie zur Datenerhebung und -auswertung sind weitere Versuche opportun, um die Auflösungsgrenze weiter einzugrenzen. Hierfür wird als Prüfgegenstand 'Konturnormal_01' verwendet (►Abb. 296|). Wie oben gefordert, kennzeichnet sich dieses durch eine Treppenstruktur, die bis 0,200 mm untergliedert ist.[736] Es wird angenommen, dass diese von 'COMET 5 11M 1000' nicht in Gänze aufgelöst werden kann. Der Wert befindet sich unterhalb des herstellerseitig angegebenen Punktabstandes von 0,225 mm (siehe unten). Zugleich soll mit der folgenden Versuchsreihe die Einflussgröße des 'Matching' auf die Datenqualität untersucht werden. Hierzu werden die Daten eines 3D-Modells, bestehend aus mehreren Einzelaufnahmen, den Daten einer Einzelaufnahme gegenübergestellt.

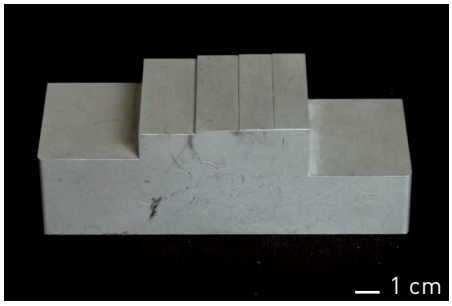


Abb. 296| Foto des ‚Konturnormal_01'.
Quelle: Selbst

736 Rückseitig sind die Stufenhöhen des Normal handschriftlich angegeben – die kleinste wird mit 0,200 mm quantifiziert. Um diese Angaben zu validieren, erfolgt eine zusätzlich Bestimmung durch die händische Vermessung mit einem Messschieber. Zur Verifikation wird darüber hinaus eine Bestimmung mit einem weiteren optischen Verfahren auf Basis der Mikro-Streifenprojektion vorgenommen. Die Ergebnisse hierzu entstanden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ‚ITO' im Labor der Universität Stuttgart Vahingen – namentlich Wolfram Lyda , Daniel Claus und Giancarlo Pedrini (►Abb. 299| - Abb. 300|). Dem Grundsatz nach handelt es sich um ein nicht zertifiziertes Normal. Es wird aufgrund seiner generellen Verfügbarkeit gewählt. Bei dem Mikro-Streifenprojektionsscanner handelt sich um ein System auf Basis eines Stereo-Mikroskopes (MZ12.5) der Firma ‚Leica Microsystems GmbH'. Die Mikro-Streifenprojektion kann mit unterschiedlichen Vergrößerungsstufen durchgeführt werden, wobei der Triangulationswinkel 9 bzw 18° beträgt.

Datenerhebung: 'Konturnormal_01', 3D-Modell

Die Digitalisierung des Untersuchungsgegenstandes folgt dem bisherigen Schema.

Auswertung: 'Konturnormal_01', 3D-Modell

Auch die Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse folgt prinzipiell der bisherigen Vorgehensweise. Zunächst werden die virtuellen Ebenen erzeugt – repräsentativ für die Stufenstruktur. Die Ebene der untersten Stufe ist dabei zugleich die gemeinsame Bezugsebene zur Berechnung der Ebenenmissverhältnisse. Sie wird in 'INSPECTplus' skaliert, sodass von allen anderen Ebenen über Ebenenlote auf sie referenziert werden kann.[737] Diese Auswertungsstrategie beinhaltet mehrere Vorteile. So ist die räumliche Lage der Bezugsebene unabhängig von der Ausrichtung des virtuellen Modells, womit eine potenzielle Fehlerquelle ausgeschlossen werden kann. Zugleich ist die räumliche Lage der Bezugsebene reproduzierbar. Auf diese Weise kann untersucht werden, inwiefern sich die Ergebnisse der Ebenendifferenzen einer Einzelaufnahme von denen eines 3D-Modells, bestehend aus mehreren Aufnahmen, unterscheiden (►Tab. 91|). Um, wie gefordert, die Ebenenparallelität zu belegen und mögliche Fehlerquelle auszuschließen, erfolgt die Bestimmung der Ebenenabstände über fünf Messschieber je Ebene.[738] Für die Auswertung werden die Messschieber gruppiert, wobei der Mittelwert berücksichtigt wird (►Abb. 297| und Tab. 91|).

Ergebnis: 'Konturnormal_01', 3D- Modell

Dem 3D-Modell zufolge können sämtliche Abstufungen von 'Konturnormal_01' aufgelöst werden, sodass die obige These falsifiziert werden muss. Dass kleinste Ebenenmissverhältnis kann anhand der Mittelwerte der zugehörigen Messschieber mit 0,187 mm quantifiziert werden ('Stufe_04', ►Tab. 91| und Abb. 297|).

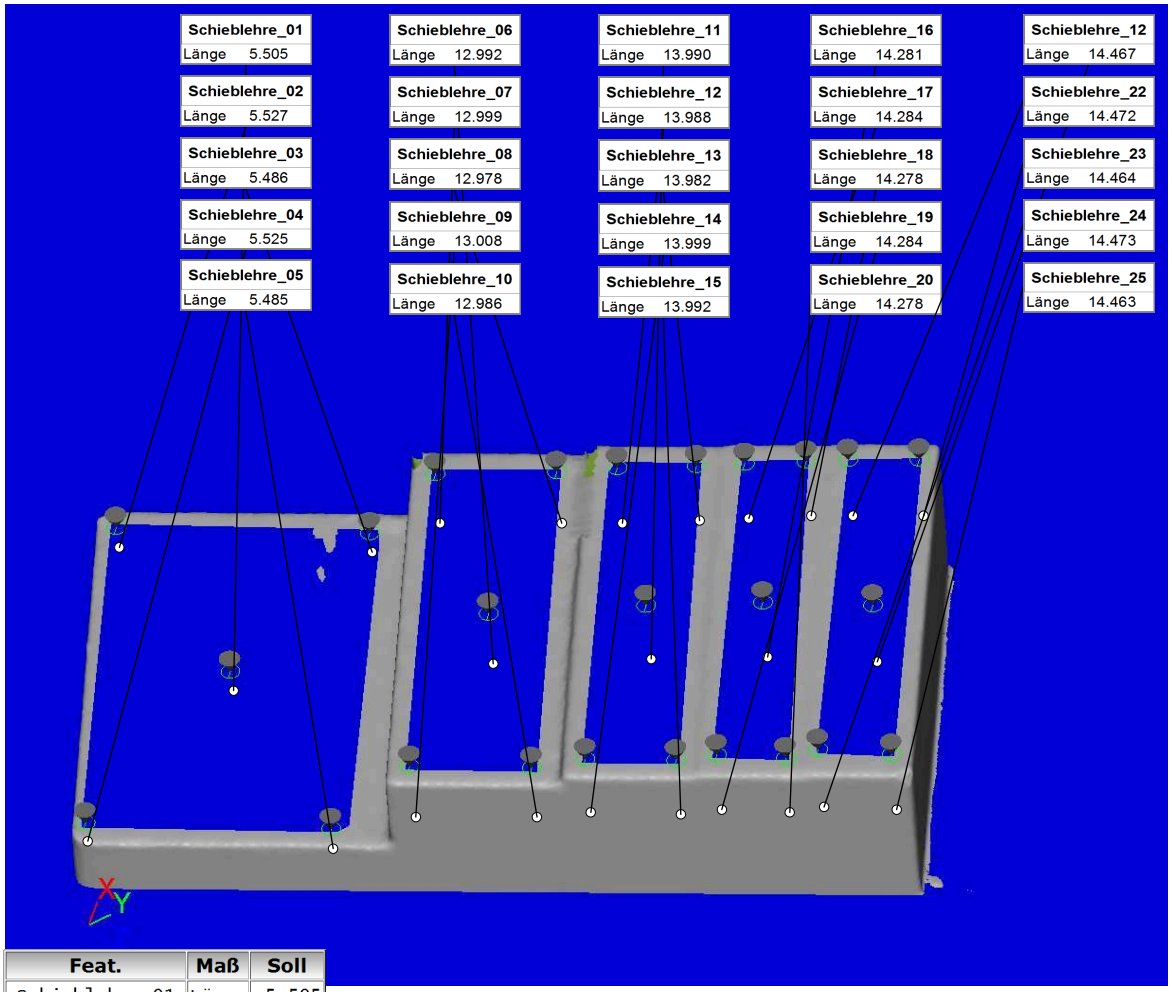
737 Vergleiche hierzu ►Abb. 297|. Die Ansichten auf ‚Konturnormal_01' sind vergleichbar, sodass die untere rechte Auftrittfläche die blaue Bezugsebene repräsentiert. Im zugehörigen Protokoll ist der untere Teil des 3D-Modell jedoch optisch durch diese blaue Ebene verdeckt.

738 Der erste Messschieber wird hierzu immer in der Ebenenmitte positioniert, wohingegen die übrigen jeweils in den Ebenenecken ansetzen.

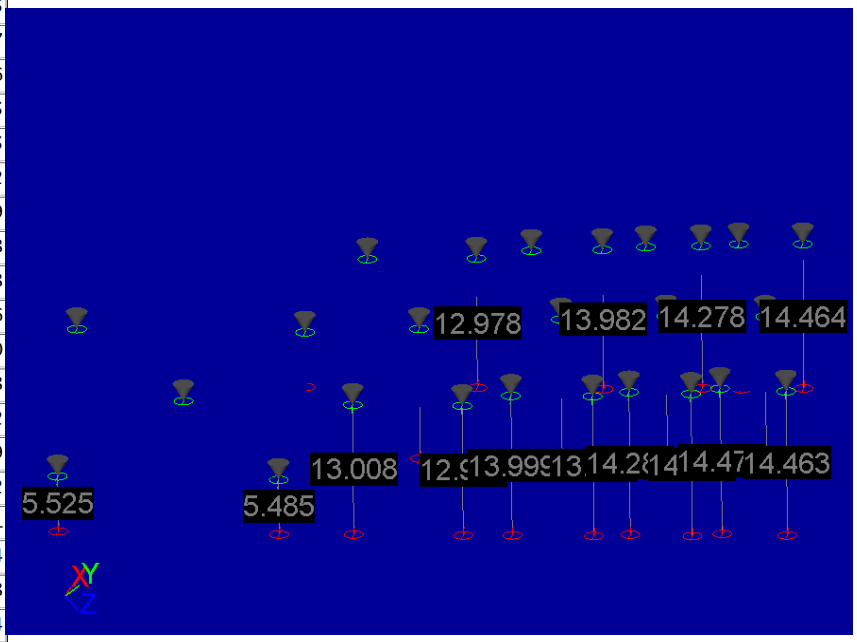
Metadaten und Messparameter	
Objekt	Konturnormal_01
Benennung	Ebenenmissverhältnisse_virtuelles Modell
Datum	06.08.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	11/diverse
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	315
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	57.817
	Anzahl Dreiecke	113.853
	Oberfläche (mm^2)	11.133.718

Tab. 90| Metadaten zu 'Konturnormal_01', 3D-Modell.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	5.505
Schieblehre_02	Länge	5.527
Schieblehre_03	Länge	5.486
Schieblehre_04	Länge	5.525
Schieblehre_05	Länge	5.485
Schieblehre_06	Länge	12.992
Schieblehre_07	Länge	12.999
Schieblehre_08	Länge	12.978
Schieblehre_09	Länge	13.008
Schieblehre_10	Länge	12.986
Schieblehre_11	Länge	13.990
Schieblehre_12	Länge	13.988
Schieblehre_13	Länge	13.982
Schieblehre_14	Länge	13.999
Schieblehre_15	Länge	13.992
Schieblehre_16	Länge	14.281
Schieblehre_17	Länge	14.284
Schieblehre_18	Länge	14.278
Schieblehre_19	Länge	14.284
Schieblehre_20	Länge	14.278
Schieblehre_21	Länge	14.467
Schieblehre_22	Länge	14.472
Schieblehre_23	Länge	14.464
Schieblehre_24	Länge	14.473
Schieblehre_25	Länge	14.463



Objekt: Konturnormal_01 Benennung: Ebenendifferenzen	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 1000 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 06.08.2013
3D_artscan	Seite 1 von 1

Abb. 297| Messprotokoll zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 1000' – Objekt: 'Konturnormal_01'.
Quelle: Selbst

Länge (mm)		Mittelwert Messschieber (mm) Ebenengruppiert	Ebenenmissverhältnis (mm) bezogen auf Ausgleichsebene / Mittelwert numerisch vorhergehende Ebene	
Schieblehre_01	5,505			
Schieblehre_02	5,527			
Schieblehre_03	5,486			
Schieblehre_04	5,525			
Schieblehre_05	5,485	5,506	5,506	
Schieblehre_06	12,992			Stufe_01
Schieblehre_07	12,999			
Schieblehre_08	12,978			
Schieblehre_09	13,008			
Schieblehre_10	12,986	12,993	7,487	
Schieblehre_11	13,990			Stufe_02
Schieblehre_12	13,988			
Schieblehre_13	13,982			
Schieblehre_14	13,999			
Schieblehre_15	13,992	13,990	0,998	
Schieblehre_16	14,281			Stufe_03
Schieblehre_17	14,284			
Schieblehre_18	14,278			
Schieblehre_19	14,284			
Schieblehre_20	14,278	14,281	0,291	
Schieblehre_21	14,467			Stufe_04
Schieblehre_22	14,472			
Schieblehre_23	14,464			
Schieblehre_24	14,473			
Schieblehre_25	14,463	14,468	0,187	

Tab. 91| Die ermittelten Ebenendifferenzen der strukturierten Oberfläche des 'Konturnormal_01' (3D-Modell).
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Konturnormal_01', Einzelaufnahme

Wie oben angekündigt, erfolgt unter qualitativen und quantitativen Aspekten eine Beurteilung welchen Einfluss ein 'Matching' auf die Datengüte hat. Hierzu wird dem oben verwendeten 3D-Modell und den dort berechneten Ebenenmissverhältnissen eine Einzelaufnahme des selben Datensatzes gegenübergestellt.[739] Damit können die die Ergebnisse verfälschenden Einflüsse auf ein Minimum reduziert werden.

Auswertung: Konturnormal_01', Einzelaufnahme

Die Auswertung dieses Versuches folgt der bisherigen Vorgehensweise. Für die Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse werden abermals neue virtuelle Ebenen und Messschieber erstellt. Dadurch lässt sich ihre Reproduzierbarkeit untersuchen und ein etwaiger Unsicherheitsfaktor bestimmen der von der Auswertung resultiert.

Ergebnis: 'Konturnormal_01', Einzelaufnahme

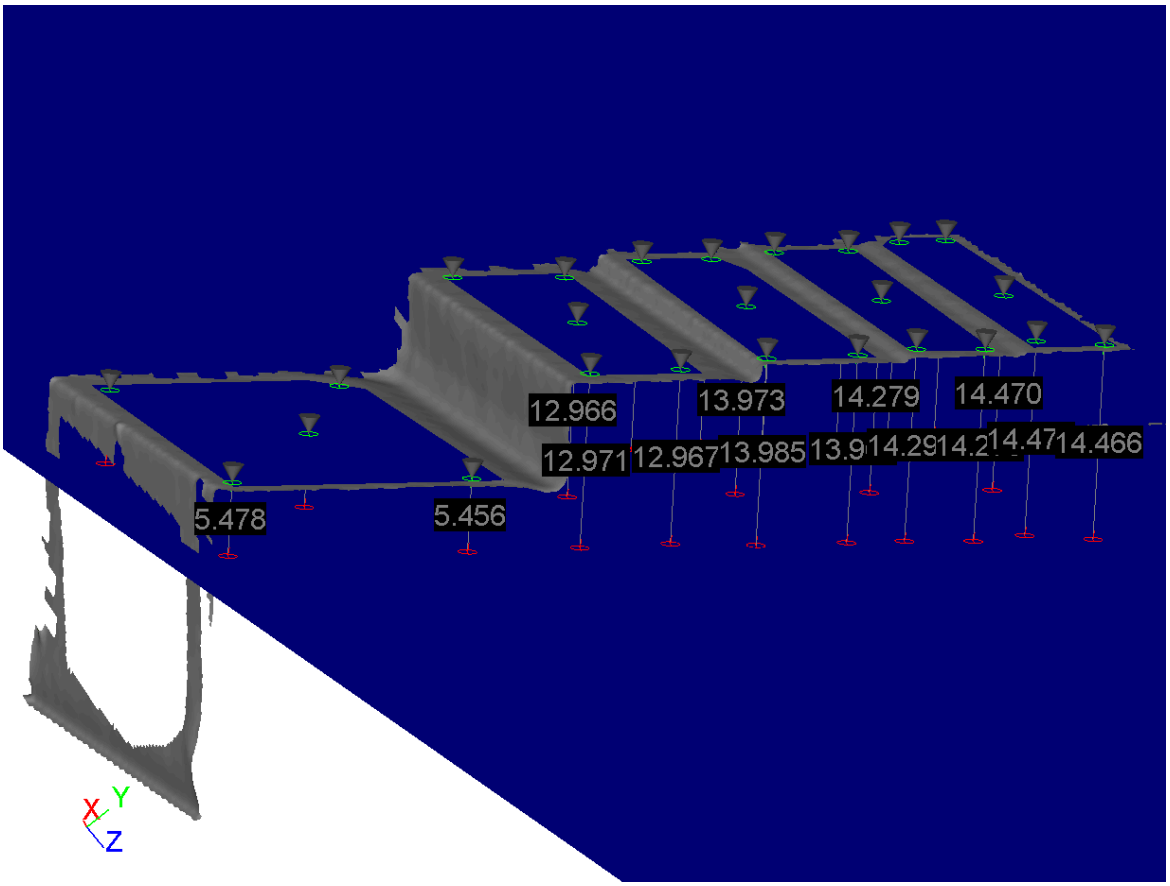
Aufgrund der Einzelaufnahme ist das 3D-Modell keinesfalls vollständig. Nichtsdestominder ist sowohl eine qualitative als auch eine quantitative Bestimmung möglich. Erstgenannte belegt sich über die grundsätzliche Auflösung der Treppenstruktur, Letztgenannte anhand der numerischen Ergebnisse (►Abb. 298| und Tab. 93|). Die kleinste Stufenhöhe ('Stufe _04') kann anhand der Einzelaufnahme im Mittelwert mit 0,191 mm quantifiziert werden. Dieses Ergebnis überrascht abermals, da vermutet wurde, dass sich einzelne Strukturbereiche des Konturnormal unterhalb der Auflösungsgrenze befinden – eine Begründung hierfür steht bis dato aus.

739 Da diese Anforderung bereits zum Zeitpunkt der Digitalisierung feststand, erfüllt die erste Aufnahme des virtuellen Modells diese Bedingung. Sie dient daher als Auswertungsgrundlage. Daher wird auf die RAW-Daten des triangulierten Datensatzes zurückgegriffen, die erste Aufnahme selektiert und die übrigen gelöscht. Anschließend wird diese Aufnahme als eigenes Projekt gespeichert und eine Triangulation der Daten durchgeführt. Bei der ‚Automatische Datennachverarbeitung' werden die selben Einstellungen verwendet, wie zuvor für die Triangulation mehrerer Aufnahmen zum 3D-Modell. Der Vergleich ist somit valide.

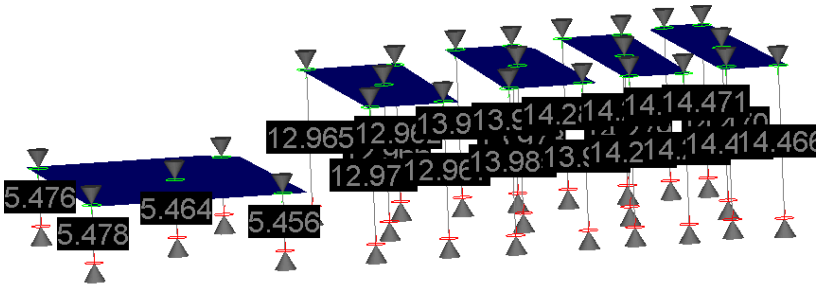
Metadaten und Messparameter	
Objekt	Konturnormal_01
Benennung	Ebenenmissverhältnisse_Einzelaufnahme
Datum	06.08.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 1000

	Anzahl Messungen	1,000
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	315
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0225
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0200
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0200
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	1,0000
	Anzahl Knotenpunkte	k. A.
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 92| Metadaten zu 'Konturnormal_01', Einzelaufnahme, 'COMET 5 11M 1000' – Objekt: 'Konturnormal_01'.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	5.464
Schieblehre_02	Länge	5.476
Schieblehre_03	Länge	5.455
Schieblehre_04	Länge	5.478
Schieblehre_05	Länge	5.456
Schieblehre_06	Länge	12.966
Schieblehre_07	Länge	12.965
Schieblehre_08	Länge	12.962
Schieblehre_09	Länge	12.971
Schieblehre_10	Länge	12.967
Schieblehre_11	Länge	13.973
Schieblehre_12	Länge	13.984
Schieblehre_13	Länge	13.974
Schieblehre_14	Länge	13.985
Schieblehre_15	Länge	13.965
Schieblehre_16	Länge	14.279
Schieblehre_17	Länge	14.287
Schieblehre_18	Länge	14.261
Schieblehre_19	Länge	14.296
Schieblehre_20	Länge	14.273
Schieblehre_21	Länge	14.470
Schieblehre_22	Länge	14.474
Schieblehre_23	Länge	14.471
Schieblehre_24	Länge	14.470
Schieblehre_25	Länge	14.466



Objekt:	Konturnormal_01		
Benennung:	Ebenendifferenzen_01_Einzelansicht		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 1000	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	02	Datum:	07.08.2013
3D_artscan		Seite 1 von 1	

Abb. 298| Messprotokoll zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 1000' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Konturnormal_01'. Quelle: Selbst

Länge (mm)		Mittelwert Messschieber (mm) Ebenengruppiert	Ebenenmissverhältnis (mm) bezogen auf Ausgleichsebene / Mittelwert numerisch vorhergehende Ebene	
Schieblehre_01	5,464			
Schieblehre_02	5,476			
Schieblehre_03	5,455			
Schieblehre_04	5,478			
Schieblehre_05	5,456	5,466	5,466	
Schieblehre_06	12,966			
Schieblehre_07	12,965			
Schieblehre_08	12,962			
Schieblehre_09	12,971			
Schieblehre_10	12,967	12,966	7,500	Stufe_01
Schieblehre_11	13,973			
Schieblehre_12	13,984			
Schieblehre_13	13,974			
Schieblehre_14	13,985			
Schieblehre_15	13,965	13,976	1,010	Stufe_02
Schieblehre_16	14,279			
Schieblehre_17	14,287			
Schieblehre_18	14,261			
Schieblehre_19	14,296			
Schieblehre_20	14,273	14,279	0,303	Stufe_03
Schieblehre_21	14,470			
Schieblehre_22	14,474			
Schieblehre_23	14,471			
Schieblehre_24	14,470			
Schieblehre_25	14,466	14,470	0,191	Stufe_04

Tab. 93| Die bestimmten Ebenendifferenzen der strukturierten Oberfläche des 'Konturnormal_01', anhand einer Einzelaufnahme.
Quelle: Selbst

Qualitative und quantitative Einschätzung des 'Matchingfehler': Vergleich eines 3D-Modell mit einer Einzelaufnahme

Beim Vergleich der Messergebnisse aus der Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse des vollständigen 3D-Modells, bestehend aus elf Aufnahmen, mit den Ergebnisse der Einzelaufnahme des Normal, sind nur geringfügige Abweichungen festzustellen. Sie beträgt im Durchschnitt 0,014 mm, wobei die maximale Abweichung mit 0,028 mm quantifiziert wird (►Tab. 94|). Die Verortung des kleinsten Ebenenmissverhältnises deckt sich und entspricht 'Stufe_04'. An besagter Stelle besteht zwischen dem 3D-Modell (Ebenenmissverhältnis 0,187 mm) und der Einzelaufnahme (Ebenenmissverhältnis 0,191 mm) eine Differenz von lediglich 0,004 mm. Dieses erlaubt zwei Rückschlüsse. Erstens: die entwickelte Auswertungsstrategie ermöglicht reproduzierbare Ergebnisse. Zweitens: ein möglicher 'Matchingfehler' ist von tendenziell untergeordneter Bedeutung.[740]

Abstufungsdifferenzen 'Konturnormal_01' (mm)

	Stufe_00	Stufe_01	Stufe_02	Stufe_03	Stufe_04	Stufe_05
Vergleich der Ergebnisse: 'COMET5 11M 1000' (3D-Modell) und 'COMET5 11M 1000' (Einzelaufnahme)						
'COMET5 11M 1000' (3D-Modell)	5,495	7,487	0,998	0,291	0,187	k. A
'COMET5 11M 1000' (Einzelaufnahme)	5,466	7,500	1,010	0,303	0,191	k. A
Abweichung	0,029	0,013	0,012	0,012	0,004	k. A
Durchschnittliche Abweichung						0,014
Maximale Abweichung						0,029

Tab. 94| Gegenüberstellung der Bestimmung der Ebenenmissverhältnisse anhand eins 3D-Modells und einer Einzelaufnahme von 'Konturnormal_01' zur Bestimmung der Größe eines 'Matchingfehlers' bei COMET 5 11M 1000.
Quelle: Selbst

Verifizierung der Ergebnisse von 'COMET 5 11M 1000' am 'Konturnormal_01'

Zur Systemevaluierung werden die erhobenen Daten auf ihre Verifizierbarkeit hin untersucht und mit den Ergebnissen anderer Verfahren verglichen (mechanischer Messschieber und Mikro-Streifenprojektion). Die Gegenüberstellung erfolgt in ►Tab. 95|. Werden die Ergebnisse aus der Bestimmung des Ebenenmissverhältnisses des 'COMET-Systems' in Beziehung zum Mittelwert der verifizierenden Daten gesetzt, die sich aus der rückseitigen Beschriftung, der Erhebung mit dem mechanischen Messschieber und der Mikro-Streifenprojektion ergeben (►Tab. 95| und Abb. 300|), so beträgt die Abweichung im Durchschnitt 0,012 mm. Dabei quantifiziert sich das Maximum mit 0,026 mm.

Zur weiteren Validierung wird in einem ausgelagerten Versuch ein zusätzliches 3D-Modell von 'Konturnormal_01' erzeugt – dieses Mal jedoch durch 'COMET 5 11M 80' (►Abb. 301| und Tab. 97|). Über diesen Versuch wird das kleinste Ebenenmissverhältnis mit 0,193 mm quantifiziert, was örtlich 'Stufe_04' entspricht. Die Gegenüberstellung der auf diese Weise bestimmten Ebenenmissverhältnisse zu den Daten von 'COMET 5 11M 1000' offenbart eine geringe durchschnittliche Abweichung von 0,009 mm (►Tab. 95|). Die maximale Abweichung beträgt 0,014 mm. Die Ergebnisse von 'COMET 5 11M 1000' gelten damit als verifiziert.

740 Zugleich wird darauf hingewiesen, dass diese Aussage keine Allgemeingültigkeit besitzt. Weiterhin sind hierfür Objektcharakteristika, die Arbeitsweise, sowie die Datennachverarbeitung maßgeblich.

Abstufungsdifferenzen 'Konturnormal_01' (mm)	Stufe_00	Stufe_01	Stufe_02	Stufe_03	Stufe_04	Stufe_05
Ergebnisse über verifizierende Messungen mit anderen Messsystemen						
Beschriftung (Rückseite)	k. A	7,500	1,000	0,300	0,200	14,450
Messschieber (mechanisch)	k. A	7,525	0,985	0,310	0,200	14,435
Mikro-Streifenprojektion	k. A	k. A	1,011	0,300	0,190	k. A
Mittelwert	k. A	7,513	0,999	0,303	0,197	14,443
Vergleich der Ergebnisse: verifizierenden Messung (anderer Messsystem) und 'COMET5 11M 1000' (3D-Modell)						
Verifizierende Messung (Mittelwert)	k. A	7,513	0,999	0,303	0,197	14,443
'COMET5 11M 1000' (3D-Modell)	5,495	7,487	0,998	0,291	0,187	k. A
Abweichung	k. A	0,026	0,001	0,012	0,010	k. A
Durchschnittliche Abweichung						0,012
Maximale Abweichung						0,026
Vergleich der Ergebnisse: 'COMET5 11M 1000' (3D-Modell) und 'COMET5 11M 80' (3D-Modell)						
'COMET5 11M 1000' (3D-Modell)	5,506	7,487	0,998	0,291	0,187	k. A
'COMET5 11M 80' (3D-Modell)	5,495	7,493	1,012	0,282	0,193	k. A
Abweichung	0,011	0,006	0,014	0,009	0,006	k. A
Durchschnittliche Abweichung						0,009
Maximale Abweichung						0,014

Tab. 95| Gegenüberstellung der Ergebnisse aller Messungen an ‘Konturnormal_01’ – Evaluierung der Reproduzierbarkeit und Verifikation des Messsystems in der Konfiguration ‘COMET 5 11M 1000.
Quelle: Selbst

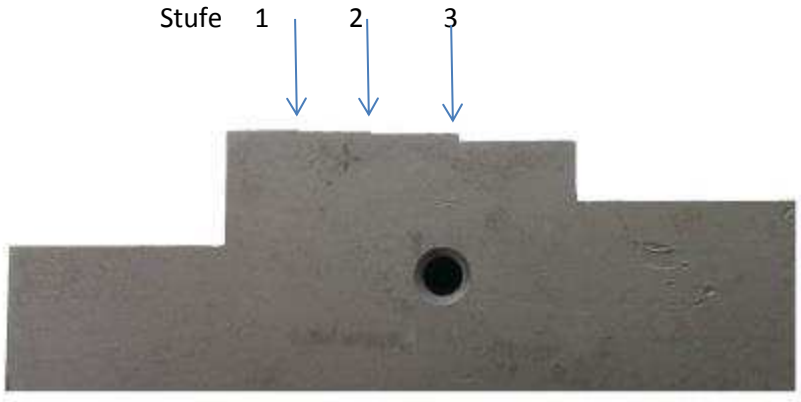
Messung Streifentriangulation

Script-Beschreibung

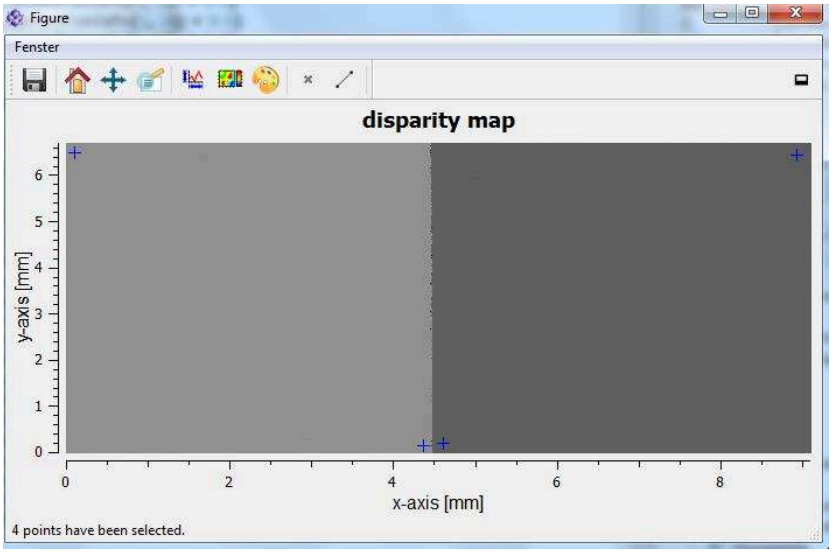
Language:	Python V3.3 / ITOM Entwicklungsumgebung V1.0.14
Module:	Numpy, Itom
File:	evalStepNormal.py
Funktion:	Evaluierung von Stufenhöhen von Messaufnahmen anhand frei ausgewählter Region of Interest (ROI).
Messaufnahme:	Die zu messenden Stufenhohe werden nach dem Prinzip der Streifentriangulation erfasst und aufgenommen.

Abb. 299| Metadaten zur Verifikation von ‘Konturnormal_01’ durch die Mikro-Streifenprojektion (‘Profil K2’ seitens ITO bestimmt, entspricht ‘Konturnormal_01’)
Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

Profil K2 **Vermessung von Stufen**



ROI: Erfasste Stufenhöhe mit 1x-Zoom und 1.0 Objektiv:



Auswertung

Stufe1: 0.19 mm mit 10,9 µm mittlerer Standardabweichung und PV-Wert von 2 µm

Stufe2: 0.30 mm mit 39,1 µm mittlerer Standardabweichung und PV-Wert von 6,5 µm

Stufe3: 1.011 mm mit 14,2 µm mittlerer Standardabweichung und PV-Wert von 0,5 µm

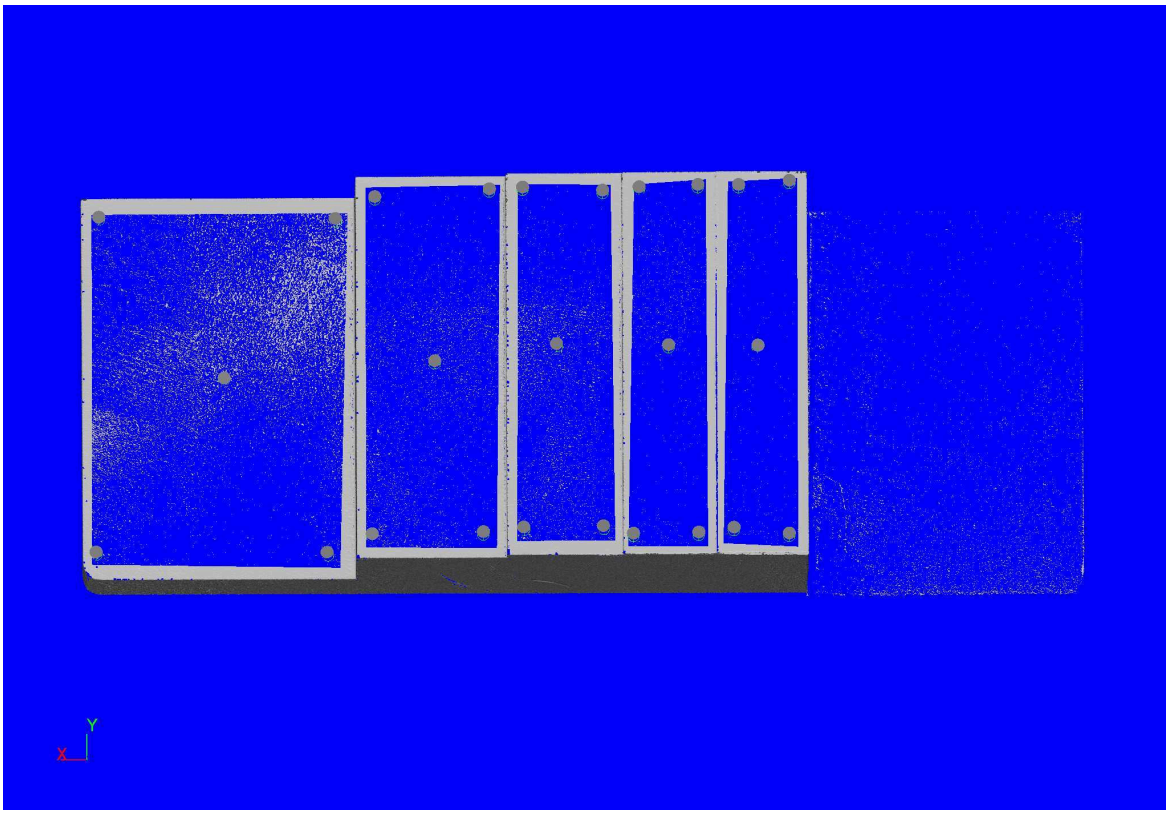
- Die Stufenhöhen bilden den Mittelwert mit einer mittleren Standardabweichung (bedingt durch Rauschen). Bei mehrmaliger Auswertung ergaben sich verschiedene PV-Werte bei 6 Wiederholungen.

Abb. 300| Verifikation von 'Konturnormal_01' durch die Mikro-Streifenprojektion ('Profil K2' seitens ITO bestimmt – Seite 1). Hierbei gilt: 'Stufe_02' (selbst) entspricht 'Stufe 3' (ITO); 'Stufe_02' (selbst) entspricht 'Stufe 3' (ITO); 'Stufe_03' (selbst) entspricht 'Stufe 1' (ITO). Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

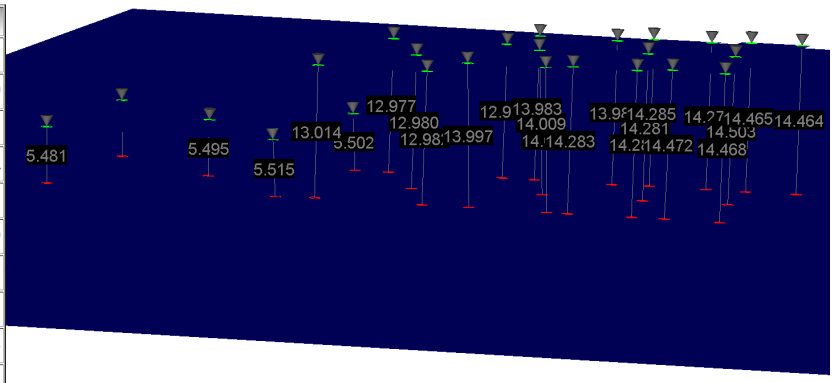
Metadaten und Messparameter	
Objekt	Konturnormal_01
Benennung	Verifizierung Ergebnisse
Datum	05.08.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	12
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	diverse
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	635
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0800
	Anzahl Knotenpunkte	k. A.
	Anzahl Dreiecke	k. A.
	Oberfläche (mm^2)	k. A.

Tab. 96| Metadaten zur verifizierenden Messung der Ergebnisse von 'COMET 5 11M 1000' am 'Konturnormal_01', 3D-Modell.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	5.495
Schieblehre_02	Länge	5.480
Schieblehre_03	Länge	5.502
Schieblehre_04	Länge	5.481
Schieblehre_05	Länge	5.515
Schieblehre_06	Länge	12.980
Schieblehre_07	Länge	12.977
Schieblehre_08	Länge	12.983
Schieblehre_09	Länge	13.014
Schieblehre_10	Länge	12.982
Schieblehre_11	Länge	14.009
Schieblehre_12	Länge	13.983
Schieblehre_13	Länge	13.986
Schieblehre_14	Länge	13.997
Schieblehre_15	Länge	14.022
Schieblehre_16	Länge	14.281
Schieblehre_17	Länge	14.285
Schieblehre_18	Länge	14.279
Schieblehre_19	Länge	14.283
Schieblehre_20	Länge	14.281
Schieblehre_21	Länge	14.503
Schieblehre_22	Länge	14.465
Schieblehre_23	Länge	14.464
Schieblehre_24	Länge	14.472
Schieblehre_25	Länge	14.468



Objekt: Konturnormal_01 Benennung: Ebenendifferenzen	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 05.08.2013
3D_artscan	Seite 1 von 1

Abb. 301| Verifizierung der Ergebnisse von 'COMET 5 11M 1000' am 'Konturnormal_01', 3D-Modell.
Quelle: Selbst

Länge (mm)		Mittelwert Messschieber (mm) Ebenengruppiert	Ebenenmissverhältnis (mm) bezogen auf Ausgleichsebene / Mittelwert numerisch vorhergehende Ebene	
Schieblehre_01	5,495			
Schieblehre_02	5,480			
Schieblehre_03	5,502			
Schieblehre_04	5,481			
Schieblehre_05	5,515	5,495	5,495	
Schieblehre_06	12,980			Stufe_01
Schieblehre_07	12,977			
Schieblehre_08	12,983			
Schieblehre_09	13,014			
Schieblehre_10	12,982	12,987	7,493	
Schieblehre_11	14,009			Stufe_02
Schieblehre_12	13,983			
Schieblehre_13	13,986			
Schieblehre_14	13,997			
Schieblehre_15	14,022	13,999	1,012	
Schieblehre_16	14,281			Stufe_03
Schieblehre_17	14,285			
Schieblehre_18	14,279			
Schieblehre_19	14,283			
Schieblehre_20	14,281	14,282	0,282	
Schieblehre_21	14,503			Stufe_04
Schieblehre_22	14,465			
Schieblehre_23	14,464			
Schieblehre_24	14,472			
Schieblehre_25	14,468	14,474	0,193	

Tab. 97| Die bestimmten Ebenendifferenzen des 'Konturnormal_01', ermittelt mit dem Sensor 'COMET 5 11M 80'.
Quelle: Selbst

29.14 Präzision der Auflösungsgrenze: 'COMET 5 11M 80'

Auch für 'COMET 5 11M 80' ist die Auflösungsgrenze weiter einzugrenzen. Wie oben aufgezeigt soll der iterativen Strategie folgend hierfür der Bereich zwischen 0,100 mm und 0,010 mm untersucht werden.[741] Das zuvor verwendete Normal eignet sich nicht. Die kleinsten, dort ermittelten Strukturen befinden sich oberhalb von 0,100 mm. Zur weiteren Eingrenzung wird daher ein eigenes Präparat hergestellt – 'Schulp' (►Abb. 302|). Das Kalkskelett des Tintenfisches (Sepia-Kalkschulp) ist durch feine Stege strukturiert. Diese kennzeichnen sich anhand einer jahrringähnlichen geometrischen Anordnung, wobei abweichend zum Baum kein gemeinsamer Mittelpunkt im Schulp ausgemacht werden kann. Die annähernd konzentrisch angeordneten Kalkstege werden zum Randbereich des Schulp immer enger. Die Strukturen sind infolgedessen für eine weiter gehende Eruierung der Auflösungsgrenze prädestiniert. Demzufolge wird ein Stück Schulp so präpariert, dass die feinen Zwischenräume der Kalkstege im Verlauf der Längsrichtung homogen abnehmen (►Abb. 302| und Abb. 305|).

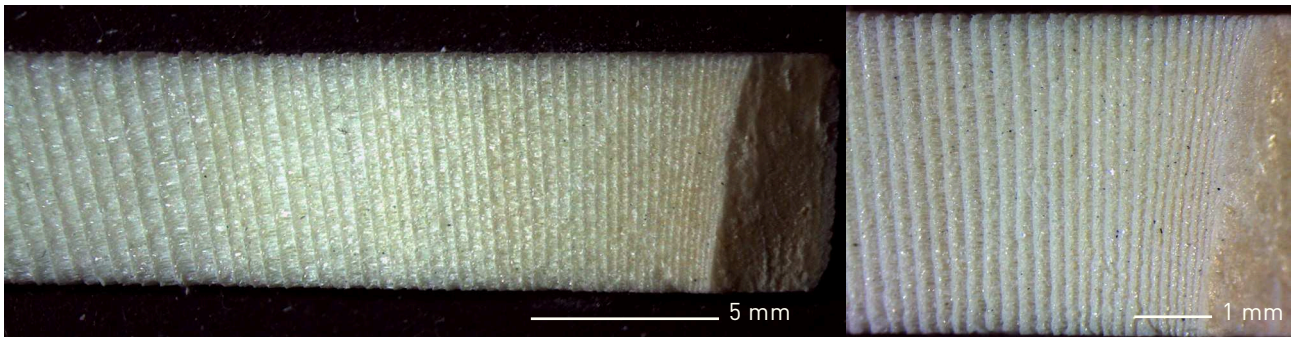


Abb. 302| Foto des Präperates 'Schulp' zur Bestimmung der Auflösungsgrenze des Sensors 'COMET 5 11M 80'. Links sind die Zwischenräume der Stege vergleichsweise grob, wohingegen ihr Abstand im rechten Bereich immer kleiner wird. Makro- und strereomikroskopische Aufnahme.
Quelle: Elisabeth George, selbst

Datenerhebung: 'Schulp'

Das Präparat wird mit einer Einzelaufnahme digitalisiert. Aufgrund des begrenzten Messvolumens kann hierbei, verglichen mit ►Abb. 302|, lediglich das rechte, feiner strukturierte Areal erfasst werden.[742]

Auswertung: 'Schulp'

Abweichend zu der bisherigen Vorgehensweise werden einzelne Schritte der Auswertung noch in 'COMETplus' durchgeführt. Sie umfasst die Ausrichtung der Aufnahme. Im Weiteren werden Serienschnitte im Abstand von 0,5 mm erzeugt. Diese verlaufen kantenparallel zur Längsseite des Präparates – erkennbar an gelben Linien (►Abb. 303|).[743] Nach dem Import der Einzelaufnahme in 'INSPECT-

741 Mit dem 80er Messvolumen konnten bisher Strukturen unterhalb 0,096 mm aufgelöst werden. Vergleiche die Ergebnisse von ‚Rauheitsnormal (ITO)', Vorderseite.

742 Für die weitere Beschreibung des Präparates dient diese Abbildung als Vorbild für Angaben zur Raumorientierung.

743 Die erste Serienschnittlinie wird so positioniert, dass sie zugleich dem kantenparal-

plus' werden analog zum Höhenprofil der Stege virtuelle Vektoren erstellt – als blaue Linien ersichtlich. Hierbei ist jeder Vektor in einer Näherung repräsentativ für einen Steg. Durch die Vektoren wird deutlich, dass die Stege geometrisch leicht auseinanderlaufen (►Abb. 304| und Abb. 305|). Wie angesprochen, werden die Stege im rechten Bereich der 3D-Aufnahme immer unscheinbarer, bis die Strukturen nicht mehr aufgelöst werden können und sich gänzlich verlieren. Die Positionierung der Vektoren ist in diesem Areal dementsprechend schwierig.[744] Gleichwohl sind die so erzeugten Hilfslinien repräsentativ für die Objektstruktur und veranschaulichen seine geometrische Beschaffenheit. Kombiniert mit den eingeblendeten Serienschnittlinien entsteht somit ein Raster. Dieses ist die Grundlage für die folgende, laterale Abstandsmessung der Stegstrukturen. Ausgehend vom feinsten, optisch noch eindeutig zu identifizierenden Steg werden die Zwischenräume über virtuelle Messschieber bestimmt. Daher quantifiziert 'Schieblehre_01' den geringsten Abstand zwischen '01_Steg' und '02_Steg'. In Bezug auf den Ansatz- und Endpunkt der Messschieber wird sich am Raster von Serienschnittlinien und Vektoren orientiert. Die übrigen Messschieber werden in fortlaufender Reihenfolge zwischen den Stegen positioniert (►Abb. 305| - Abb. 308|). Die Messschieberlängen sind, wie üblich, über die Flyer im Protokoll angegeben, wobei sie dort auch in drei Tabellen zusammengefasst sind (►Abb. 306|) – gruppiert nach Stegen. Zur systematischen Auswertung und Verifikation sind diese Messschieberlängen in ►Tab. 100| zusammengefasst.

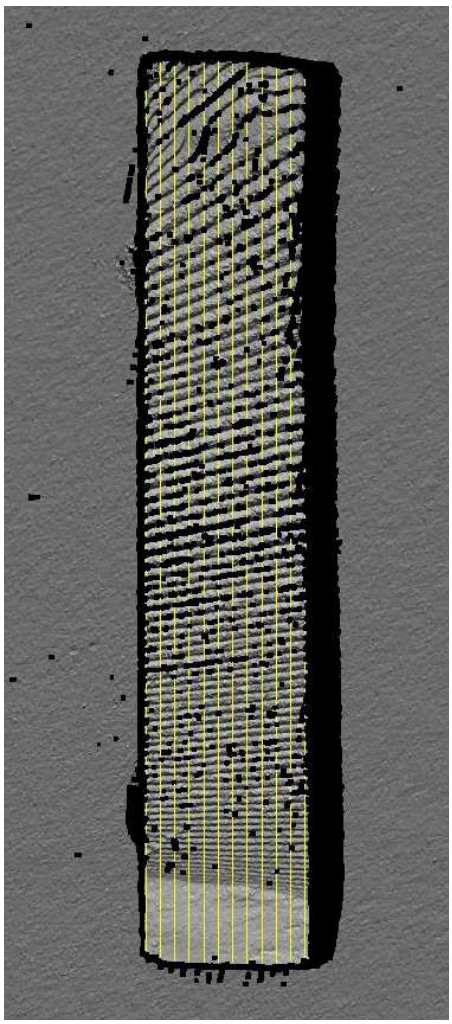


Abb. 303| Bildschirmfoto (in 'COMETplus') der Einzelaufnahmen des Präparates 'Schulp' mit eingeblendeten Serienschnittlinien (gelb) – alle 0,5 mm. Bei der Aufnahme handelt es sich abweichend um ein 3D-Modell, bestehend aus mehreren Aufnahmen.
Quelle: Selbst

Ergebnis: 'Schulp'

Nach der oben beschriebenen Datenerhebung quantifiziert der erste Messschieber ('Schieblehre_01') sogleich den geringsten, nachweisbaren Stegzwischenraum – hier: 0,100 mm. Die darauf folgenden Längenangaben der Messschieber der ersten Gruppe belegen, in numerischer Folge, die lineare Zunahme der Stegzwischenräume. Eine Feststellung, die ebenso für die anderen, nach Gruppen sortierten Messschieber gilt. Diese bestätigt das eingangs bemerkte, leichte auseinanderlaufen der Kalkstrukturen, wodurch die Eignung des Präparates für die vorliegende Versuchsreihe hervorzuheben ist.

lelen Abschluss der 3D-Aufnahme entspricht (►Abb. 303| - und Abb. 305|). Damit sind die Schnittlinien reproduzierbar und zugleich ist damit eine Vorraussetzung geschaffen, um mit anderen Messverfahren die erhobenen Daten auf ihre Verifizierbarkeit hin zu untersuchen.

744 Wird der 3D-Datensatz im ‚Viewer' ausgeblendet, so veranschaulicht sich die Stegstruktur deutlich anhand des Verlaufes der wellenförmigen, gelben Schnittlinien (►Abb. 304|). Dabei ist der untere Scheitelpunkt der Schnittlinie repräsentativ für den Stegzwischenraum, wohingegen die oberen charakteristisch für den Verlauf der Kalkstege sind.

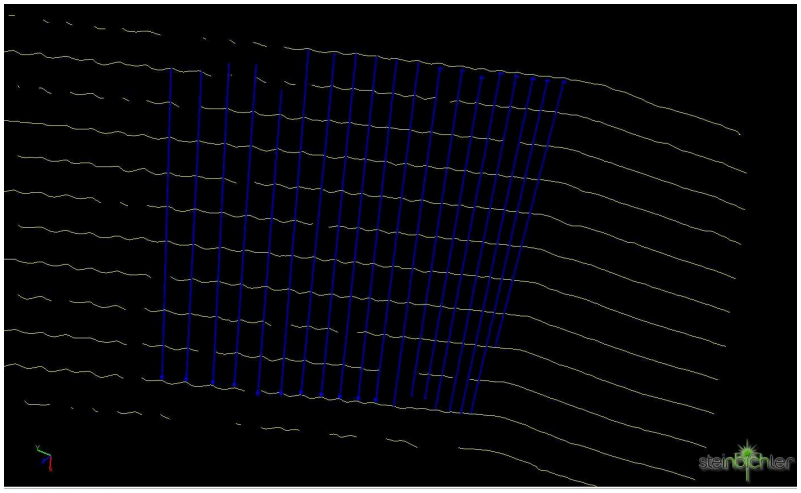


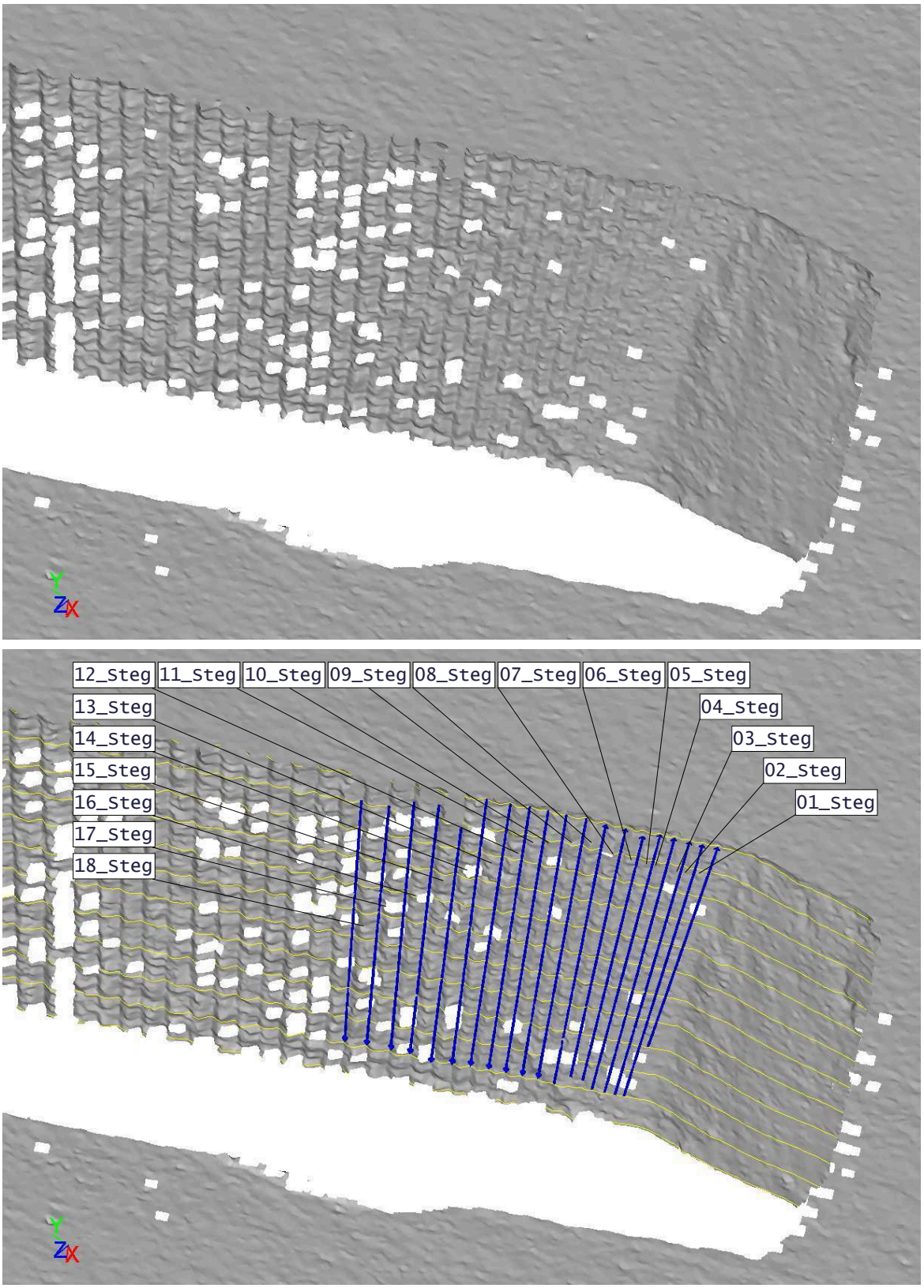
Abb. 304| Bildschirmfoto des durch Serienschnittlinien und Vektoren erzeugten Rasters zur Verortung der Messpunkte an deren Schnittpunkten. Das Dreiecksnetz der Einzelaufnahme ist derweil ausgeblendet.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter

Objekt	Schulp
Benennung	Stegbreite_Einzelansicht
Datum	21.08.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

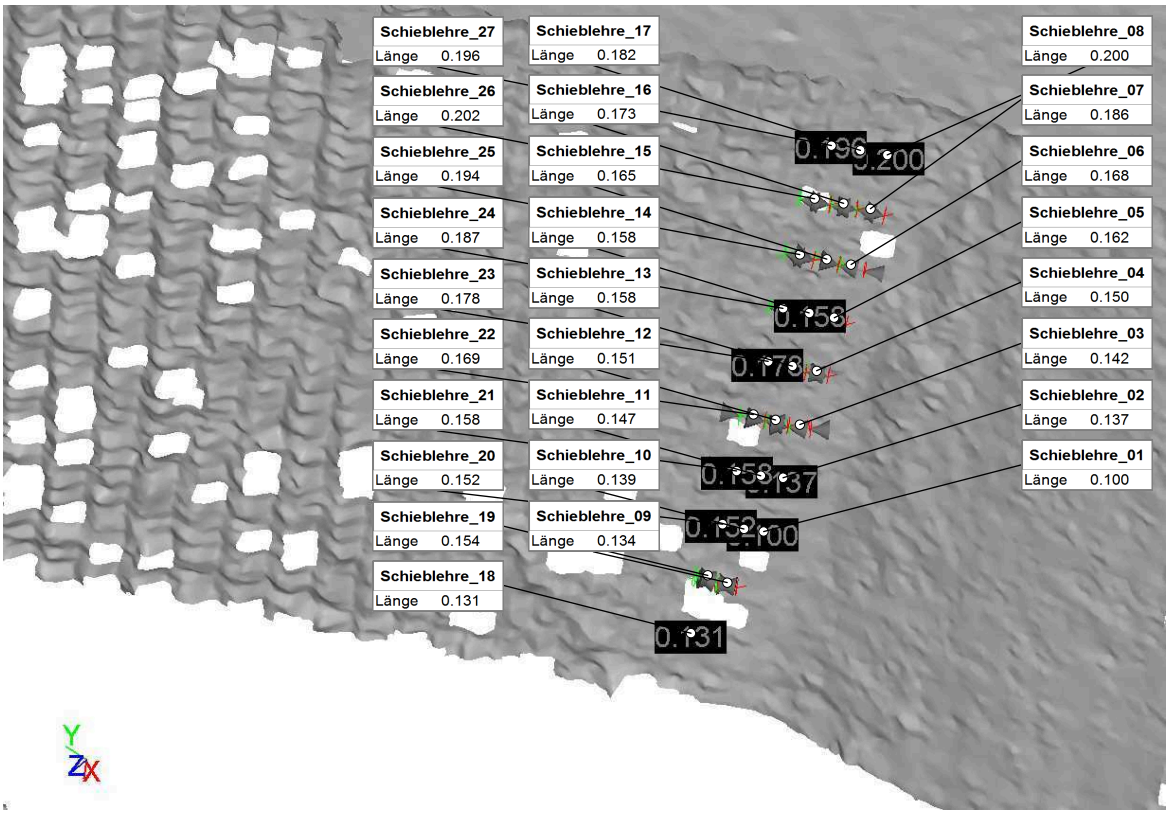
	Anzahl Messungen	1/
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	345
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlände der Dreiecke (mm)	0,0500
	Anzahl Knotenpunkte	790.935
	Anzahl Dreiecke	1.544.208
	Oberfläche (mm^2)	1.337.453

Tab. 98| Metadaten zum Objekt: 'Schulp'.
Quelle: Selbst



Objekt:	Schulp_02	
Benennung:	Stegbreite_Einzelaufnahme	
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter: Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum: 21.08.2013
3D_artscan		Seite 1 von 5

Abb. 305| Wiedergabe der Protokollseite 1 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Schulp'. Quelle: Selbst



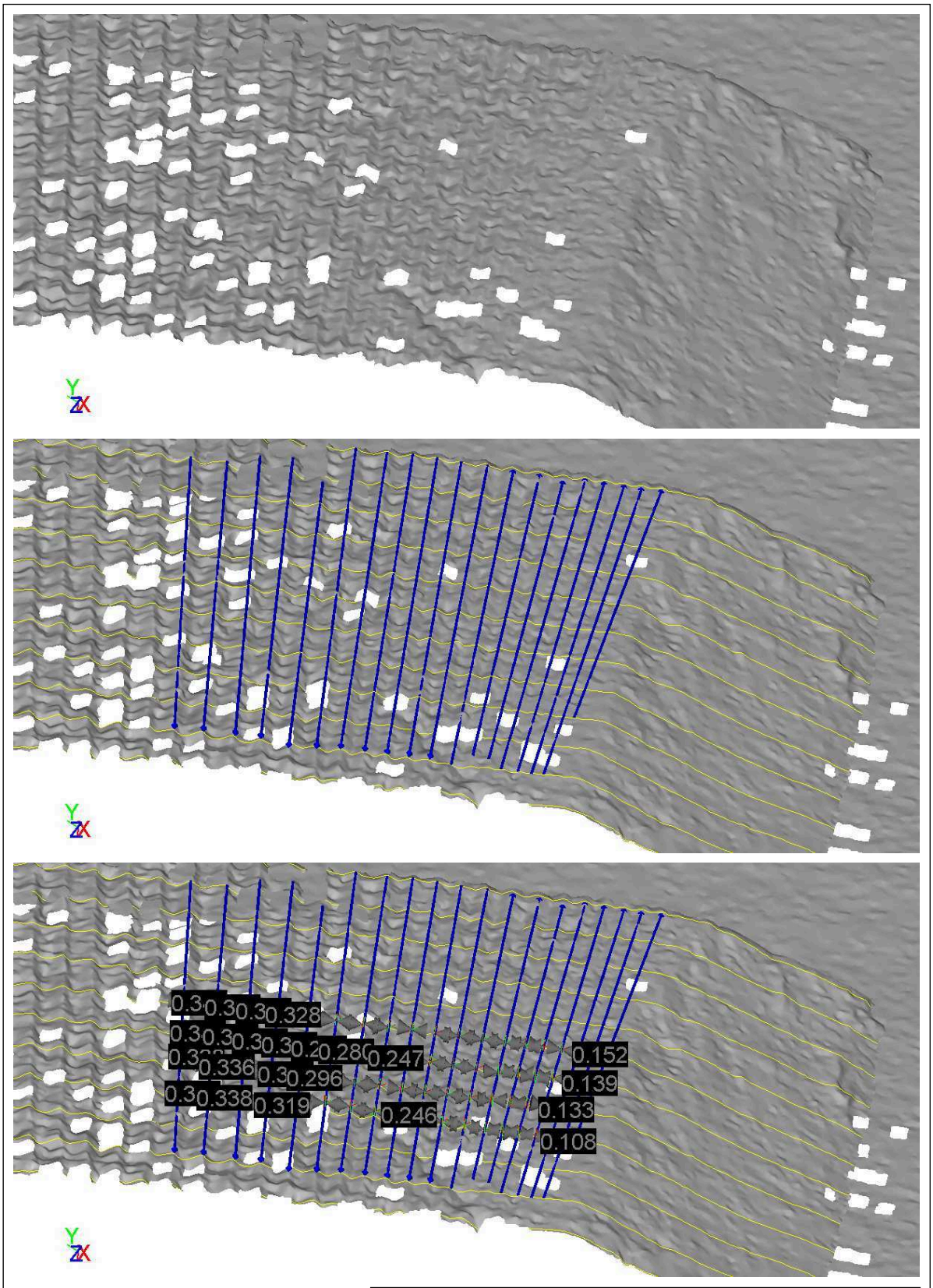
Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_18	Länge	0.131
Schieblehre_19	Länge	0.154
Schieblehre_20	Länge	0.152
Schieblehre_21	Länge	0.158
Schieblehre_22	Länge	0.169
Schieblehre_23	Länge	0.178
Schieblehre_24	Länge	0.187
Schieblehre_25	Länge	0.194
Schieblehre_26	Länge	0.202
Schieblehre_27	Länge	0.196

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_09	Länge	0.134
Schieblehre_10	Länge	0.139
Schieblehre_11	Länge	0.147
Schieblehre_12	Länge	0.151
Schieblehre_13	Länge	0.158
Schieblehre_14	Länge	0.158
Schieblehre_15	Länge	0.165
Schieblehre_16	Länge	0.173
Schieblehre_17	Länge	0.182

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	0.100
Schieblehre_02	Länge	0.137
Schieblehre_03	Länge	0.142
Schieblehre_04	Länge	0.150
Schieblehre_05	Länge	0.162
Schieblehre_06	Länge	0.168
Schieblehre_07	Länge	0.186
Schieblehre_08	Länge	0.200

Objekt: Schulp_02 Benennung: Stegbreite_Einzelaufnahme	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 2 von 5

Abb. 306| Wiedergabe der Protokollseite 2 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Schulp'. Quelle: Selbst



Objekt: Schulp_02 Benennung: Stegbreite_Einzelaufnahme	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 3 von 5

Abb. 307| Wiedergabe der Protokollseite 3 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Schulp'. Quelle: Selbst

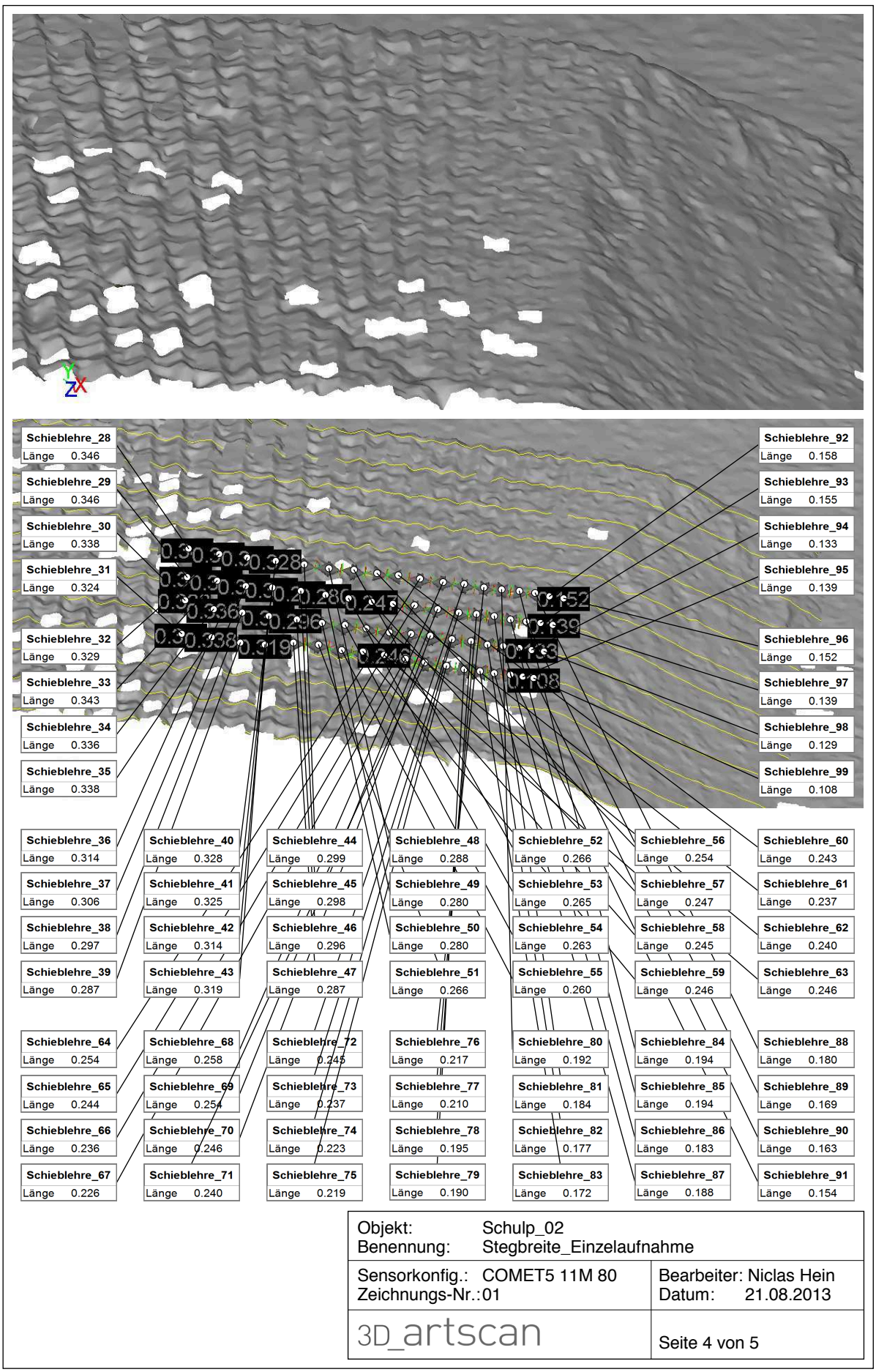
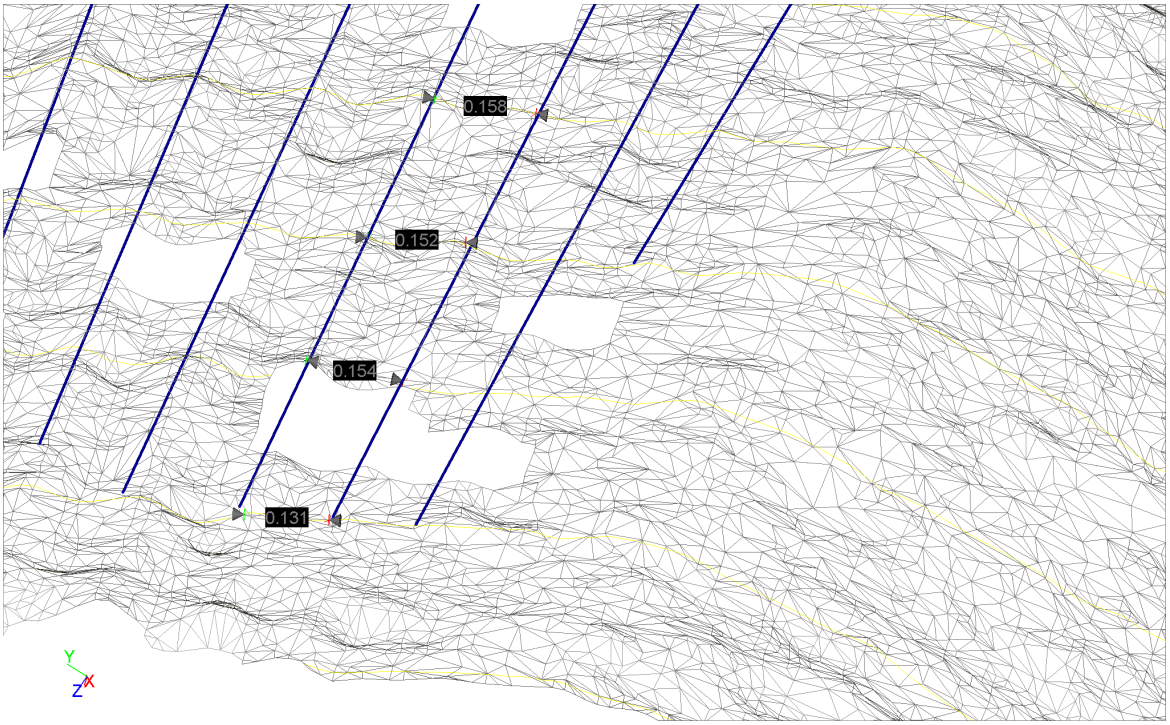


Abb. 308| Wiedergabe der Protokollseite 4 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Schulp'. Quelle: Selbst

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_28	Länge	0.346
Schieblehre_29	Länge	0.346
Schieblehre_30	Länge	0.338
Schieblehre_31	Länge	0.324
Schieblehre_32	Länge	0.329
Schieblehre_33	Länge	0.343
Schieblehre_34	Länge	0.336
Schieblehre_35	Länge	0.338
Schieblehre_36	Länge	0.314
Schieblehre_37	Länge	0.306
Schieblehre_38	Länge	0.297
Schieblehre_40	Länge	0.328
Schieblehre_39	Länge	0.287
Schieblehre_41	Länge	0.325
Schieblehre_42	Länge	0.314
Schieblehre_43	Länge	0.319
Schieblehre_44	Länge	0.299
Schieblehre_45	Länge	0.298
Schieblehre_46	Länge	0.296
Schieblehre_47	Länge	0.287
Schieblehre_48	Länge	0.288
Schieblehre_49	Länge	0.280
Schieblehre_50	Länge	0.280
Schieblehre_51	Länge	0.266
Schieblehre_52	Länge	0.266

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_53	Länge	0.265
Schieblehre_54	Länge	0.263
Schieblehre_55	Länge	0.260
Schieblehre_56	Länge	0.254
Schieblehre_57	Länge	0.247
Schieblehre_58	Länge	0.245
Schieblehre_59	Länge	0.246
Schieblehre_60	Länge	0.243
Schieblehre_61	Länge	0.237
Schieblehre_62	Länge	0.240
Schieblehre_63	Länge	0.246
Schieblehre_64	Länge	0.254
Schieblehre_65	Länge	0.244
Schieblehre_66	Länge	0.236
Schieblehre_67	Länge	0.226
Schieblehre_68	Länge	0.258
Schieblehre_69	Länge	0.254
Schieblehre_70	Länge	0.246
Schieblehre_71	Länge	0.240
Schieblehre_72	Länge	0.245
Schieblehre_73	Länge	0.237
Schieblehre_74	Länge	0.223
Schieblehre_75	Länge	0.219
Schieblehre_76	Länge	0.217
Schieblehre_77	Länge	0.210

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_78	Länge	0.195
Schieblehre_79	Länge	0.190
Schieblehre_80	Länge	0.192
Schieblehre_81	Länge	0.184
Schieblehre_82	Länge	0.177
Schieblehre_83	Länge	0.172
Schieblehre_84	Länge	0.194
Schieblehre_85	Länge	0.194
Schieblehre_86	Länge	0.183
Schieblehre_87	Länge	0.188
Schieblehre_88	Länge	0.180
Schieblehre_89	Länge	0.169
Schieblehre_90	Länge	0.163
Schieblehre_91	Länge	0.154
Schieblehre_92	Länge	0.158
Schieblehre_93	Länge	0.155
Schieblehre_94	Länge	0.133
Schieblehre_95	Länge	0.139
Schieblehre_96	Länge	0.152
Schieblehre_97	Länge	0.139
Schieblehre_98	Länge	0.129
Schieblehre_99	Länge	0.108



Objekt: Schulp_02 Benennung: Stegbreite_Einzelaufnahme	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 5 von 5

Abb. 309| Wiedergabe der Protokollseite 5 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Schulp'. Quelle: Selbst

Verifizierung der Ergebnisse von 'COMET 5 11M 80' an 'Schulp'

Wie angekündigt werden die Daten auf ihre Verifizierbarkeit hin geprüft. Hierfür wird das Präparat mit einem Digitalmikroskop untersucht und die Stegzwischenräume quantifiziert (►Tab. 99| und Abb. 310|).[745] Da diese verifizierende Erhebung an den Projektpartner ausgelagert wurde, sind die Messpunkte nicht in den gleichen, engen Intervallen vorgenommen worden wie die eigenen. Aufgrund des bekannten Abstandes der Hilfslinien bei der 3D-Aufnahme und der Verortung des ersten Messpunktes (Abstand zur Kante des Präparates: 1,500 mm), können die Messpunkte der digitalmikroskopischen Aufnahme jedoch örtlich referenziert werden.[746] Die Gegenüberstellung der Daten erfolgt in ►Tab. 100|. Unter Eingrenzung auf jene Ergebnisse von 'COMET 5 11M 80', für die es ein Äquivalent aus der digitalmikroskopischen Bestimmung gibt, kann im Mittelwert eine Abweichung der Messschieberlängen von 0,021 mm festgehalten werden. Hierbei besteht eine Spannweite von 0,028 mm, was wiederum Rückschlüsse über eine vorhandene Streuung gewährt. Fernerhin ist darauf hinzuweisen, dass in Bezug auf den kleinstmöglichen Strukturunterschied, der an der 3D-Aufnahme nachzuweisen ist und über 'Schieblehre_01' ausgedrückt wird, gegenüber dem Äquivalent, repräsentiert von 'Messung_1d', eine Abweichung von 0,007 mm besteht. Die eigenen Ergebnisse gelten damit als verifiziert.

	a.) Messfeld Oben [µm]	b.) Messfeld Mitte/oben [µm]	c.) Messfeld Mitte/unten [µm]	d.) Messfeld Unten [µm]
Messung_1	141,43	115,58	120,61	107,48
Messung_2	166,58	125,02	120,26	111,75
Messung_3	173,04	134,68	142,44	145,80
Messung_4	194,02	164,14	156,74	150,43
Messung_5	168,62	152,23	165,61	180,74
Messung_6	213,01	163,02	182,07	169,07
Messung_7	229,62	190,75	186,55	178,59
Messung_8	250,16	193,48	199,75	200,54
Messung_9	265,21	251,05	239,57	250,27
Messung_10	267,09	248,00	235,35	243,42
Messung_11	258,83	241,68	218,48	210,47
Messung_12	223,69	237,23	244,52	212,54
Messung_13	261,01	241,17	242,64	233,75
Messung_14	225,84	271,51	272,73	267,22
Messung_15	324,50	258,01	287,78	289,89
Messung_16	343,18	281,28	318,63	300,13
Messung_17	298,63	280,15	283,91	309,32
Messung_18	364,42	349,00	306,05	297,87

Tab. 99| Bestimmung der Stegzwischenräume durch das 'KEYENCE-Mikroskop'. Die Wiederholungsrate dieser Messungen erfolgte nicht in den gleichen Abständen wie die eigenen Serienschnittlinien. Daher werden für die weitere Berechnung lediglich die Daten von Messfeld 'b.)' und Messfeld 'd.)' berücksichtigt. Vergleiche hierzu auch Abb. 310|.
Quelle: Daniel Claus, selbst bearbeitet

745 Zur Bestimmung der feinen Stegzwischenräume wird ein Digitalmikroskop der Firma ‚KEYENCE' (Modell: VH-Z100UR) verwendet. Die Messungen entstehen in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner ‚ITO' im Labor der Universität Stuttgart Vahingen – dankenswerter Weise und namentlich: Daniel Claus. Zu den Mikroskopspezifika vergleiche: Ohne Verf. (Keyence GmbH), 2013

746 Die korrelierenden Messpunkte beider Aufnahmen ergeben sich durch den Vergleich der Aufnahmen aus dem Messprotokoll der Streifenprojektion (►Abb. 298| - Abb. 309|) und den Mikroskopfotos mit eingezeichneten Hilfslinien (►Abb. 310|). Bei Letztgenanntem sind die Messpunkte anders gegliedert als bei der eigenen Erhebung. Die vier Mikroskopaufnahmen sind von oben nach unten alphabetisch benannt. Ihre Stege sind entgegen der Leserichtung mit der Ziffernfolge eins bis achtzehn belegt.

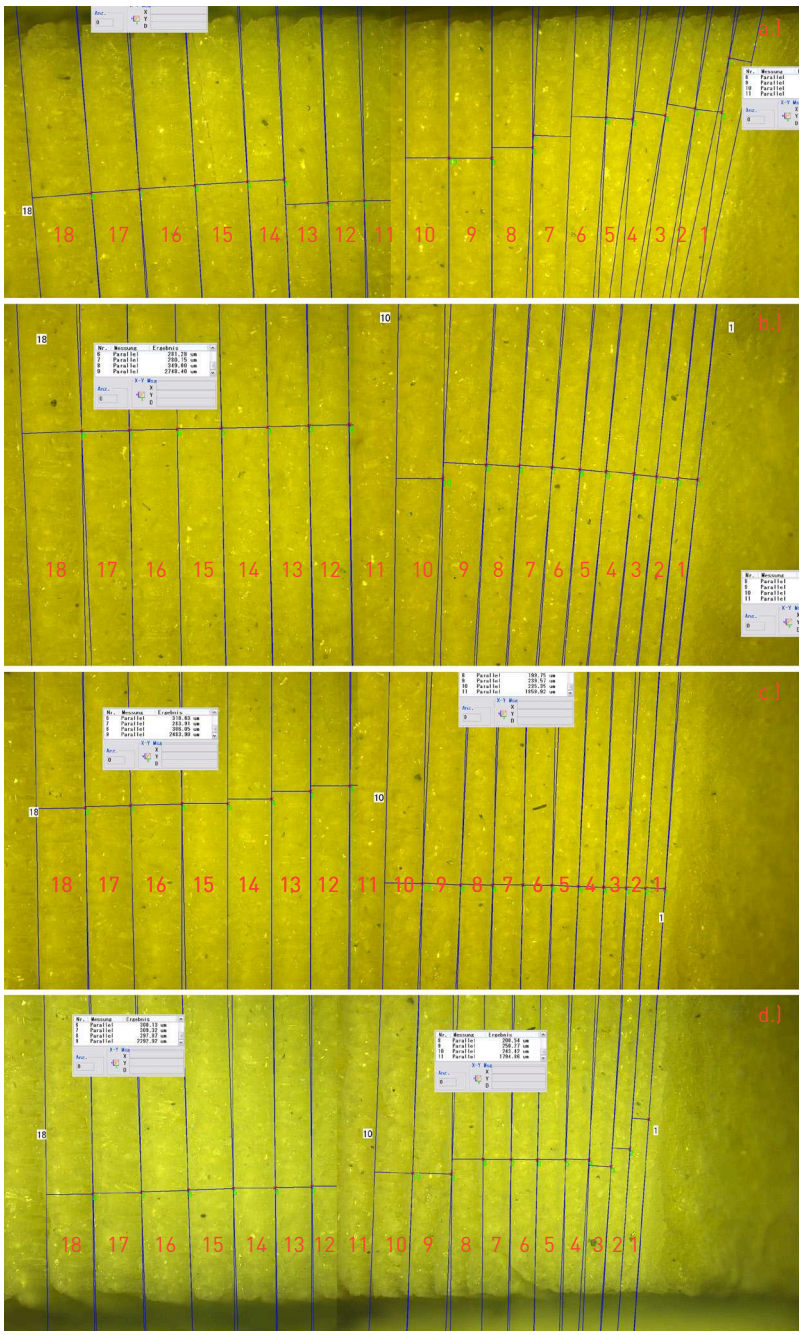
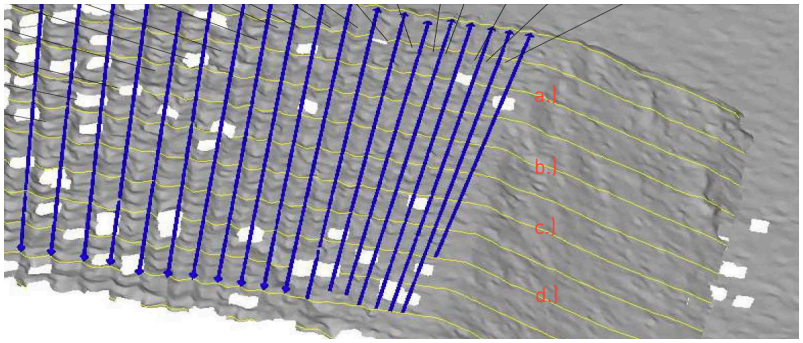
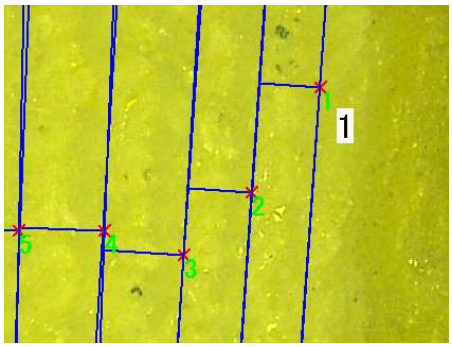


Abb. 310| Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Messungen sind die digitalmikroskopischen Aufnahmen zusammen montiert, sodass sie der Ansicht des Präparates von Abbildung 302 entsprechen. Nebenstehend die Vergrößerung eines Bildausschnitt der digitalmikroskopischen Aufnahme. Die kleinen roten Kreuze stehen jeweils für den Endpunkt eines virtuellen Messschiebers – hingegen grün nummeriert die Stegnummern. Auf der gezeigten 3D-Aufnahme ist zudem die Lage der Mikroskopaufnahmen durch Buchstaben hervorgehoben.
Quelle: Daniel Claus, selbst bearbeitet





Messergebnisse 'COMET5 11M 80'		Gruppierung Messschieber	Verifizierende Messung 'KEYENCE VH-Z100UR'		Abweichung Messschieber 'COMET 5 11M 80' und 'KEYENCE VH-Z100UR' (mm)
	Länge (mm)		Position Messschieber 'Messung_d', 'Messung_b'	Länge (mm)	
Schieblehre_01	0,100	01_Steg	Messung_1d	0,107	0,007
Schieblehre_02	0,137				
Schieblehre_03	0,142		Messung_1b	0,116	0,026
Schieblehre_04	0,150				
Schieblehre_05	0,162				
Schieblehre_06	0,168				
Schieblehre_07	0,186				
Schieblehre_08	0,200				
Schieblehre_09	0,134	02_Steg			
Schieblehre_10	0,139		Messung_2d	0,112	0,027
Schieblehre_11	0,147				
Schieblehre_12	0,151		Messung_2b	0,125	0,026
Schieblehre_13	0,158				
Schieblehre_14	0,158				
Schieblehre_15	0,165				
Schieblehre_16	0,173				
Schieblehre_17	0,182				
Schieblehre_18	0,131	03_Steg			
Schieblehre_19	0,154				
Schieblehre_20	0,152		Messung_3d	0,146	0,006
Schieblehre_21	0,158				
Schieblehre_22	0,169		Messung_3b	0,135	0,034
Schieblehre_23	0,178				
Schieblehre_24	0,187				
Schieblehre_25	0,194				
Schieblehre_26	0,202				
Schieblehre_27	0,196				
				Mittelwert	0,021
				Spannweite	0,028

Tab. 100| Die ermittelten Breiten der Stegzwischenräume, gruppiert nach ihrer Stegzugehörigkeit. 'Schieblehre_01' bis 'Schieblehre_27' *) werden den Längen der Messung mit dem Digitalmikroskop gegenübergestellt (►Tab. 99|) – wobei nur die korrespondieren Messschieber berücksichtigt werden.
Quelle: Selbst

*) Die weiteren Messschieber, die im Protokoll ersichtlich sind ('Schieblehre_28' bis 'Schieblehre_99') kommen von einer weiteren Messung zur Verifikation der Auswertungsstrategie. Diese Daten bleiben hierorts jedoch unberücksichtigt.

Qualitative und quantitative Einschätzung der Ergebnisse am Prüfgegenstand 'Schulp'

Generell kann anhand der großen Übereinstimmung der Werte der beiden Messreihen belegt werden, dass mit 'COMET 5 11M 80' und der Auswertungsstrategie reproduzierbare Daten von hoher Güte erzeugt werden können. Gleichwohl ist darauf hinzuweisen, dass die nachgewiesenen Strukturen und die davon abgeleitete Geringfügigkeitsgrenze mit ca. 0,100 mm höher ist als der herstellerseitig angegebene Punktabstand. Hierbei ist jedoch entscheidend, dass die detektierten Stege als solche nur dann voneinander unterschieden werden können, wenn zwischen ihnen weitere Messpunkte liegen. Diese definieren letztlich den Zwischenraum. Ein entsprechender Blick auf die 3D-Aufnahme in ihrer Darstellung als Gittermodel bestätigt diesen Sachverhalt (►Abb. 311|). So befinden sich zwischen den gerade noch voneinander unterscheidbaren feinen Stegstrukturen mehrere Knotenpunkte. Hierdurch offenbart sich der Antagonismus zwischen der Auflösungsgrenze realer Strukturen und dem Punktabstand. Gleichwohl erscheint vor diesem Hintergrund der vom Hersteller angegebene Punktabstand von 0,018 mm (►Tab. 16|) der Größenordnung nach plausibel zu sein. Die eigenen Erhebungen belegen, veranschaulicht durch ►Abb. 311|, dass im Areal der Nachweisgrenze zwischen den Hochpunkten der Stege ca. vier weitere Messpunkte verortet sind. Ableitungen, die als Basis von einer Auflösungsgrenze um 0,100 mm ausgehen und zur Angabe des theoretischen Punktabstandes diesen Wert um Faktor vier verkleinern, sind daher legitim.

Ungeachtet dieser Ausführungen ist den mikroskopischen Fotos nach zu urteilen (►Abb. 302| und Abb. 310|), dass das Schulp-Präparat weitaus feiner strukturiert ist, als es vom 'COMET-System' wiedergegeben werden kann. Lateral reichen die Stege bis zur keilförmigen rechten Kante des Präparates. Die Betrachtung der Streifenprojektionsaufnahme an der entsprechenden Stelle belegt jedoch, dass nach rein optischen Kriterien die Stege hier nicht mehr aufgelöst werden können (►Abb. 305|). Als Fazit dieser Versuchsreihe wird festgehalten, dass mit der Sensorkonfiguration 'COMET 5 11M 80' reale Strukturunterschiede bis in die Größenordnung um 0,100 mm zuverlässig aufgelöst und quantitativ bestimmt werden können.

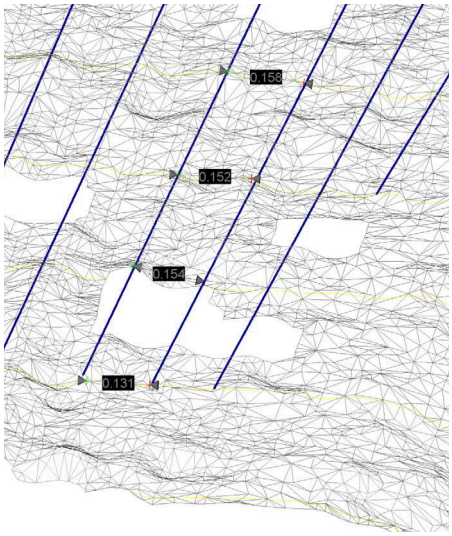


Abb. 311| Bildschirmfoto zur Verteilung der Messpunkte bei der fein strukturierten Oberfläche am Untersuchungsgegenstand 'Schulp'. Im Bereich der Nachweisgrenze wird die Stregbreite mit 0,100 mm quantifiziert. Gemäß dieser Abbildung kann belegt werden, dass sich im Zwischenraum der Stege weitere Messpunkte befinden. An der kleinstmöglichen auflösbaren Stelle befinden sich hier ca. vier Knotenpunkte, womit der Punktabstand mathematisch in die Größenordnung >0,025 mm fällt.
Quelle: selbst

29.15 Praxiserprobung zur Auflösung von Strukturen am Original – 'COMET 5 11M 80'

Zur Evaluierung der Leistungsfähigkeit der hochauflösenden Sensorkonfiguration soll eine weitere Systemerprobung an einem Prüfgegenstand vorgenommen werden – dieses Mal mit dem Stellenwert eines Originals. Es handelt sich um eine 'Druckplatte' aus Metall mit zwei abgebildeten Stühlen (►Abb. 312|).[747] Dieses Objekt kennzeichnet sich einerseits durch feine Ätzungen unterschiedlich dimensionierter punktueller Vertiefungen (►Abb. 313|). Andererseits weist es lineare Strukturen in Form von Kratzern auf (►Abb. 314|). Zur

747 Entworfen von ‚Jens Risom', Modell ‚Vostra', für ‚Walter Knoll'.Vergleiche: Ohne Verf. (Walter Knoll AG & Co. KG), 2015

Bewertung der Praxistauglichkeit sollen die Strukturen hinsichtlich ihrer axialen Tiefeninformationen und ihrer lateralen Merkmalsausprägungen hin untersucht werden. Dieses umfasst neben der grundsätzlichen Nachweisführung über eine Bildgebung zugleich auch ihre Quantifizierung. Abermals werden die Ergebnisse mit der Mikro-Streifenprojektion verifiziert.

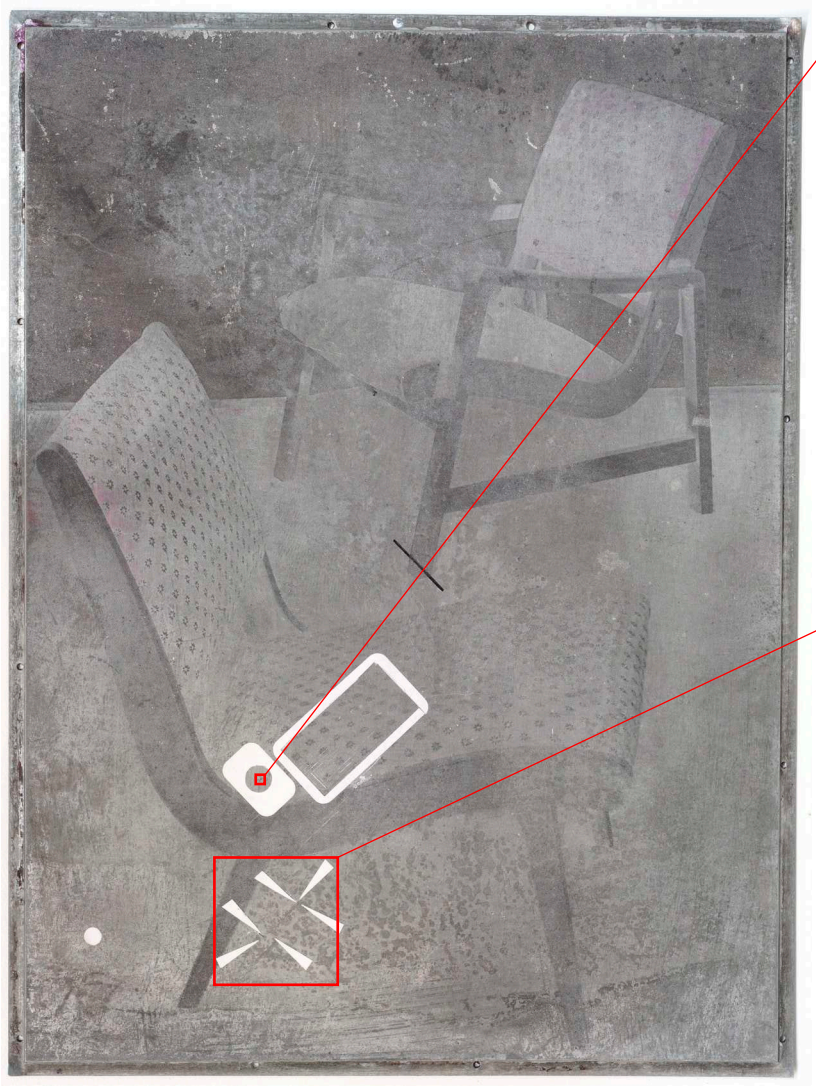


Abb. 312| Foto der 'Druckplatte' von Walter Knoll.
Quelle: Selbst

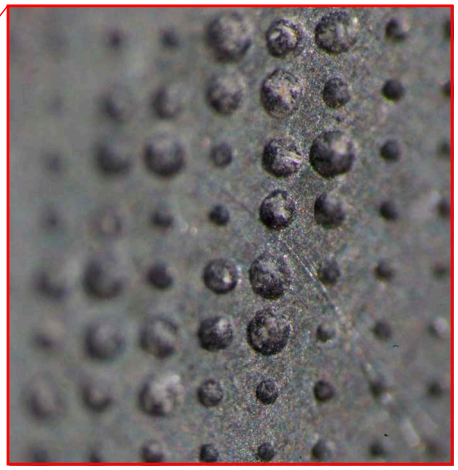


Abb. 313| Mikroskopische Aufnahme der eingeätzten Struktur.
Quelle: Selbst

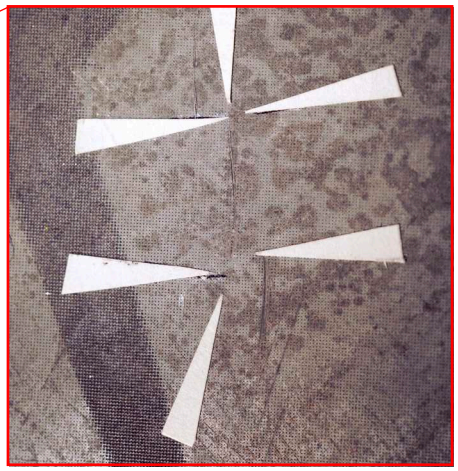


Abb. 314| Abbildung 323 Makroaufnahme des Kratzers.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Druckplatte', Kratzer

Auf der Oberfläche der Druckplatte befinden sich zahlreiche Kratzer von denen einer untersucht werden soll. Die Auswahl erfolgt nach optischen Merkmalen – eine Heterogenität in Bezug auf die Kratzerbreite und -tiefe. So ist einerseits der Nachweis eindeutiger Merkmale geplant, als auch andererseits solcher nahe der Auflösungsgrenze. Darüber hinaus muss sein Verlauf orthogonal zum Ätzraster ausgerichtet sein. Letzteres wird aufgrund seiner repetitiven Erscheinung später als Bezugspunkt für die Positionierung von Schnittlinien, virtuellen Messschiebern und für die verifizierende Messung genutzt. Nach der Selektion eines geeigneten Kratzers wird sein Anfangs- und Endpunkt unter dem Stereomikroskop bestimmt und dort mit Markierungen

versehen (►Abb. 314|). Im Folgenden kann überprüft werden, ob der Kratzer der Länge nach aufzulösen ist. Die Digitalisierung der betreffenden Stelle erfolgt im hochauflösenden Modus über eine Einzelaufnahme.[748]

Auswertung: 'Druckplatte', Kratzer

Für die Auswertung wird zunächst die 3D-Aufnahme ausgerichtet, sowie mit sich rechtwinkelig kreuzenden Serienschnittlinien versehen. Diese folgen dem Ätzraster kantenparallel und kennzeichnen sich durch eine Rasterweite von 0,3 mm.[749] Dieses Raster dient später als Hilfestellung zur Positionierung virtueller Werkzeuge.
In einem ersten Schritt der Auswertung wird die Länge des Kratzers über einen virtuellen Messschieber bestimmt ('Schieblehre_17'). In einem zweiten Arbeitsschritt wird die Rissbreite ermittelt. Hierzu sind in einer Wiederholungsrate von 0,6 mm, was jeder zweiten Schnittlinie entspricht, virtuelle Messschieber positioniert. Anfangs-, bzw. Endpunkte der Messschieber entsprechen hierbei dem Gefälleübergang der unbeschädigten, planen Oberfläche zum davon abweichenden Niveauunterschied, der sich durch die Vertiefung des Kratzers ergibt. In einem dritten Schritt wird die Tiefeninformation des Kratzers ermittelt. Hierfür wird zunächst im Bereich des Kratzers eine virtuelle Ausgleichsebene erstellt. Diese ist für die unbeschädigte, plane Oberfläche repräsentativ und muss zugleich die Oberflächenpunkte in den Vertiefungen der geätzten Strukturen ausschließen. Von dieser Ebene ausgehend werden dann, im rechten Winkel, virtuelle Messschieber auf die Sohle des Kratzers gerichtet. Die Messschieber quantifizieren damit seine Tiefe (►Abb. 318| und Abb. 319|, 'Schieblehre_90' bis 'Schieblehre_104').

Ergebnis: 'Druckplatte', Kratzer

Bei der Bestimmung der Länge des Kratzers offenbarten sich Schwierigkeiten. So ist der zur Oberfläche hin auslaufende Bereich nicht zweifelsfrei zu bestimmen. Die Eindeutigkeit des Kratzers verliert sich bei der 3D-Aufnahme und wird zudem vom Messrauschen überlagert. Auffällig ist hierbei, dass der auf diese Weise ermittelte Kratzer kürzer ist als der welcher zuvor mithilfe des Mikroskops und den Markierungen bestimmt werden konnte.[750] Zudem ist daraufhin zu weisen, dass die exakte Bestimmung struktureller Merkmale in Abhängigkeit zu den Parametern der Datennachverarbeitung, dem Darstellungsmodus, dem Blickwinkel im 'Viewer' und/oder der Ausleuchtung der 3D-Daten steht. Insbesondere diese subjektiven Aspekten können die Merkmalsidentifikation, ergo die Messdaten, erheblich beeinflussen. Das berücksichtigend, ist der Endpunkt des Kratzers im Dreiecksnetz so bestimmt worden, dass er nach optischen Kriterien markant und reproduzierbar ist. Die Länge des Kratzers wird

748 Abweichend zu den restlichen Ansichten des Protokolls handelt es sich bei der ersten Darstellung um die Visualisierung eines aus mehreren Einzelansichten bestehenden virtuellen Modelsl. Die übrigen Abbildungen wurden aus einem Einzeldatensatz generiert.

749 Die Repetition wird so gewählt, dass die Serienschnittlinien auf den Ätzpunkten liegen und nicht im Zwischenraum.

750 Vergleiche hierzu die rote Markierung im Protokoll, Seite 2 f.

mit 5,137 mm quantifiziert. Die Unsicherheit der Kratzerlänge, die mit der vergleichsweisen unpräzisen Bestimmung des Endpunktes verbunden ist, wird aus Autorensicht mit der Varianz von ±0,3 mm eingeschätzt. Ein entsprechender Rückschluss ist anhand der Schrittweite zweier Serienschnittlinien möglich.

Auch bei der Bestimmung der Breite des Kratzers sind Unsicherheitsfaktoren zu benennen. Beim Digitalisat kennzeichnen sich die Übergänge nicht scharf konturiert sondern fließend. Die Realsituation offenbart hingegen einen deutlichen Grat, der den Kratzer säumt. Dieser ist am Digitalisat jedoch kaum wahrnehmbar, wobei im konkreten Fall zuvor eine Sensibilisierung durch eine mikroskopische Betrachtung erfolgte, die unterbewusst sicherlich eine Rolle spielte (►Abb. 318|, rote Markierung). Ungeachtet dessen folgern hieraus Schwierigkeiten, die sich in einer unzweifelhaften und reproduzierbaren Positionierung der Messschieber ausdrücken. Dies erklärt zudem auch die auffällige Varianz der Messschieberlängen (‘Schieblehre_01’ bis einschließlich ‘Schieblehre_16’), die den Riss in seiner Breite quantifizieren. Gemäß ►Tab. 101| wird die Breite des Kratzers im Mittel mit 0,143 mm angegeben. Dabei bestehen Extremwerte im Minimum mit 0,069 mm und im Maximum mit 0,236 mm. Hypothetisch müssten die Messschieberlängen analog ihrer zunehmenden Nummernfolge kürzer werden, da der Kratzer insbesondere zu Beginn und in seiner Mitte vergleichsweise tief und breit ist (‘Schieblehre_01’), sich an seinem Ende entgegen verjüngt und schlussendlich gänzlich ausläuft (‘Schieblehre_16’). Diese Vermutung kann an den selbst erhobenen Daten der Tendenz nach belegt werden, wobei Ausreißer bestehen.

Grundsätzlich ist bei der Bestimmung der Tiefe des Kratzers ebenso auf Unsicherheiten hinzuweisen. Diese begründen sich aus der Auswertungsmethode. So können die objektimmanenten Vertiefungen, von der Ätzung herrührend, nicht zweifelsfrei von Erscheinungen abgegrenzt werden, die vom Messrauschen hervorgerufen sind (►Abb. 318|). Damit ist die Ausgleichsebene nicht zwangsläufig eindeutig repräsentativ für die Oberfläche ohne Ätzungen. Vielmehr entspricht sie lediglich einer Annäherung. Quantitativ kann die Tiefe des Kratzers im Mittel mit 0,010 mm bestimmt werden. Das Minimum wird mit 0,004 mm und das Maximum mit 0,024 mm quantifiziert. Die Reihenfolge der Messschieber lässt, ihrer Länge nach zu urteilen, keine Rückschlüsse über einen konstanten, linearen Anstieg der Sohle des Kratzers zu. Dieses widerspricht dem Ergebnis der stereomikroskopischen Untersuchung. Gewissheit wird sich hier von der folgenden, verifizierenden, hochauflösenden Messung mit der Mikro-Streifenprojektion erhofft.

Lateral	Länge (mm)
Schieblehre_01	0,193
Schieblehre_02	0,236
Schieblehre_03	0,203
Schieblehre_04	0,177
Schieblehre_05	0,192
Schieblehre_06	0,138
Schieblehre_07	0,159
Schieblehre_08	0,117
Schieblehre_09	0,131
Schieblehre_10	0,133
Schieblehre_11	0,123
Schieblehre_12	0,124
Schieblehre_13	0,107
Schieblehre_14	0,121
Schieblehre_15	0,070
Schieblehre_16	0,069
Mittelwert	0,143

Schieblehre_17	5,137

Axial	Länge (mm)
Schieblehre_90	0,006
Schieblehre_91	0,006
Schieblehre_92	0,024
Schieblehre_93	0,016
Schieblehre_94	0,014
Schieblehre_95	0,007
Schieblehre_96	0,006
Schieblehre_97	0,008
Schieblehre_98	0,009
Schieblehre_99	0,012
Schieblehre_100	0,011
Schieblehre_101	0,007
Schieblehre_102	0,014
Schieblehre_103	0,005
Schieblehre_104	0,004
Mittelwert	0,009

Tab. 101| Tabelle mit den ermittelten Längenangaben zur Bestimmung der Breite, Tiefe und Länge des Kratzers.
Quelle: Selbst

Metadaten und Messparameter	
Objekt	Druckplatte_Knoll (Vostra)
Benennung	Vermessung_Kratzer/Ätzung
Datum	21.08.2013
Sensorkonfig.	COMET 5 11M 80

	Anzahl Messungen	1/
	Matchingstrategie	Freies Fl.m.
	Messwinkel	60°
Punktwolke	Belichtungseinstellungen	
	Messbild	730
	Belichtungsfusion	Aus
	1. Messbild	-
	2. Messbild	-
	3. Messbild	-
	Kamerakonfiguration	HiRes
	NCS-Mode	off
	Experteneinstellungen	
	Qualität	HighQuality
	Streifenqualität	10
	Gradient X	70,00
	Gradient Y	70,00
Dreiecksnetz	Autom. Datennachverarbeitung (Dreiecksnetz berechnen)	
	Zulässige Toleranz für die Vorausdünnung (mm)	0,0018
	Zulässige Toleranz für die Rauschreduzierung (mm)	0,0036
	Zulässige Toleranz für die Ausdünnung (mm)	0,0018
	Max. Kantenlänge der Dreiecke (mm)	0,0500
	Anzahl Knotenpunkte	(4.419.267)
	Anzahl Dreiecke	(8.780.914)
	Oberfläche (mm^2)	(3.944.514)

Tab. 102| Metadaten zur Digitalisierung ‚Druckplatte', laterale Kratzerausprägung. Quelle: Selbst

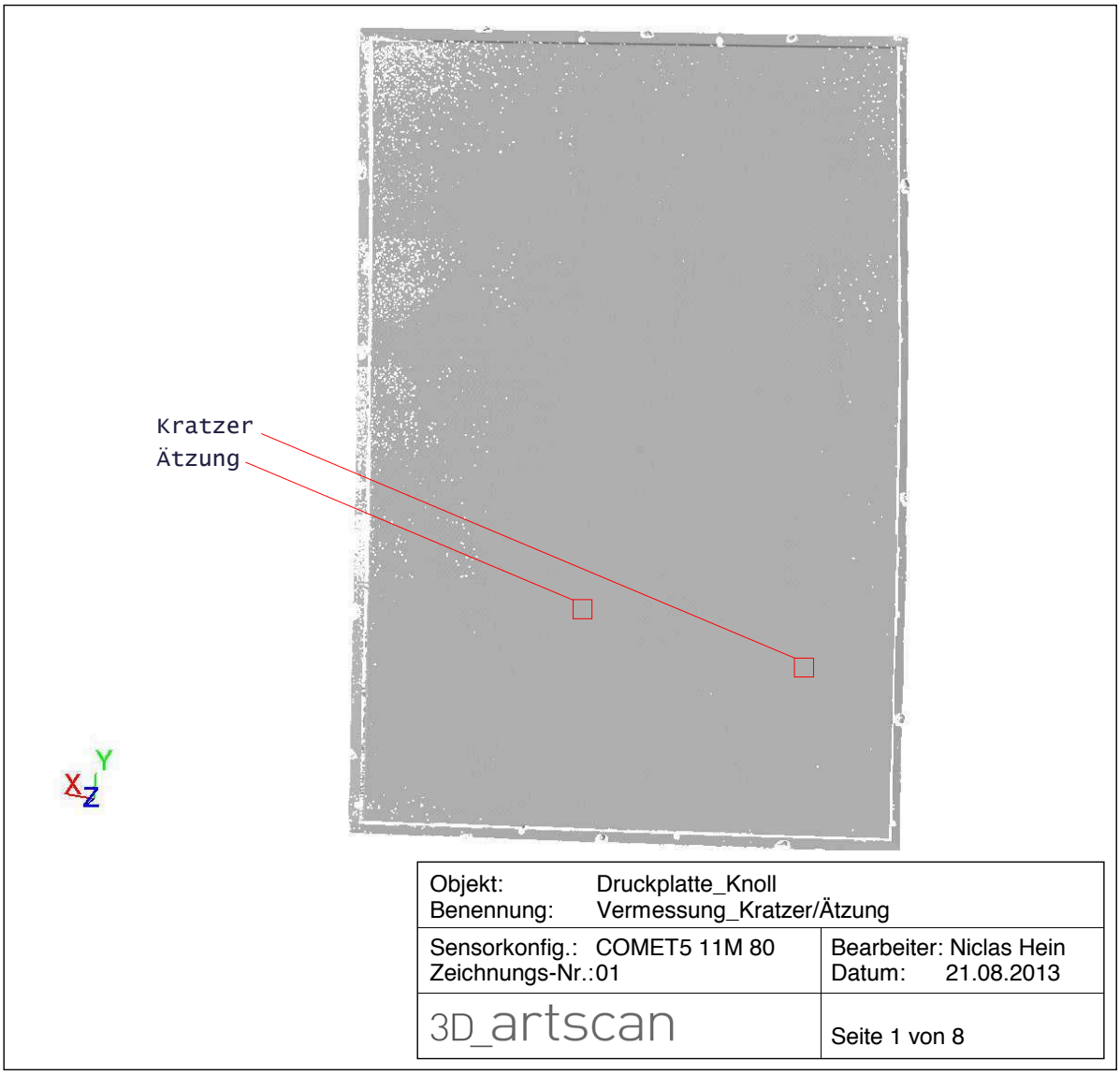
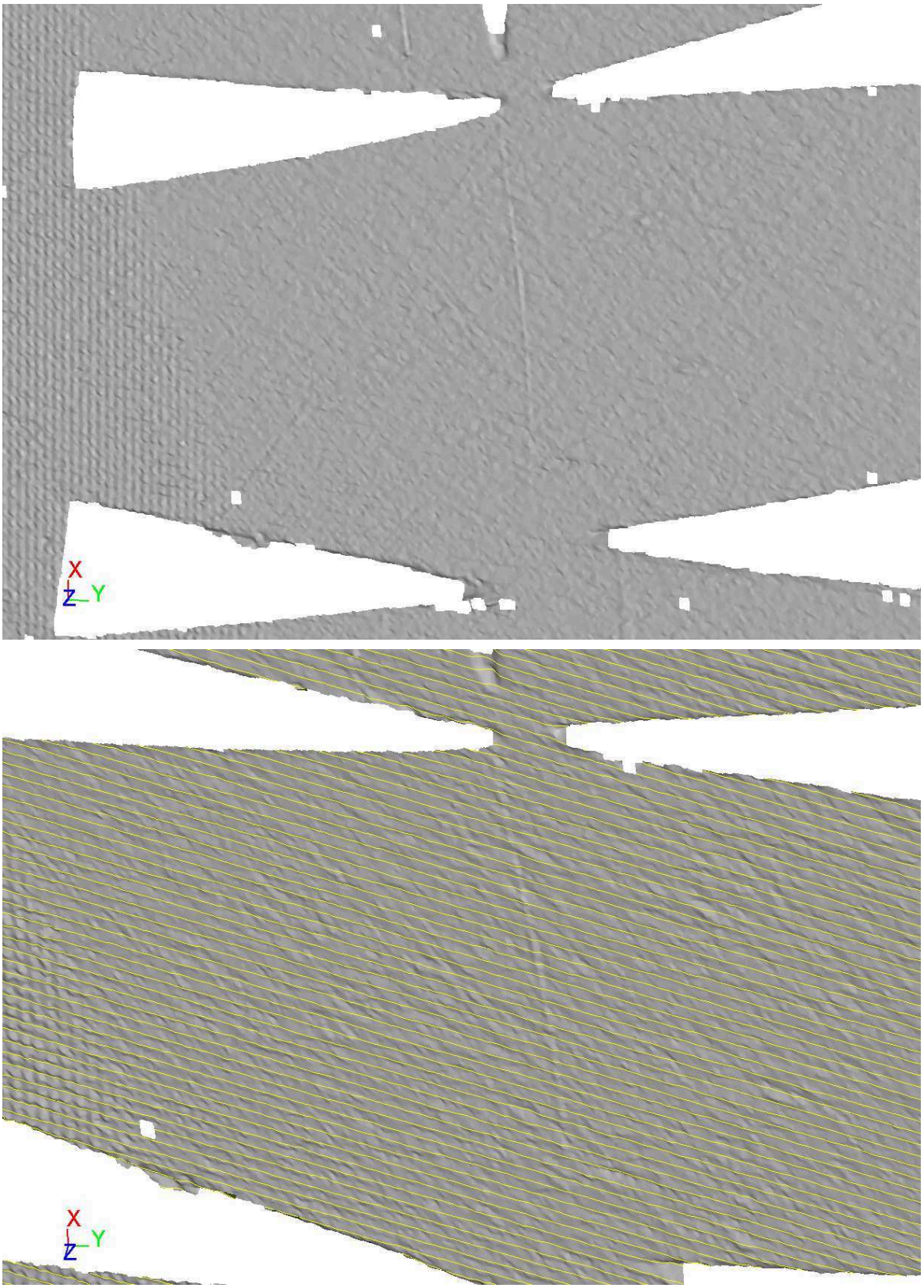
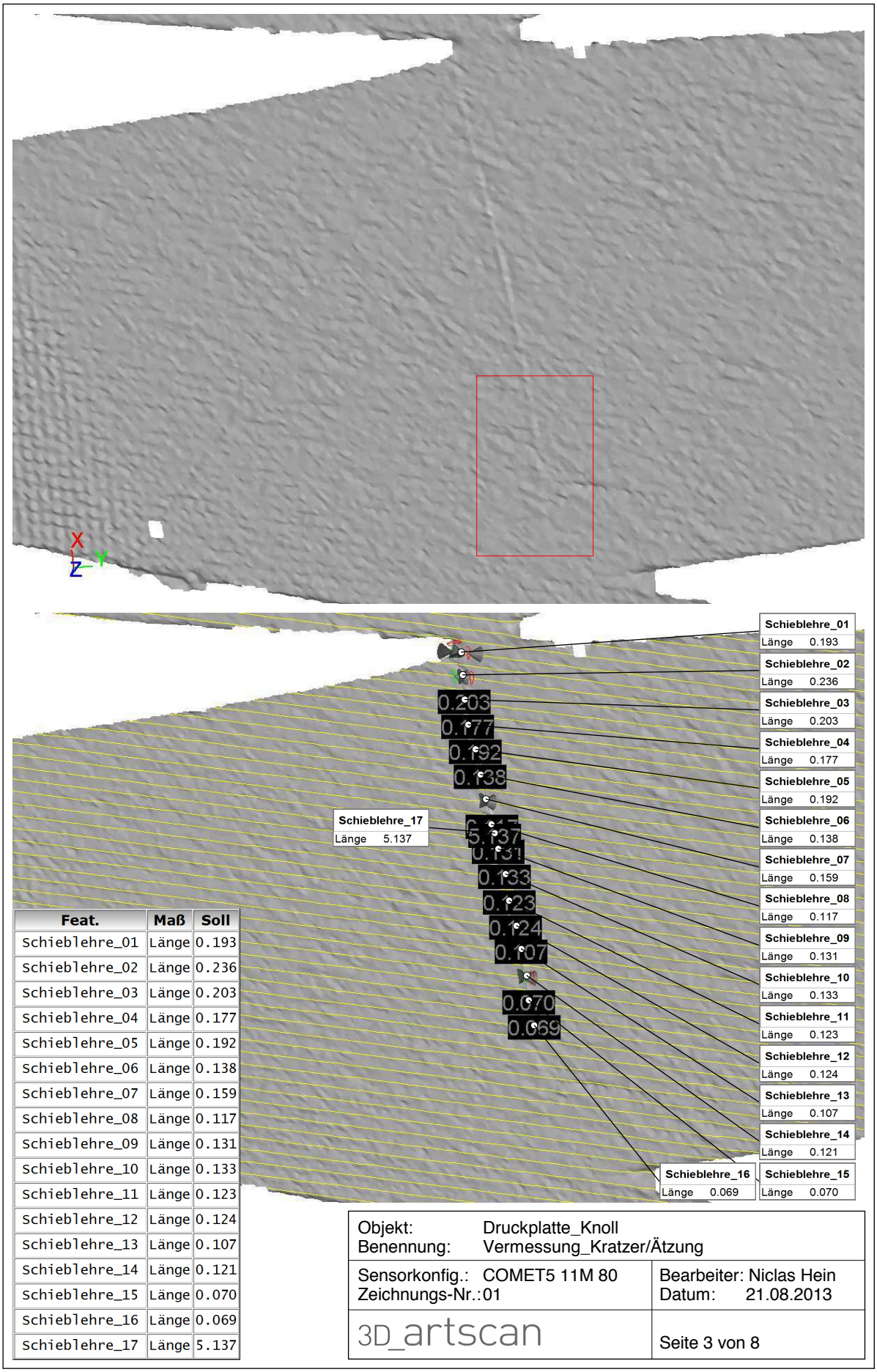


Abb. 315| Wiedergabe der Protokollseite 1 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst



Objekt:	Druckplatte_Knoll		
Benennung:	Vermessung_Kratzer/Ätzung		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	21.08.2013
3D_artscan		Seite 2 von 8	

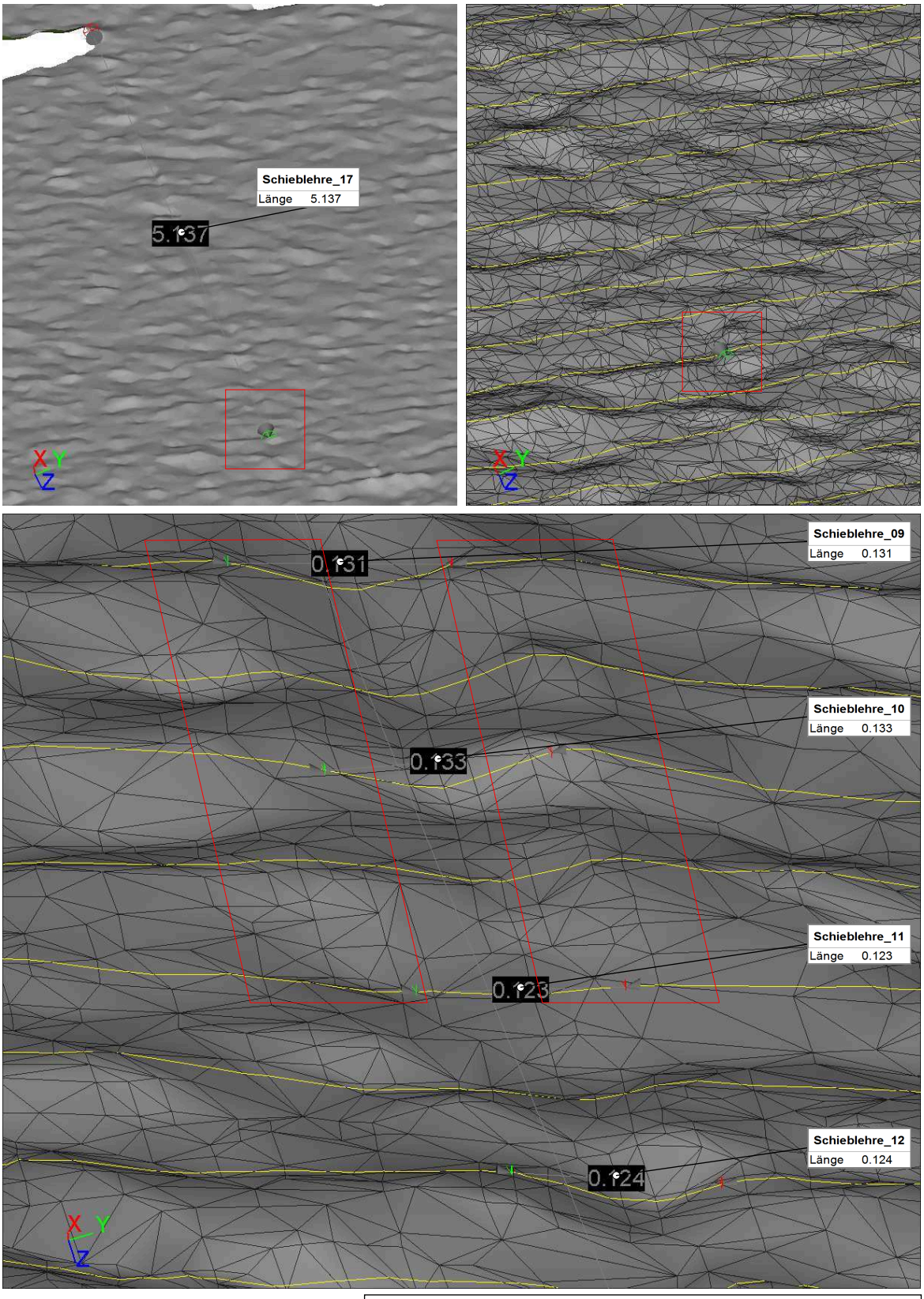
Abb. 316| Wiedergabe der Protokollseite 2 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_01	Länge	0.193
Schieblehre_02	Länge	0.236
Schieblehre_03	Länge	0.203
Schieblehre_04	Länge	0.177
Schieblehre_05	Länge	0.192
Schieblehre_06	Länge	0.138
Schieblehre_07	Länge	0.159
Schieblehre_08	Länge	0.117
Schieblehre_09	Länge	0.131
Schieblehre_10	Länge	0.133
Schieblehre_11	Länge	0.123
Schieblehre_12	Länge	0.124
Schieblehre_13	Länge	0.107
Schieblehre_14	Länge	0.121
Schieblehre_15	Länge	0.070
Schieblehre_16	Länge	0.069
Schieblehre_17	Länge	5.137

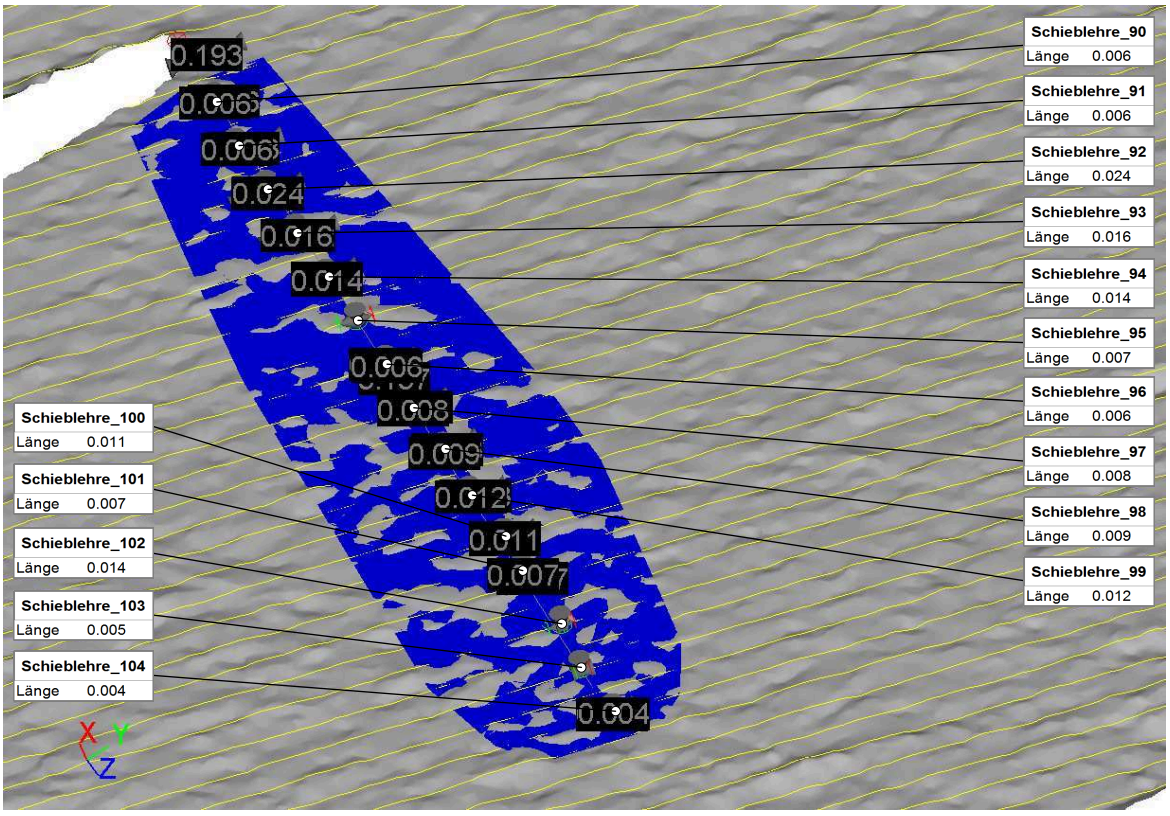
Objekt: Druckplatte_Knoll Benennung: Vermessung_Kratzer/Ätzung	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 3 von 8

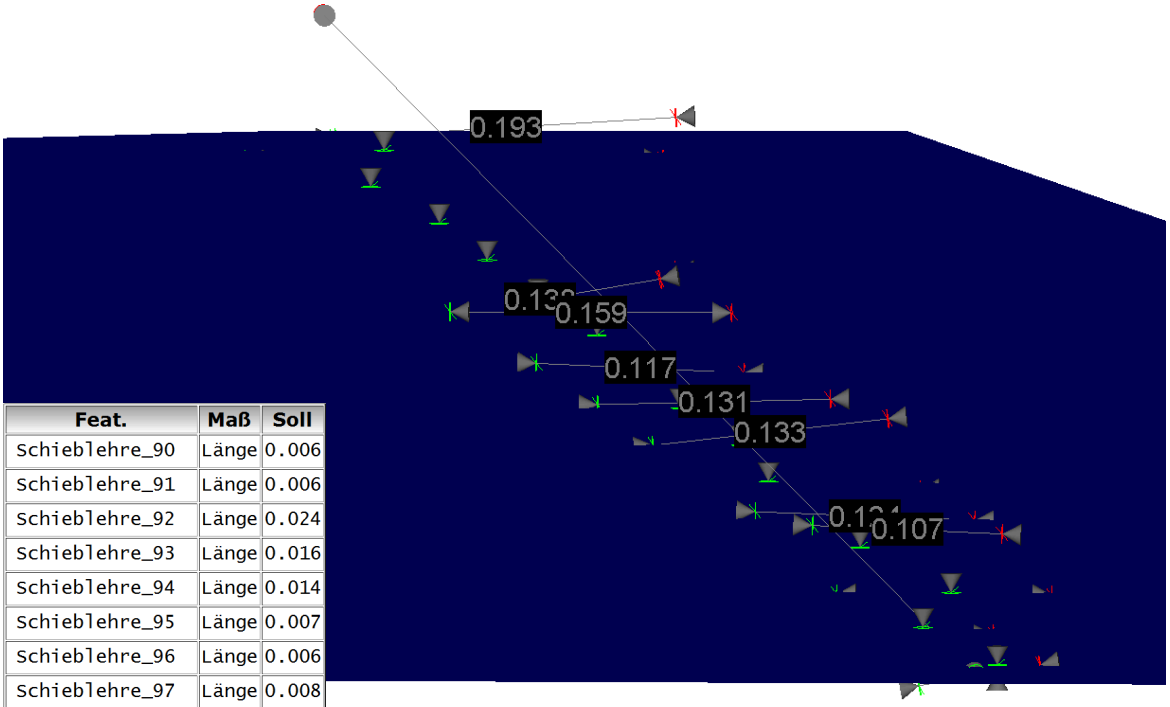
Abb. 317| Wiedergabe der Protokollseite 3 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst



Objekt:	Druckplatte_Knoll		
Benennung:	Vermessung_Kratzer/Ätzung		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	21.08.2013
3D_artscan		Seite 4 von 8	

Abb. 318| Wiedergabe der Protokollseite 4 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst

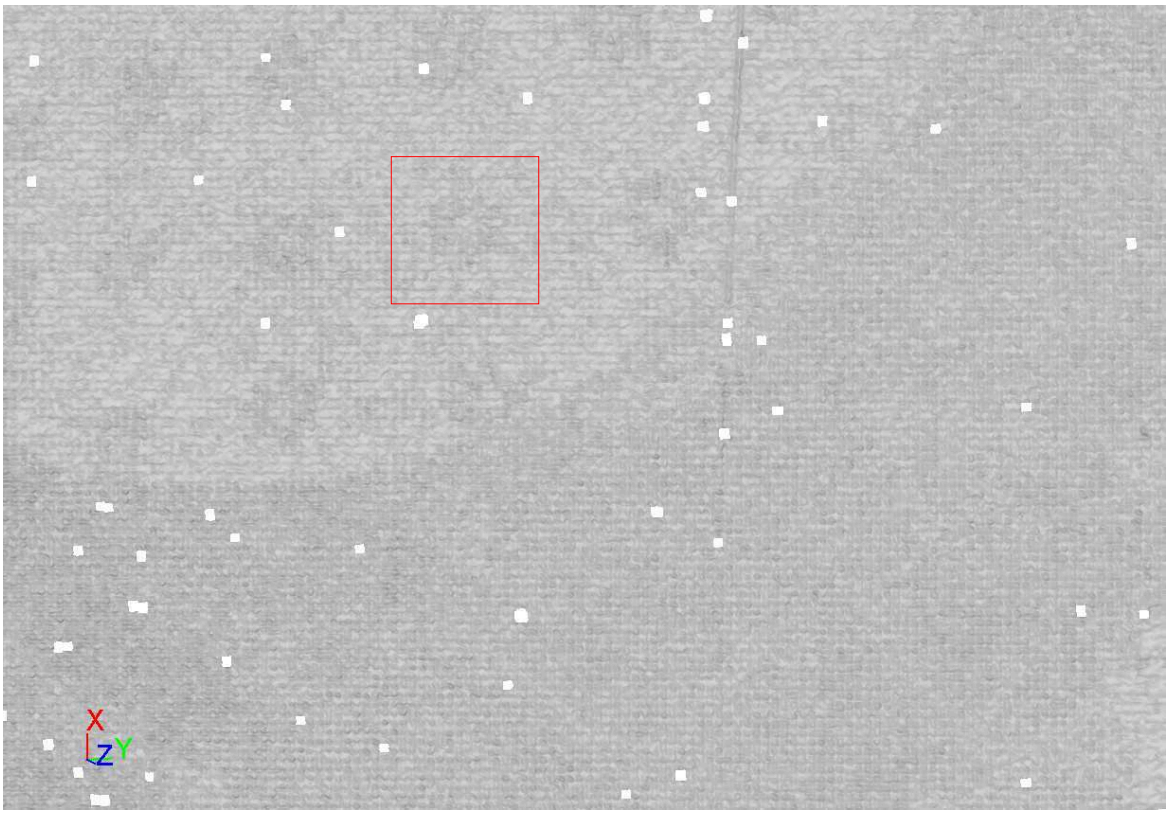


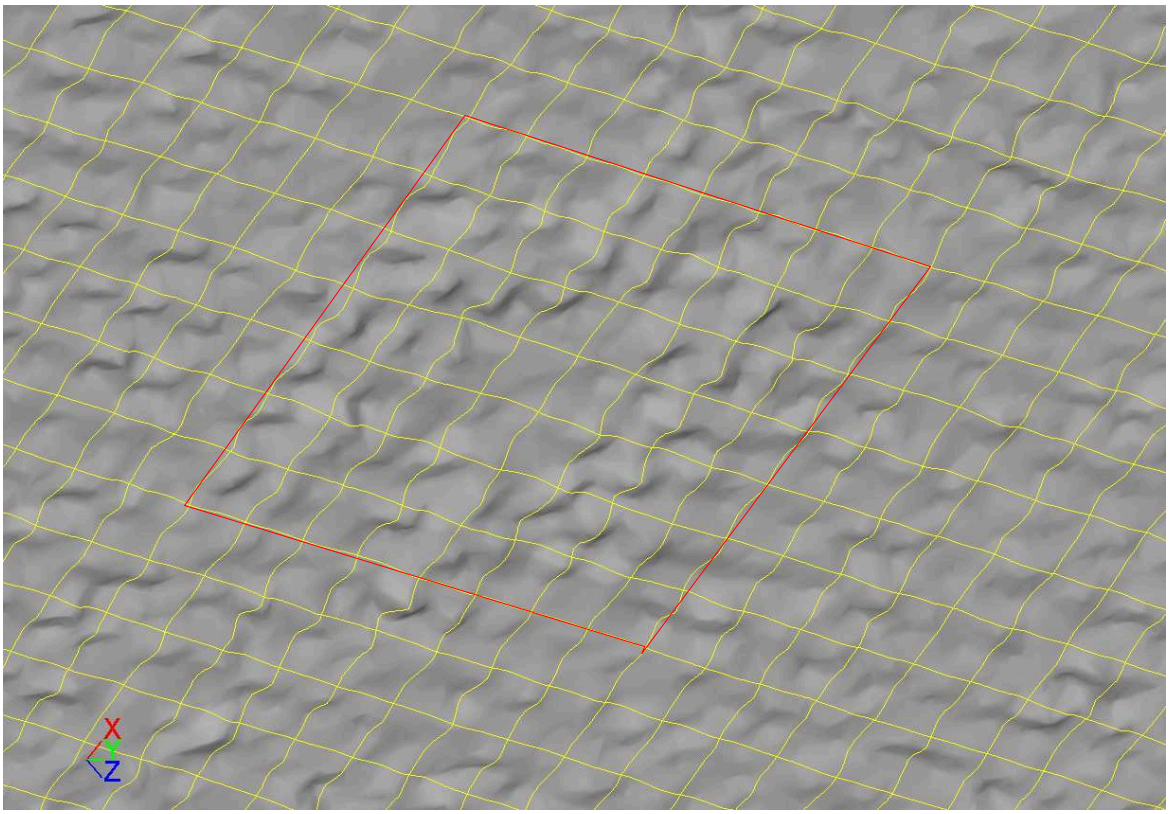


Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_90	Länge	0.006
Schieblehre_91	Länge	0.006
Schieblehre_92	Länge	0.024
Schieblehre_93	Länge	0.016
Schieblehre_94	Länge	0.014
Schieblehre_95	Länge	0.007
Schieblehre_96	Länge	0.006
Schieblehre_97	Länge	0.008
Schieblehre_98	Länge	0.009
Schieblehre_99	Länge	0.012
Schieblehre_100	Länge	0.011
Schieblehre_101	Länge	0.007
Schieblehre_102	Länge	0.014
Schieblehre_103	Länge	0.005
Schieblehre_104	Länge	0.004

Objekt: Druckplatte_Knoll Benennung: Vermessung_Kratzer/Ätzung	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 5 von 8

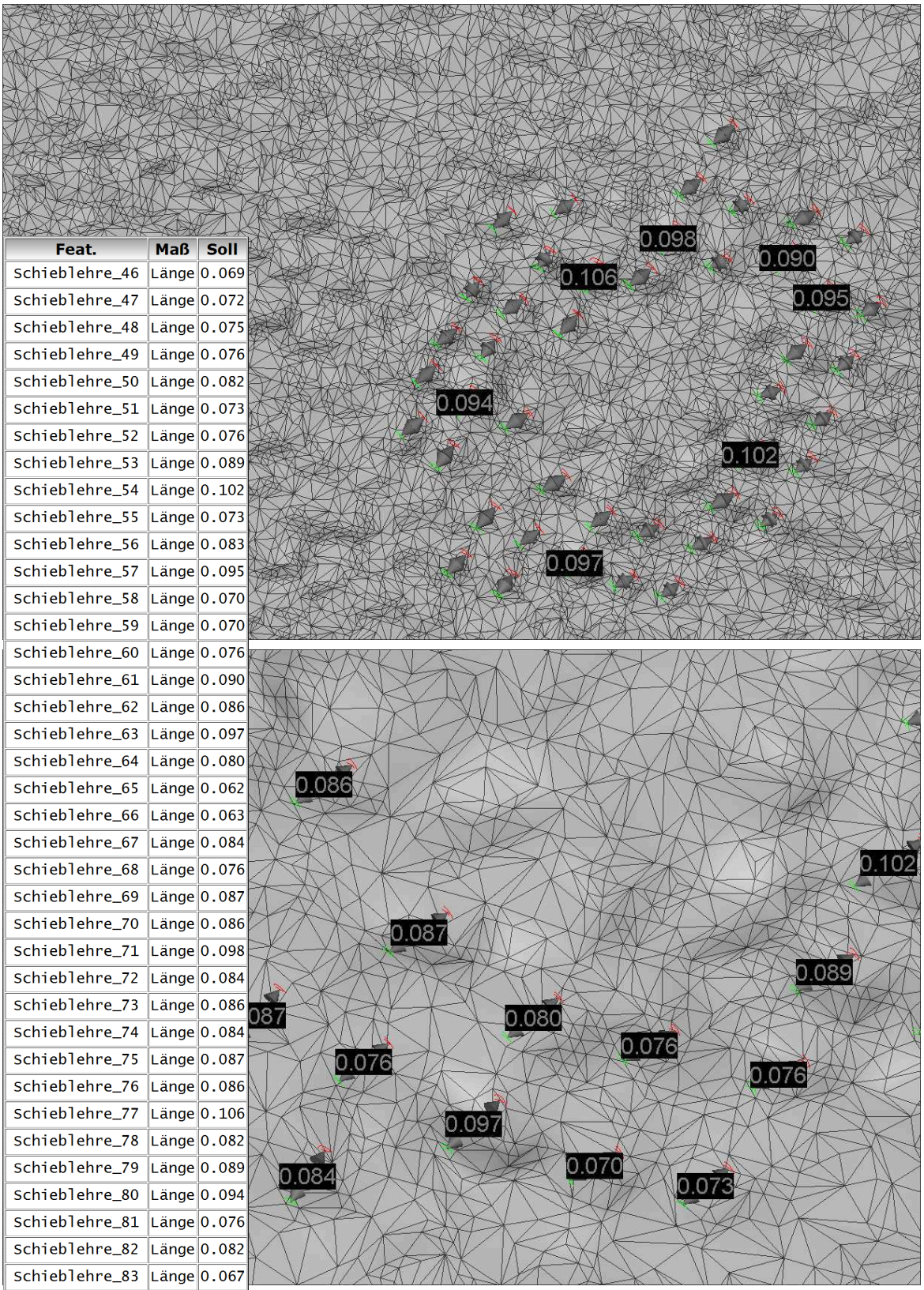
Abb. 319| Wiedergabe der Protokollseite 5 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst





Objekt:	Druckplatte_Knoll		
Benennung:	Vermessung_Kratzer/Ätzung		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	21.08.2013
3D_artscan		Seite 6 von 8	

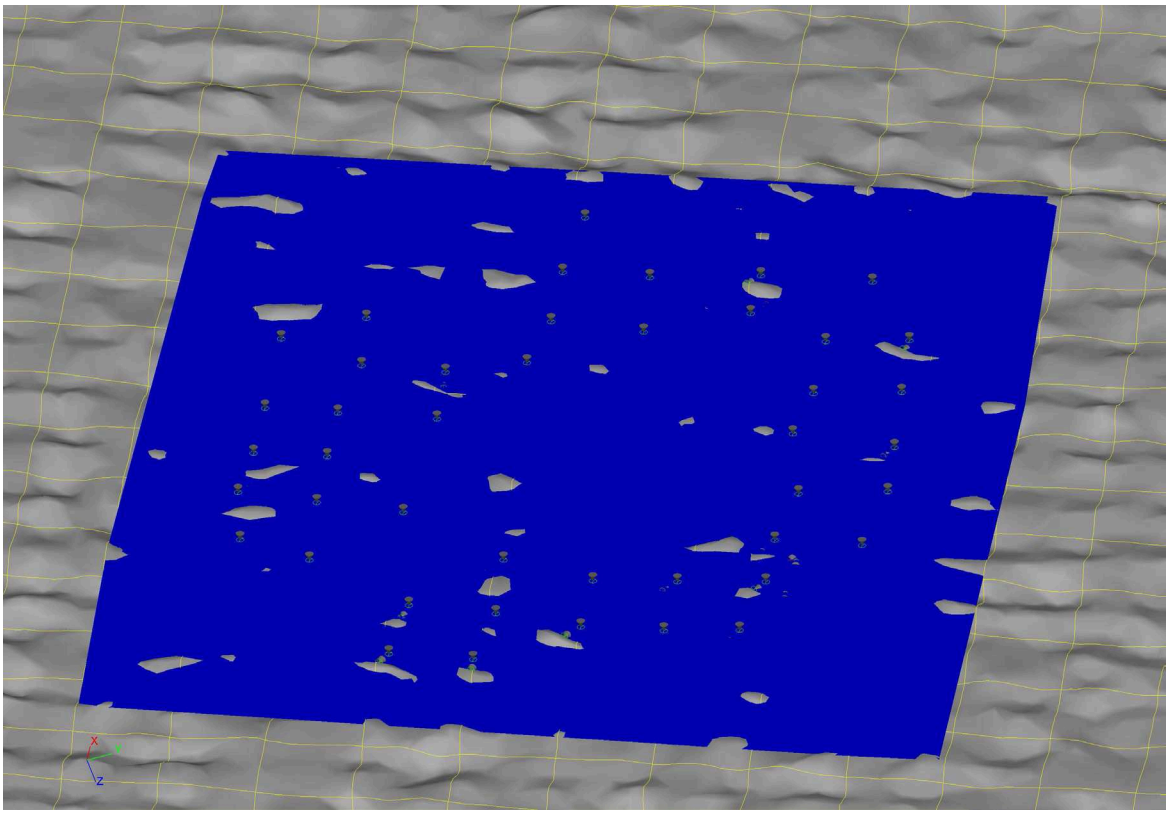
Abb. 320| Wiedergabe der Protokollseite 6 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_46	Länge	0.069
Schieblehre_47	Länge	0.072
Schieblehre_48	Länge	0.075
Schieblehre_49	Länge	0.076
Schieblehre_50	Länge	0.082
Schieblehre_51	Länge	0.073
Schieblehre_52	Länge	0.076
Schieblehre_53	Länge	0.089
Schieblehre_54	Länge	0.102
Schieblehre_55	Länge	0.073
Schieblehre_56	Länge	0.083
Schieblehre_57	Länge	0.095
Schieblehre_58	Länge	0.070
Schieblehre_59	Länge	0.070
Schieblehre_60	Länge	0.076
Schieblehre_61	Länge	0.090
Schieblehre_62	Länge	0.086
Schieblehre_63	Länge	0.097
Schieblehre_64	Länge	0.080
Schieblehre_65	Länge	0.062
Schieblehre_66	Länge	0.063
Schieblehre_67	Länge	0.084
Schieblehre_68	Länge	0.076
Schieblehre_69	Länge	0.087
Schieblehre_70	Länge	0.086
Schieblehre_71	Länge	0.098
Schieblehre_72	Länge	0.084
Schieblehre_73	Länge	0.086
Schieblehre_74	Länge	0.084
Schieblehre_75	Länge	0.087
Schieblehre_76	Länge	0.086
Schieblehre_77	Länge	0.106
Schieblehre_78	Länge	0.082
Schieblehre_79	Länge	0.089
Schieblehre_80	Länge	0.094
Schieblehre_81	Länge	0.076
Schieblehre_82	Länge	0.082
Schieblehre_83	Länge	0.067
Schieblehre_84	Länge	0.075
Schieblehre_85	Länge	0.078
Schieblehre_86	Länge	0.079
Schieblehre_87	Länge	0.063
Schieblehre_88	Länge	0.077
Schieblehre_89	Länge	0.086

Objekt:	Druckplatte_Knoll		
Benennung:	Vermessung_Kratzer/Ätzung		
Sensorkonfig.:	COMET5 11M 80	Bearbeiter:	Niclas Hein
Zeichnungs-Nr.:	01	Datum:	21.08.2013
3D_artscan		Seite 7 von 8	

Abb. 321| Wiedergabe der Protokollseite 7 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst



Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_105	Länge	0.023
Schieblehre_106	Länge	0.012
Schieblehre_107	Länge	0.016
Schieblehre_108	Länge	0.014
Schieblehre_109	Länge	0.036
Schieblehre_110	Länge	0.024
Schieblehre_111	Länge	0.028
Schieblehre_112	Länge	0.020
Schieblehre_113	Länge	0.029
Schieblehre_114	Länge	0.026
Schieblehre_115	Länge	0.029
Schieblehre_116	Länge	0.021
Schieblehre_117	Länge	0.028
Schieblehre_118	Länge	0.023
Schieblehre_119	Länge	0.013
Schieblehre_120	Länge	0.014
Schieblehre_121	Länge	0.025
Schieblehre_122	Länge	0.027
Schieblehre_123	Länge	0.034
Schieblehre_124	Länge	0.018
Schieblehre_125	Länge	0.017
Schieblehre_126	Länge	0.020

Feat.	Maß	Soll
Schieblehre_127	Länge	0.029
Schieblehre_128	Länge	0.025
Schieblehre_129	Länge	0.029
Schieblehre_130	Länge	0.016
Schieblehre_131	Länge	0.023
Schieblehre_132	Länge	0.011
Schieblehre_133	Länge	0.017
Schieblehre_134	Länge	0.025
Schieblehre_135	Länge	0.027
Schieblehre_136	Länge	0.032
Schieblehre_137	Länge	0.031
Schieblehre_138	Länge	0.032
Schieblehre_139	Länge	0.028
Schieblehre_140	Länge	0.025
Schieblehre_141	Länge	0.029
Schieblehre_142	Länge	0.031
Schieblehre_143	Länge	0.044
Schieblehre_144	Länge	0.024
Schieblehre_145	Länge	0.027
Schieblehre_146	Länge	0.028
Schieblehre_147	Länge	0.021
Schieblehre_148	Länge	0.038

Objekt: Druckplatte_Knoll Benennung: Vermessung_Kratzer/Ätzung	
Sensorkonfig.: COMET5 11M 80 Zeichnungs-Nr.: 01	Bearbeiter: Niclas Hein Datum: 21.08.2013
3D_artscan	Seite 8 von 8

Abb. 322| Wiedergabe der Protokollseite 8 zur Präzision der Auflösungsgrenze 'COMET 5 11M 80' anhand einer Einzelaufnahme – Objekt: 'Druckplatte'.
Quelle: Selbst

Datenerhebung: 'Druckplatte', Ätzstruktur

Im Vorfeld wurde davon ausgegangen, dass die feinen, geätzten Strukturen der Druckplatte unterhalb der Auflösungsgrenze des Sensors liegen. Bei Probeaufnahmen, aus denen letztlich ein komplettes 3D-Modell der Druckplatte hervorgegangen ist, können die Strukturen des Klischees jedoch eindeutig visualisiert werden. Die einzige Vorraussetzung besteht in einer virtuellen Beleuchtung aus Schrägsicht. Zur Systemerprobung sollen diese Strukturen näher untersucht und nach Möglichkeit auch quantifiziert werden. Hierzu wird ein Areal mit besonders eindeutiger und zugleich heterogener Struktur ausgesucht. Die Wahl fällt auf einen Bereich, der repräsentativ für das Blumenmuster des Polsterstoffes ist. Die Blumen kennzeichnen sich durch einen symmetrischen Verbund geätzter Löcher unterschiedlicher Durchmesser und Tiefen. Zumindest belegt dieses die stereomikroskopische Aufnahme (►Abb. 313|). Die Sensor- und Belichtungseinstellung entsprechen denen des vorherigen Versuches.

Auswertung: 'Druckplatte', Ätzstruktur

Nach bekannter Vorgehensweise werden die Durchmesser der Löcher über diagonal verlaufende virtuelle Messschieber bestimmt (►Abb. 320| - Abb. 322|). Das Raster der Serienschnittlinien beweist sich hierfür abermals als zweckdienlich. Die Ergebnisse können sowohl dem Protokoll, als auch einer zusammenfassenden Tabelle (►Tab. 103|, 'Schieblehre_46' bis 'Schieblehre_89') entnommen werden.
Die Lochtiefen werden, dem bisherigen Muster folgend, über Messschieber ermittelt, die, von einer Ausgleichsebene ausgehend, auf die Sohlen der geätzten Strukturen gerichtet sind. Die Ausgleichsebene repräsentiert dabei, wie üblich, die unversehrte Oberfläche (►Abb. 322|). Auch diese Ergebnisse sind in einer Tabelle zusammengefasst, wobei dabei örtlich korrespondierende Messschieber den Durchmesser bestimmen, bzw. die Tiefen, einander gegenüber gestellt sind (►Tab. 103|, 'Schieblehre_105' bis 'Schieblehre_149').

Ergebnis: 'Druckplatte', Ätzstruktur

Entgegen der Erkenntnisse aus der stereomikroskopischen Beobachtung, können die zylinderförmigen, geätzten Strukturen am 3D-Datensatz nur als unscharf konturierte Vertiefungen identifiziert werden. Die im Realen, deutlich abgegrenzten Zylinderformen können vom 'COMET-System' als solche nicht mehr zuverlässig aufgelöst werden (►Unterschied von Abb. 313| und Abb. 320|). Zudem können am Digitalisat unterschiedliche Durchmesser der geätzten Strukturen, wie sie am Untersuchungsgegenstand existieren, nicht eindeutig identifiziert werden. Dementsprechend bestehen abermals Unsicherheiten bei der Festlegung des Gefälleüberganges und damit der Positionierung der Messschieber. Entscheidend werden hier die Ergebnisse aus der hochauflösenden Digitalisierung durch die Mikro-Streifenprojektion sein.
Die eigenen virtuellen Messschieber quantifizieren den Durchmesser in den Bereich von 0,062 mm bis 0,106 mm. Die Tiefe der geätzten Strukturen können vom 'COMET-Systems' im Bereich von 0,011 mm bis 0,044 mm quantifiziert werden (►Tab. 103|).

Lateral	Länge (mm)
Schieblehre_46	0,069
Schieblehre_47	0,072
Schieblehre_48	0,075
Schieblehre_49	0,076
Schieblehre_50	0,082
Schieblehre_51	0,073
Schieblehre_52	0,076
Schieblehre_53	0,089
Schieblehre_54	0,102
Schieblehre_55	0,073
Schieblehre_56	0,083
Schieblehre_57	0,095
Schieblehre_58	0,070
Schieblehre_59	0,070
Schieblehre_60	0,076
Schieblehre_61	0,090
Schieblehre_62	0,086
Schieblehre_63	0,097
Schieblehre_64	0,080
Schieblehre_65	0,062
Schieblehre_66	0,063
Schieblehre_67	0,084
Schieblehre_68	0,076
Schieblehre_69	0,087
Schieblehre_70	0,086
Schieblehre_71	0,098
Schieblehre_72	0,084
Schieblehre_73	0,086
Schieblehre_74	0,084
Schieblehre_75	0,087
Schieblehre_76	0,086
Schieblehre_77	0,106
Schieblehre_78	0,082
Schieblehre_79	0,089
Schieblehre_80	0,094
Schieblehre_81	0,076
Schieblehre_82	0,082
Schieblehre_83	0,067
Schieblehre_84	0,075
Schieblehre_85	0,078
Schieblehre_86	0,079
Schieblehre_87	0,063
Schieblehre_88	0,077
Schieblehre_89	0,086
Mittelwert	0,081

Axial	Länge (mm)
Schieblehre_105	0,023
Schieblehre_106	0,012
Schieblehre_107	0,016
Schieblehre_108	0,014
Schieblehre_109	0,036
Schieblehre_110	0,024
Schieblehre_111	0,028
Schieblehre_112	0,020
Schieblehre_113	0,029
Schieblehre_114	0,026
Schieblehre_115	0,029
Schieblehre_116	0,021
Schieblehre_117	0,028
Schieblehre_118	0,023
Schieblehre_119	0,013
Schieblehre_120	0,014
Schieblehre_121	0,025
Schieblehre_122	0,027
Schieblehre_123	0,034
Schieblehre_124	0,018
Schieblehre_125	0,017
Schieblehre_126	0,020
Schieblehre_127	0,029
Schieblehre_128	0,025
Schieblehre_129	0,029
Schieblehre_130	0,016
Schieblehre_131	0,023
Schieblehre_132	0,011
Schieblehre_133	0,017
Schieblehre_134	0,025
Schieblehre_135	0,027
Schieblehre_136	0,032
Schieblehre_137	0,031
Schieblehre_138	0,032
Schieblehre_139	0,028
Schieblehre_140	0,025
Schieblehre_141	0,029
Schieblehre_142	0,031
Schieblehre_143	0,044
Schieblehre_144	0,024
Schieblehre_145	0,027
Schieblehre_146	0,028
Schieblehre_147	0,021
Schieblehre_148	0,038
Mittelwert	0,025

Tab. 103| Tabelle zum Durchmesser und zur Tiefe der geätzten Strukturen. Quelle: Selbst

Verifizierung und Einschätzung der Ergebnisse von 'COMET 5 11M 80' an 'Druckplatte'

Wie angekündigt, erfolgt die Verifikation der selbst bestimmten Strukturen durch die Mikro-Streifenprojektion. Hierbei wird zwischen dem Kratzer – 'R3 Kratzervermessung' – einerseits und den eingeätzten Strukturen – 'R2 Vermessung von Oberflächenstrukturen' – andererseits unterschieden. Die Daten sind vom Projektpartner erhoben worden und in einem Messprotokoll zusammengefasst (►Abb. 323| -Abb. 327|). Aufgrund des sehr begrenzten Messvolumens des Mikro-Streifenprojektionsverfahrens, konnte die Länge des Kratzers nicht in Gänze bestimmt werden. Es stehen ausschließlich Daten über die Breite und die Tiefe des Kratzers zur Verfügung (►Abb. 323| - Abb. 325|). Aus dem Messprotokoll der Mikro-Streifenprojektion geht hervor, dass doppelt so viele Messpunkte berücksichtigt worden sind, wie bei der Auswertung der 3D-Aufnahme des 'COMET-System'. Zudem ist aufgrund unterschiedlicher Messabstände eine eindeutige Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Verfahren nicht möglich.[751] Jedoch muss die eingangs aufgestellte These, eines sich linear verjüngenden Kratzers, gemäß den Ergebnissen der Mikro-Streifenprojektion falsifiziert werden. Obgleich vorhandener Schwankungen, wird dort die Breite im Mittel mit 0,093 mm angegeben und die Tiefe mit 0,016 mm (►Abb. 325|). Damit besteht gegenüber den selbst erhobenen Daten (Mittel der Kratzerbreite 0,143 mm und Mittel der Kratzertiefe 0,010 mm) für die gemittelte Breite eine Diskrepanz von 0,050 mm und für die gemittelte Tiefe eine von 0,006 mm. Die Verifikation der eigenen Daten überrascht, da die 3D-Aufnahme der Mikro-Streifenprojektion, aufgrund der überlegenderen Geräteauflösung unter optischen Kriterien sehr viel detailreicher ist als das Digitalisat des 'COMET-System'. Neben der Lokalisierung der Merkmalsgrenzen kommen Beschränkungen hinzu, die sich aus der Auswertungsstrategie, den virtuellen Werkzeugen sowie dem Messrauschen ergeben. Dies kumuliert letztlich in einer Limitierung reproduzierbarer und verifizierbarer Ergebnisse. Gleichwohl lassen die Ergebnisse dieser Versuchsreihe, aufgrund bestehender Abweichungen und Messunsicherheiten, keine eindeutigen Rückschlüsse über die Präzision einer Nachweisgrenze von 'COMET 5 11M 80' zu.

751 Aus diesem Grund kann auch keine Tabelle vorgewiesen werden, in der die Daten einander gegenübergestellt werden.

Messung Streifentriangulation

Script-Beschreibung

Language:	Python V3.3 / ITOM Entwicklungsumgebung V1.0.14
Module:	Numpy, Itom
File:	evalStepNormal.py
Funktion:	Evaluierung von Stufenhöhen von Messaufnahmen anhand frei ausgewählter Region of Interest (ROI).
Messaufnahme:	Die zu messenden Stufenhohe werden nach dem Prinzip der Streifentriangulation erfasst und aufgenommen.

Abb. 323| Wiedergabe der Protokollseite 1 zur Verifikation der Ergebnisse durch die Mikro-Streifenprojektion – 'R3 Kratzervermessung'. Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

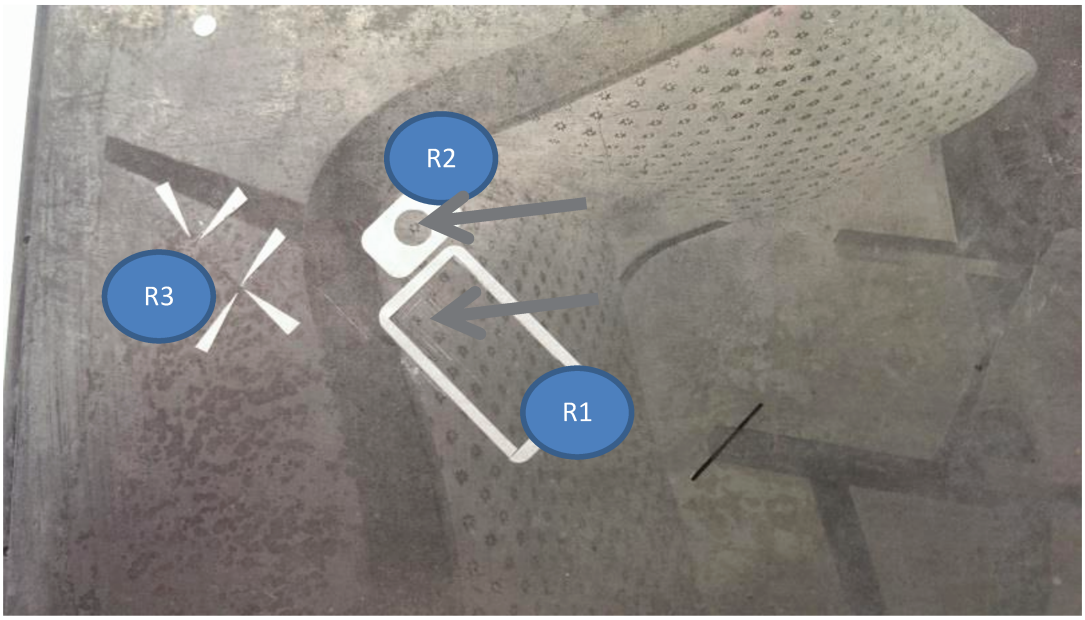
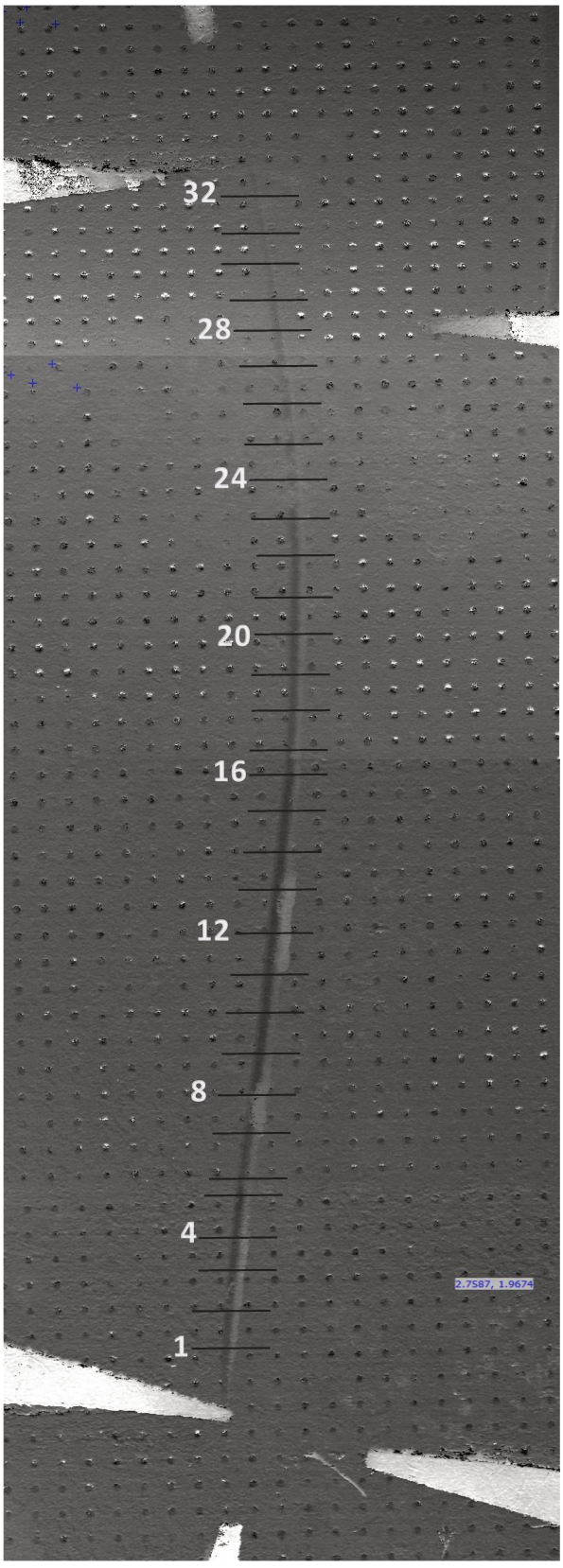


Abb. 324| Wiedergabe der Protokollseite 2 zur Verifikation der Ergebnisse durch die Mikro-Streifenprojektion – 'R3 Kratzervermessung'. Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

R3 **Kratzervermessung** (2.5x Zoom und 1.0 Objektiv)



Messpunktabstand Linie-Linie ~250µm
(Abstand Linie 5-6 und 16-17 ~150µm)

	Breite	Tiefe [µm]
32:	23,63	5,6
31:	34,14	5,59
30:	42,01	5,59
29:	49,89	9,6
28:	52,52	15,3
27:	NA	NA
26:	81,4	14,7
25:	73,53	~7,7
24:	91,91	~10,36
23:	105	14,19
22:	102,4	17,65
21:	112,9	17,36
20:	110,3	22,28
19:	107,7	16,69
18:	94,53	15,73
17:	97,16	12,5
16:	99,7	17,6
15:	84,03	21,33
14:	91,91	23,64
13:	168,1	11,27
12:	160,2	17,38
11:	123,4	17,37
10:	107,7	18,1
9:	120,8	19,6
8:	112,9	15,32
7:	120,8	17,8
6:	84,03	18,95
5:	81,7	16,95
4:	110,5	18,66
3:	99,8	18,3
2:	89,33	13,7
1:	65,7	11,4
	93,4 µm	16,0 µm Mittelwert

Abb. 325| Wiedergabe der Protokollseite 3 zur Verifikation der Ergebnisse durch die Mikro-Streifenprojektion – 'R3 Kratzervermessung'. Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

Anders verhält es sich jedoch bei der Verifizierung der geätzten Strukturen der Druckplatte durch die Mikro-Streifenprojektion (►Abb. 326| und Abb. 327|). Prinzipiell kennzeichnet sich hier die 3D-Aufnahme abermals durch eine sehr viel eindeutigere Auflösung der Ätzungen, als diese mit dem 'COMET-System' möglich ist. So sind die Löcher bei der verifizierenden Messung vergleichsweise scharf konturiert. Auch unter quantitativen Gesichtspunkten können Löcher bestimmt werden, die mit dem 'COMET-System nicht nachzuweisen sind. So zeigt die Gegenüberstellung der Daten in ►Tab. 104| für die Bestimmung des Durchmessers von Messung '3' (0,080 mm) kein Äquivalent. Werden jene Lochdurchmesser ausgewertet, für die bei beiden Messverfahren korrespondierende Daten erhoben werden konnten, so reduzieren sich die möglichen Übereinstimmungen auf jeweils fünf Messschieber. Diese weichen im Mittel um 0,054 mm ab, wobei das Minimum bei 0,005 mm und das Maximum bei 0,089 mm liegt. Werden die selben Ätzpunkte hinsichtlich ihrer Tiefe ausgewertet, so können zwischen den beiden Streifenprojektionsverfahren im Mittel Abweichungen von 0,010 mm ausgemacht werden. Eine minimale Abweichung besteht hierbei nicht – es existiert eine absolute Übereinstimmung ('Schieblehre_130' und Messung '4'). Hingegen beträgt die maximale Abweichung 0,026 mm. In Anbetracht der oben geschilderten Schwierigkeiten, die aus der Bestimmung der Merkmalsgrenzen resultieren, überrascht die hohe Übereinstimmung abermals. Sie werden als verifiziert gewertet. Einschränkungen ergeben sich jedoch bei der Bestimmung von Kanten und Lochstrukturen mit einem Durchmesser <0,080 mm.

In einer weiteren Limitierung der Ergebnisse beider Streifenprojektionsverfahren wird darauf hingewiesen werden, dass die geätzten Strukturen in gesamtheitlicher Betrachtung weniger tief als breit sind. Hier gibt jedoch die stereomikroskopische Untersuchung eindeutigen Anlass zur Negation der Ergebnisse. Nach optischen Gesichtspunkten sind die eingeätzten Strukturen tendenziell tiefer als ihr Durchmesser (►Abb. 313|). Die Begründung der abweichenden Ergebnisse ergibt sich einerseits aus der Verschattung des Grundes durch die Ränder der geätzten Zylinder und andererseits aus den Eigenschaften des Messgerätes. Hier kommt dem Punktabstand und dem Triangulationsprinzip der Sensoren eine zentrale Bedeutung zu. Abermals bestätigt dieses eine kritische Haltung gegenüber der Evidenz der Messergebnisse.

R2 Vermessung von Oberflächenstrukturen (5.0x Zoom und 1.0 Objektiv)

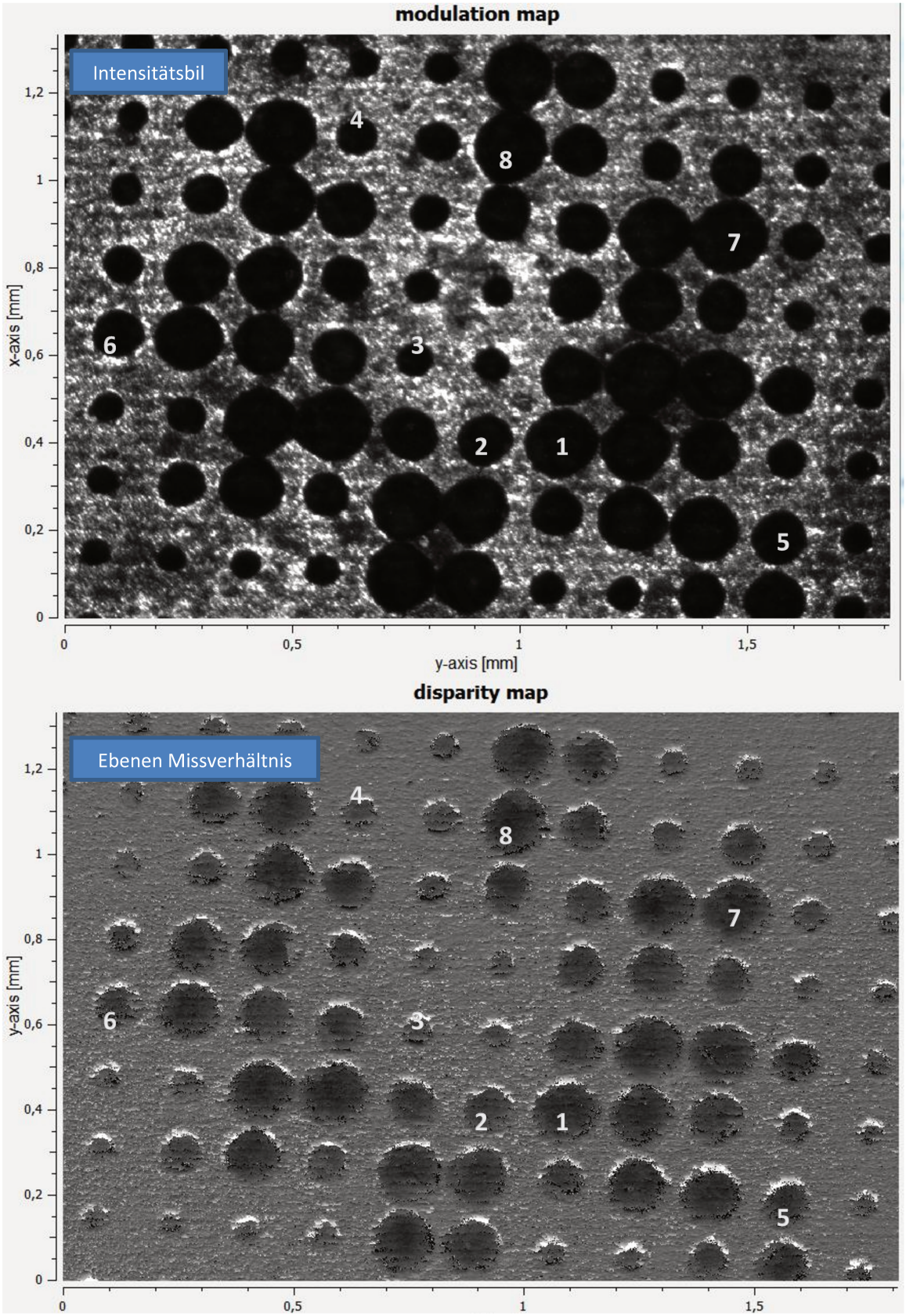


Abb. 326| Wiedergabe der Protokollseite 4 zur Verifikation der Ergebnisse durch die Mikro-Streifenprojektion – 'R2 Vermessung von Oberflächenstrukturen'.
Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

1: Durchmesser	165,5 µm	Tiefe	25,96 µm	
2: Durchmesser	118,5 µm	Tiefe	25,4 µm	
3: Durchmesser	81,14 µm	Tiefe	22,26 µm	
4: Durchmesser	102,6 µm	Tiefe	15,59 µm	
5: Durchmesser	123,2 µm	Tiefe	28,94 µm	
6: Durchmesser	113,7 µm	Tiefe	18,65 µm	
7: Durchmesser	165,5 µm	Tiefe	31,12 µm	
8: Durchmesser	168,4 µm	Tiefe	39,66 µm	
	93,4 µm		16,0 µm	Mittelwert

Vermessung von Durchmesser anhand Intensitätsbild , Tiefenmessung nach mehrmaliger Wiederholung anhand Ebenen Missverhältnis.

Abb. 327| Wiedergabe der Protokollseite 5 zur Verifikation der Ergebnisse durch die Mikro-Streifenprojektion – 'R2 Vermessung von Oberflächenstrukturen'.
Quelle: Lyda & Pedrini, 2013

Geätzte Strukturen
COMET 5 11M 80'

Durchmesser	Länge (mm)	Tiefe	Länge (mm)	Mikro-Streifenprojektion Messung	Durchmesser (mm)	Tiefe (mm)	Abweichung Durchmesser (mm)	Tiefe (mm)
Schieblehre_60	0,076	Schieblehre_119	0,013	1	0,165	0,026	0,089	0,013
Schieblehre_64	0,080	Schieblehre_123	0,034	2	0,118	0,026	0,038	0,008
		nicht aufzulösen		3	0,080	0,021		k. A.
Schieblehre_71	0,098	Schieblehre_130	0,016	4	0,103	0,016	0,005	0,000
		kein Äquivalent		5	0,121	0,029		k. A.
		nicht aufzulösen		6	0,114	0,019		k. A.
Schieblehre_54	0,102	Schieblehre_113	0,029	7	0,165	0,030	0,063	0,001
Schieblehre_61	0,090	Schieblehre_120	0,014	8	0,167	0,040	0,077	0,026
						Mittelwert	0,054	0,010
						Minimum	0,005	0,000
						Maximum	0,089	0,026

Tab. 104| Gegenüberstellung der selbst ermittelten Daten über die quantitative Bestimmung der Ätzstruktur mit den Messdaten aus der Bestimmung mit der Mikro-Streifenprojektion.
Quelle: Daniel Claus, bearbeitet selbst und selbst

29.16 E-Mail zur Sensoreinstellung und Konfiguration 'LoRes' / 'HiRes'



Abb. 328| E-Mail zur Sensoreinstellung und -Konfiguration 'LoRes' / 'HiRes'.
Quelle:Giesler (Fa. Steinbichler), 2012

29.17 E-Mail zum Punktabstand

Aus rechtlichen Gründen gesperrt.

14.08.13 08:10

Abb. 330| E-Mail zum Punktabstand und der Sensorauflösung (Seite2).
Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013

14.08.13 08:10 2 von 4

Aus rechtlichen Gründen gesperrt.

Abb. 329| E-Mail zum Punktabstand und der Sensorauflösung (Seite1).
Quelle:Fasser (Fa. Steinbichler), 2013

1 von 4

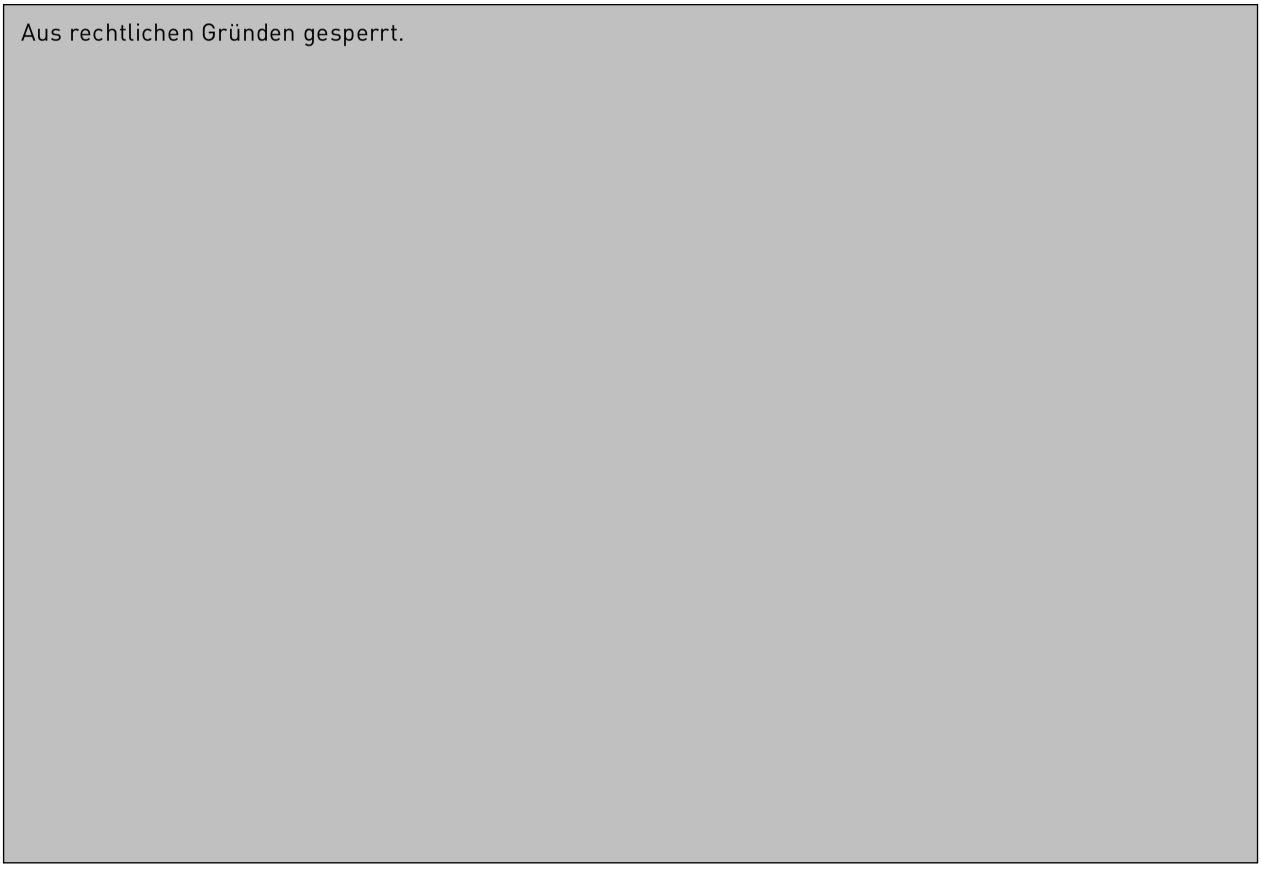


Abb. 332| E-Mail zum Punktabstand und der Sensorauflösung (Seite4).
Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013



Abb. 331| E-Mail zum Punktabstand und der Sensorauflösung (Seite3).
Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013

29.18 Überprüfung der Messgüte der verwendeten Datenloggern

Plot-Titel:		Logger_01		Logger_02		Logger_03		Abweichung Logger_01/ Logger_02		Abweichung Logger_02/ Logger_03		Abweichung Logger_01/ Logger_03	
Anz.	Datum Zeit	Temp., °C	RH, %	Temp., °C	RH, %	Temp., °C	RH, %	Temp., °C	RH, %	Temp., °C	RH, %	Temp., °C	RH, %
1	28.05.14 14:00:00	22,54	49,32	23,36	46,07	22,88	48,82	0,82	3,25	0,48	2,75	0,34	0,50
2	28.05.14 14:15:00	22,18	50,38	22,52	48,55	22,40	50,21	0,34	1,82	0,12	1,66	0,22	0,16
3	28.05.14 14:30:00	22,09	50,68	22,25	49,37	22,23	50,57	0,17	1,31	0,02	1,20	0,14	0,11
4	28.05.14 14:45:00	22,09	50,74	22,18	49,65	22,21	50,73	0,10	1,09	0,02	1,08	0,12	0,02
5	28.05.14 15:00:00	22,11	50,87	22,21	49,87	22,25	50,86	0,10	1,00	0,05	0,99	0,14	0,01
6	28.05.14 15:15:00	22,09	51,12	22,16	50,18	22,21	51,07	0,07	0,94	0,05	0,89	0,12	0,05
7	28.05.14 15:30:00	22,06	51,27	22,11	50,37	22,18	51,23	0,05	0,91	0,07	0,86	0,12	0,05
8	28.05.14 15:45:00	22,06	51,37	22,11	50,49	22,16	51,38	0,05	0,88	0,05	0,89	0,10	0,01
9	28.05.14 16:00:00	22,09	51,43	22,13	50,59	22,18	51,42	0,05	0,84	0,05	0,83	0,10	0,02
10	28.05.14 16:15:00	22,09	51,53	22,13	50,68	22,18	51,51	0,05	0,84	0,05	0,83	0,10	0,02
11	28.05.14 16:30:00	22,09	51,62	22,13	50,81	22,18	51,64	0,05	0,81	0,05	0,82	0,10	0,01
12	28.05.14 16:45:00	22,04	51,80	22,11	51,00	22,16	51,76	0,07	0,81	0,05	0,76	0,12	0,05
13	28.05.14 17:00:00	22,04	51,84	22,11	51,06	22,13	51,82	0,07	0,78	0,02	0,76	0,09	0,02
14	28.05.14 17:15:00	22,06	51,90	22,09	51,12	22,13	51,91	0,02	0,78	0,05	0,79	0,07	0,01
15	28.05.14 17:30:00	22,06	51,93	22,09	51,18	22,16	51,95	0,02	0,75	0,07	0,77	0,10	0,01
16	28.05.14 17:45:00	22,09	51,94	22,13	51,16	22,18	51,95	0,05	0,78	0,05	0,79	0,10	0,01
17	28.05.14 18:00:00	22,16	51,82	22,21	51,07	22,23	51,86	0,05	0,75	0,02	0,79	0,07	0,04
18	28.05.14 18:15:00	22,23	51,80	22,25	51,08	22,30	51,90	0,02	0,72	0,05	0,82	0,07	0,10
19	28.05.14 18:30:00	22,30	51,75	22,33	51,03	22,35	51,85	0,02	0,72	0,02	0,82	0,05	0,10
20	28.05.14 18:45:00	22,30	51,90	22,33	51,21	22,35	51,97	0,02	0,69	0,02	0,76	0,05	0,07
21	28.05.14 19:00:00	22,23	52,08	22,28	51,40	22,30	52,15	0,05	0,69	0,02	0,76	0,07	0,07
22	28.05.14 19:15:00	22,21	52,20	22,23	51,52	22,25	52,27	0,02	0,69	0,02	0,76	0,05	0,07
23	28.05.14 19:30:00	22,13	52,32	22,16	51,66	22,21	52,39	0,02	0,66	0,05	0,73	0,07	0,07
24	28.05.14 19:45:00	22,11	52,44	22,13	51,75	22,18	52,45	0,02	0,69	0,05	0,70	0,07	0,01
25	28.05.14 20:00:00	22,06	52,56	22,09	51,87	22,13	52,60	0,02	0,69	0,05	0,73	0,07	0,04
26	28.05.14 20:15:00	21,99	52,68	22,02	51,99	22,06	52,72	0,02	0,69	0,05	0,73	0,07	0,04
27	28.05.14 20:30:00	21,97	52,73	21,99	52,05	22,04	52,74	0,02	0,69	0,05	0,70	0,07	0,01
28	28.05.14 20:45:00	21,92	52,79	21,94	52,17	21,99	52,83	0,02	0,62	0,05	0,66	0,07	0,04
29	28.05.14 21:00:00	21,85	52,91	21,90	52,29	21,94	52,89	0,05	0,62	0,05	0,60	0,10	0,02
30	28.05.14 21:15:00	21,80	52,99	21,82	52,37	21,90	53,01	0,02	0,62	0,07	0,64	0,10	0,01
31	28.05.14 21:30:00	21,75	53,05	21,78	52,43	21,85	53,06	0,02	0,62	0,07	0,63	0,10	0,01
32	28.05.14 21:45:00	21,73	53,11	21,73	52,51	21,80	53,12	0,00	0,59	0,07	0,60	0,07	0,01
33	28.05.14 22:00:00	21,68	53,13	21,70	52,54	21,78	53,18	0,02	0,59	0,07	0,64	0,10	0,05
34	28.05.14 22:15:00	21,66	53,19	21,68	52,60	21,75	53,20	0,02	0,59	0,07	0,60	0,10	0,01
35	28.05.14 22:30:00	21,66	53,22	21,66	52,63	21,70	53,23	0,00	0,59	0,05	0,60	0,05	0,01
36	28.05.14 22:45:00	21,61	53,25	21,63	52,66	21,68	53,26	0,02	0,59	0,05	0,60	0,07	0,01
37	28.05.14 23:00:00	21,58	53,27	21,58	52,71	21,66	53,28	0,00	0,56	0,07	0,57	0,07	0,01
38	28.05.14 23:15:00	21,56	53,30	21,58	52,74	21,66	53,32	0,02	0,56	0,07	0,57	0,09	0,01
39	28.05.14 23:30:00	21,54	53,30	21,56	52,77	21,61	53,34	0,02	0,53	0,05	0,57	0,07	0,04
40	28.05.14 23:45:00	21,54	53,36	21,54	52,80	21,58	53,37	0,00	0,56	0,05	0,57	0,05	0,01
41	29.05.14 00:00:00	21,51	53,36	21,51	52,83	21,58	53,37	0,00	0,53	0,07	0,54	0,07	0,01
42	29.05.14 00:15:00	21,49	53,39	21,49	52,86	21,56	53,40	0,00	0,53	0,07	0,54	0,07	0,01
43	29.05.14 00:30:00	21,47	53,41	21,49	52,86	21,54	53,42	0,02	0,56	0,05	0,57	0,07	0,01
44	29.05.14 00:45:00	21,47	53,41	21,47	52,88	21,54	53,42	0,00	0,53	0,07	0,54	0,07	0,01
45	29.05.14 01:00:00	21,44	53,44	21,47	52,91	21,51	53,45	0,02	0,53	0,05	0,54	0,07	0,01
46	29.05.14 01:15:00	21,44	53,47	21,44	52,91	21,49	53,48	0,00	0,56	0,05	0,57	0,05	0,01
47	29.05.14 01:30:00	21,42	53,47	21,42	52,91	21,49	53,48	0,00	0,56	0,07	0,57	0,07	0,01
48	29.05.14 01:45:00	21,42	53,47	21,42	52,94	21,47	53,51	0,00	0,53	0,05	0,57	0,05	0,04
49	29.05.14 02:00:00	21,39	53,50	21,39	52,97	21,47	53,51	0,00	0,53	0,07	0,54	0,07	0,01
50	29.05.14 02:15:00	21,37	53,49	21,39	53,00	21,44	53,50	0,02	0,50	0,05	0,51	0,07	0,01
51	29.05.14 02:30:00	21,37	53,52	21,39	53,00	21,44	53,53	0,02	0,53	0,05	0,54	0,07	0,01
52	29.05.14 02:45:00	21,35	53,55	21,37	53,03	21,42	53,53	0,02	0,53	0,05	0,51	0,07	0,02
53	29.05.14 03:00:00	21,35	53,55	21,35	53,02	21,42	53,53	0,00	0,53	0,07	0,51	0,07	0,02
54	29.05.14 03:15:00	21,32	53,58	21,32	53,02	21,39	53,56	0,00	0,56	0,07	0,54	0,07	0,02
55	29.05.14 03:30:00	21,32	53,58	21,32	53,05	21,39	53,59	0,00	0,53	0,07	0,54	0,07	0,01
56	29.05.14 03:45:00	21,30	53,58	21,32	53,08	21,37	53,59	0,02	0,49	0,05	0,51	0,07	0,01
57	29.05.14 04:00:00	21,30	53,58	21,30	53,08	21,35	53,58	0,00	0,50	0,05	0,50	0,05	0,01
58	29.05.14 04:15:00	21,27	53,60	21,30	53,08	21,35	53,61	0,02	0,53	0,05	0,54	0,07	0,01
59	29.05.14 04:30:00	21,27	53,64	21,27	53,11	21,35	53,61	0,00	0,53	0,07	0,51	0,07	0,02

Tab. 105| Überprüfung der Messgüte der drei verwendeten Datenlogger 'Logger_01', 'Logger_02' und 'Logger_03' ('HOBO UX100', der Firma 'Onset').
Quelle: Selbst

30. Verzeichnisse

30.1 Verzeichnis der Abbildungen

(fortlaufend geordnet)

Abb. 1| Quelle: Felbermeyer, 1945 19
Abb. 2| Quelle: Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2014a 20
Abb. 3| Quelle: Selbst 28
Abb. 4| Quelle: Selbst 28
Abb. 5| Quelle: Selbst 32
Abb. 6| Quelle: Selbst 32
Abb. 7| Quelle: Selbst 37
Abb. 8| Quelle: Dougherty, 1991 54
Abb. 9| Quelle: Colville u. a., 1982, Seite 148 55
Abb. 10| Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 197 55
Abb. 11| Quelle: Herdin, 2012, Seite 62 56
Abb. 12| Quelle: Colville u. a., 1982, Seite 150 56
Abb. 13| Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 210 57
Abb. 14| Quelle: Mecklenburg & Tumosa, 1991a, Seite 211 57
Abb. 15| Quelle: Buchta u. a., 2015a, Seite 8 f. 65
Abb. 16| Quelle: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 6 66
Abb. 17| Quelle: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 7 66
Abb. 18| Quelle: Hopfner & Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH), 2012, Seite 12 67
Abb. 19| Quelle: Läuchli u. a., 2014, Seite 3 67
Abb. 20| Quelle: Läuchli u. a., 2014, Seite 3 67
Abb. 21| Quelle: Palmbach u. a., 2013, Seite 33 68
Abb. 22| Quelle: Palmbach u. a., 2013, Seite 35 68
Abb. 23| Quelle: Mairinger, 2003, Seite 34 69
Abb. 24| Quelle: Mairinger, 2003, Seite 34 69
Abb. 25| Quelle: Schaible, 1990a, Seite 236 70
Abb. 26| Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237 71
Abb. 27| Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237 71
Abb. 28| Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237 71
Abb. 29| Quelle: Schaible, 1990a, Seite 237 71
Abb. 30| Quelle: Zehnder, 1997, Seite 310 73
Abb. 31| Quelle: Zehnder, 1997, Seite 311 74
Abb. 32| Quelle: Ohne Verf. (University of Southampton), 2015 75
Abb. 33| Quelle: Ohne Verf. (University of Southampton), 2015 75
Abb. 34| Quelle: Saunders & Cupitt, 1993, Seite 73. 76
Abb. 35| Quelle: Burmester u. a., 1993, Seite 402 ... 77
Abb. 36| Quelle: Guidi u. a., 2004, Seite 5 78
Abb. 37| Quelle: Guidi u. a., 2004, Seite 7 79
Abb. 38| Quelle: Hein & Krekel, 2010, Seite 142 80
Abb. 39| Quelle: Hein & Krekel, 2010, Seite 140 81
Abb. 40| Quelle: Prof. Dr. Christoph Krekel und selbst 113
Abb. 41| Quelle: Buchta u. a., 2015b, Seite 2 121
Abb. 42| Quelle: Frankowski, 1999, Seite 2 122
Abb. 43| Quelle:Frankowski, 1999, Seite 3 122
Abb. 44| Quelle: Maas, 1997, Seite 73 123
Abb. 45| Quelle: Selbst 124
Abb. 46| Quelle: Selbst 125
Abb. 47| Quelle: Selbst 125
Abb. 48| Quelle: Selbst 126
Abb. 49| Quelle: Selbst 127
Abb. 50| Quelle: Selbst 128
Abb. 51| Quelle: Selbst 128
Abb. 52| Quelle: Selbst 128
Abb. 53| Quelle: Selbst 128
Abb. 54| Quelle: Selbst 129
Abb. 55| Quelle: Selbst 129
Abb. 56| Quelle: Selbst 129
Abb. 57| Quelle: Selbst 129
Abb. 58| Quelle: Selbst 130
Abb. 59| Quelle: Selbst 131
Abb. 60| Quelle: Selbst 132
Abb. 61| Quelle: Selbst 132
Abb. 62| Quelle: Selbst 135
Abb. 63| Quelle: Selbst 135
Abb. 64| Quelle: Selbst 137
Abb. 65| Quelle: Selbst 140
Abb. 66| Quelle: Selbst 141
Abb. 67| Quelle: Selbst 142
Abb. 68| Quelle: Selbst 142
Abb. 69| Quelle: Selbst 143
Abb. 70| Quelle: Selbst 144
Abb. 71| Quelle: Selbst 145
Abb. 72| Quelle: Nach Franz (Fa. Steinbichler), 2013 145
Abb. 73| Quelle: Selbst 145
Abb. 74| Quelle: Selbst 146
Abb. 75| Quelle: Selbst 146
Abb. 76| Quelle: Selbst 146
Abb. 77| Quelle: Selbst 147
Abb. 78| Quelle: Selbs 147
Abb. 79| Quelle: Selbst 148
Abb. 80| Quelle: Selbst 149
Abb. 81| Quelle: Selbst 149
Abb. 82| Quelle: Selbst 150
Abb. 83| Quelle: Selbst 151
Abb. 84| Quelle: Selbst 154
Abb. 85| Quelle: Selbst 155
Abb. 86| Quelle: Stella Overmann 160
Abb. 87| Quelle: Selbst 161
Abb. 88| Quelle: Stella Overmann 162
Abb. 89| Quelle: Stella Overmann 162
Abb. 90| Quelle: Selbst 163
Abb. 91| Quelle: Selbst 164
Abb. 92| Quelle: Selbst 165
Abb. 93| Quelle: Selbst 169
Abb. 94| Quelle: Selbst 170
Abb. 95| Quelle: Selbst 171
Abb. 96| Quelle: Selbst 172
Abb. 97| Quelle: Selbst 173
Abb. 98| Quelle: Selbst 174
Abb. 99| Quelle: Daniel Claus 175
Abb. 100| Quelle: Daniel Claus 175

Abb. 101| Quelle: Daniel Claus ... 176
Abb. 102| Quelle: Daniel Claus ... 176
Abb. 103| Quelle: Selbst ... 180
Abb. 104| Quelle: Selbst ... 181
Abb. 105| Quelle: Selbst ... 182
Abb. 106| Quelle: Selbst ... 183
Abb. 107| Quelle: Selbst ... 184
Abb. 108| Quelle: Selbst ... 185
Abb. 109| Quelle: Selbst ... 188
Abb. 110| Quelle: Selbst ... 189
Abb. 111| Quelle: Selbst ... 190
Abb. 112| Quelle: Selbst ... 191
Abb. 113| Quelle: Janet Schramm ... 192
Abb. 114| Quelle: Selbst ... 192
Abb. 115| Quelle: Selbst ... 194
Abb. 116| Quelle: Selbst ... 195
Abb. 117| Quelle: Selbst ... 196
Abb. 118| Quelle: Selbst ... 197
Abb. 119| Quelle: Selbst ... 200
Abb. 120| Quelle: Selbst ... 201
Abb. 121| Quelle: Selbst ... 202
Abb. 122| Quelle: Selbst ... 203
Abb. 123| Quelle: Selbst ... 207
Abb. 124| Quelle: Selbst ... 209
Abb. 125| Quelle: Selbs ... 210
Abb. 126| Quelle: Dominic Buchta, selbst ... 212
Abb. 127| Quelle: Selbst, nach Kühn, 2001, Seite 11 und Mairinger, 2003, Seite 11 ... 220
Abb. 128| Quelle: Selbst, nach Kühn, 2001, Seite 11 und Mairinger, 2003, Seite 11 ... 220
Abb. 129| Quelle: Selbst ... 224
Abb. 130| Quelle: Selbst ... 224
Abb. 131| Quelle: Selbst ... 226
Abb. 132| Quelle: Selbst ... 227
Abb. 133| Quelle: Selbst ... 229
Abb. 134| Quelle: Selbst ... 230
Abb. 135| Quelle: Selbst ... 231
Abb. 136| Quelle: Selbst ... 232
Abb. 137| Quelle: Selbst ... 233
Abb. 138| Quelle: Selbst ... 234
Abb. 140| Quelle: Selbst ... 239
Abb. 139| Quelle: Selbst ... 239
Abb. 141| Quelle: Selbst ... 240
Abb. 142| Quelle: Selbst ... 241
Abb. 143| Quelle: Selbst ... 241
Abb. 144| Quelle: Selbst ... 242
Abb. 145| Quelle: Selbst ... 242
Abb. 146| Quelle: Selbst ... 243
Abb. 147| Quelle: Selbst ... 244
Abb. 148| Quelle: Selbst ... 244
Abb. 149| Quelle: Selbst ... 245
Abb. 150| Quelle: Selbst ... 246
Abb. 151| Quelle: Selbst ... 248
Abb. 152| Quelle: Selbst ... 248
Abb. 153| Quelle: Selbst ... 249
Abb. 154| Quelle: Selbst ... 250
Abb. 155| Quelle: Selbst ... 252
Abb. 156| Quelle: Selbst ... 255
Abb. 157| Quelle: Selbst ... 259
Abb. 158| Quelle: Selbst ... 260
Abb. 159| Quelle: Selbst ... 261
Abb. 160| Quelle: Selbst ... 263
Abb. 161| Quelle: Selbst ... 265
Abb. 162| Quelle: Selbst ... 267
Abb. 163| Quelle: Selbst ... 274
Abb. 164| Quelle: Selbst ... 275
Abb. 165| Quelle: Selbst ... 282
Abb. 166| Quelle: Selbst ... 283
Abb. 167| Quelle: Selbst ... 283
Abb. 168| Quelle: Selbst ... 292
Abb. 169| Quelle: Selbst ... 293
Abb. 170| Quelle: Selbst ... 294
Abb. 171| Quelle: Selbst ... 295
Abb. 172| Quelle: Selbst ... 296
Abb. 173| Quelle: Selbst ... 297
Abb. 174| Quelle: Selbst ... 298
Abb. 175| Quelle: Selbst ... 300
Abb. 176| Quelle: Selbst ... 301
Abb. 177| Quelle: Selbst ... 302
Abb. 178| Quelle: Selbst ... 305
Abb. 179| Quelle: Selbst ... 306
Abb. 180| Quelle: Selbst ... 307
Abb. 181| Quelle: Selbst ... 309
Abb. 182| Quelle: Selbst ... 311
Abb. 183| Quelle: Selbst ... 316
Abb. 184| Quelle: Selbst ... 320
Abb. 185| Quelle: Selbst ... 321
Abb. 186| Quelle: Selbst ... 323
Abb. 187| Quelle: Selbst ... 325
Abb. 188| Quelle: Selbst ... 326
Abb. 189| Quelle: Selbst ... 329
Abb. 190| Quelle: Selbst ... 330
Abb. 191| Quelle: Selbst ... 331
Abb. 192| Quelle: Selbst ... 332
Abb. 193| Quelle: Selbst ... 333
Abb. 194| Quelle: Selbst ... 335
Abb. 195| Quelle: Selbst ... 336
Abb. 196| Quelle: Selbst ... 338
Abb. 197| Quelle: Selbst ... 339
Abb. 198| Quelle: Selbst ... 340
Abb. 199| Quelle: Selbst ... 342
Abb. 200| Quelle: Selbst ... 343
Abb. 201| Quelle: Selbst ... 344
Abb. 202| Quelle: Selbst ... 346
Abb. 203| Quelle: Selbst ... 347
Abb. 204| Quelle: Selbst ... 349
Abb. 205| Quelle: Selbst ... 350
Abb. 206| Quelle: Selbst ... 351
Abb. 207| Quelle: Selbst ... 356
Abb. 208| Quelle: Selbst ... 357
Abb. 209| Quelle: Selbst ... 358
Abb. 210| Quelle: Selbst ... 359
Abb. 211| Quelle: Selbst ... 361
Abb. 212| Quelle: Selbst ... 363
Abb. 213| Quelle: Selbst ... 365
Abb. 214| Quelle: Selbst ... 366
Abb. 215| Quelle: Selbst ... 368
Abb. 216| Quelle: Selbst ... 370

Abb. 217| Quelle: Selbst 370
Abb. 218| Quelle: Selbst 376
Abb. 219| Quelle: Selbst 377
Abb. 220| Quelle: Selbst 378
Abb. 221| Quelle: Selbst 379
Abb. 222| Quelle: Selbst 380
Abb. 223| Quelle: Selbst 381
Abb. 224| Quelle: Selbst 382
Abb. 225| Quelle: Selbst 383
Abb. 226| Quelle: Selbst 388
Abb. 227| Quelle: Selbst 389
Abb. 228| Quelle: Selbst 390
Abb. 229| Quelle: Selbst 391
Abb. 230| Quelle: Selbst 396
Abb. 231| Quelle: Selbst 397
Abb. 232| Quelle: Selbst 398
Abb. 233| Quelle: Selbst 399
Abb. 234| Quelle: Selbst 400
Abb. 235| Quelle: Selbst 401
Abb. 236| Quelle: Selbst 402
Abb. 237| Quelle: Selbst 407
Abb. 238| Quelle: Selbst 408
Abb. 239| Quelle: Selbst 409
Abb. 240| Quelle: Selbst 410
Abb. 241| Quelle: Selbst 411
Abb. 242| Quelle: 'Associazione Giovanni Secco-suardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration' 436
Abb. 243| Quelle: 'Associazione Giovanni Secco-suardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration' 437
Abb. 244| Quelle: 'Associazione Giovanni Secco-suardo – LMCR – Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration' 438
Abb. 245| Quelle: Kühn, 2001, Seite 40 440
Abb. 246| Quelle: Kühn, 2001, Seite 41 440
Abb. 247| Quelle: Sandner, 1990, Seite 80 442
Abb. 248| Quelle: Nicolaus, 1998, 1990, Seite 166 f. 445
Abb. 249| Quelle: Nicolaus, 1998, Seite 165 445
Abb. 250| Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensor-spezifikation), 2012 446
Abb. 251| Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensor-spezifikation), 2012 447
Abb. 252| Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensor-spezifikation), 2012 448
Abb. 253| Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensor-spezifikation), 2012 449
Abb. 254| Quelle: Ohne Verf. (Leuchtmittel OSRAM), 2012 450
Abb. 255| Quelle:Ohne Verf. (Leuchtmittel OSRAM), 2012 450
Abb. 257| Quelle: Rodenstock (Objektiv-spezifikation), 2012 451
Abb. 256| Quelle: Rodenstock (Objektiv-spezifikation), 2012 451
Abb. 259| Quelle: Rodenstock (Objektiv-spezifikation), 2012 452
Abb. 258| Quelle: Rodenstock (Objektiv-spezifikation), 2012 452
Abb. 261| Quelle: Rodenstock (Objektiv-spezifikation), 2012 453
Abb. 260| Quelle: Rodenstock (Objektivspezifi-kation), 2012 453
Abb. 263| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 454
Abb. 262| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 454
Abb. 265| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 455
Abb. 264| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 455
Abb. 267| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 456
Abb. 266| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 456
Abb. 269| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 457
Abb. 268| Quelle: Zeiss AG (Objektivspezifi-kation), 2012 457
Abb. 271| Quelle: Selbst 458
Abb. 270| Quelle: Selbst 458
Abb. 272| Quelle: Selbst 459
Abb. 273| Quelle: Selbst 459
Abb. 274| Quelle: Selbst 460
Abb. 275| Quelle: Selbst 460
Abb. 276| Quelle: Selbst 461
Abb. 277| Quelle: Selbst 462
Abb. 278| Quelle: Elisabeth George 464
Abb. 279| Quelle: Elisabeth George 464
Abb. 280| Quelle: Selbst 464
Abb. 281| Quelle: Selbst 465
Abb. 282| Quelle: Selbst 466
Abb. 283| Quelle: Selbst 468
Abb. 284| Quelle: Selbst 469
Abb. 285| Quelle: Selbst 470
Abb. 286| Quelle: Selbst 472
Abb. 287| Quelle: Selbst 475
Abb. 288| Quelle: Selbst 478
Abb. 289| Quelle: Selbst 479
Abb. 290| Quelle: Selbst 479
Abb. 291| Quelle: Selbst 479
Abb. 293| Quelle: Selbst 480
Abb. 294| Quelle: Selbst 480
Abb. 292| Quelle: Selbst 480
Abb. 295| Quelle: Selbst 482
Abb. 296| Quelle: Selbst 485
Abb. 297| Quelle: Selbst 488
Abb. 298| Quelle: Selbst 492
Abb. 299| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 495
Abb. 300| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 496
Abb. 301| Quelle: Selbst 498
Abb. 302| Quelle: Elisabeth George, selbst 500
Abb. 303| Quelle: Selbst 501
Abb. 304| Quelle: Selbst 502
Abb. 305| Quelle: Selbst 503
Abb. 306| Quelle: Selbst 504
Abb. 307| Quelle: Selbst 505
Abb. 308| Quelle: Selbst 506
Abb. 309| Quelle: Selbst 507
Abb. 310| Quelle: Daniel Claus, selbst bearbeitet ... 509
Abb. 311| Quelle: selbst 511

Abb. 312| Quelle: Selbst 512
Abb. 313| Quelle: Selbst 512
Abb. 314| Quelle: Selbst 512
Abb. 315| Quelle: Selbst 516
Abb. 316| Quelle: Selbst 517
Abb. 317| Quelle: Selbst 518
Abb. 318| Quelle: Selbst 519
Abb. 319| Quelle: Selbst 520
Abb. 320| Quelle: Selbst 521
Abb. 321| Quelle: Selbst 522
Abb. 322| Quelle: Selbst 523
Abb. 323| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 527
Abb. 324| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 527
Abb. 325| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 528
Abb. 326| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 530
Abb. 327| Quelle: Lyda & Pedrini, 2013 531
Abb. 328| Quelle:Giesler (Fa. Steinbichler), 2012 532
Abb. 330| Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 ... 533
Abb. 329| Quelle:Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 533
Abb. 332| Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 534
Abb. 331| Quelle: Fasser (Fa. Steinbichler), 2013 ... 534

30.2 Verzeichnis der Tabellen

(fortlaufend geordnet)

Tab. 1| Quelle: Selbst 26
Tab. 2| Quelle: Selbst 30
Tab. 3| Quelle: Selbst 31
Tab. 4| Quelle: Selbst 33
Tab. 5| Quelle: Selbst 34
Tab. 6| Quelle: Selbst 35
Tab. 7| Quelle: Selbst 36
Tab. 8| Quelle: Selbst 37
Tab. 9| Quelle: Selbst 38
Tab. 10| Quelle: Selbst 39
Tab. 11| Quelle: Selbst 40
Tab. 12| Quelle: Plenderleith & Philippot, 1960, Seite 279 46
Tab. 13| Quelle: Kotterer, 2004a, Seite 115 47
Tab. 14| Quelle: Selbst 92
Tab. 15| Quelle: Michael Morawitz, selbst 95
Tab. 16| Quelle: Ohne Verf. (COMET 5 Sensor-spezifikation), 2012, Seite 3 und Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch), 2011, Seite 8f. 126
Tab. 17| Quelle: Selbst 155
Tab. 18| Quelle: Selbst 157
Tab. 19| Quelle: Selbst 162
Tab. 20| Quelle: Selbst 168
Tab. 21| Quelle: Selbst 179
Tab. 22| Quelle: Selbst 187
Tab. 23| Quelle: Selbst 193
Tab. 24| Quelle: Selbst 199
Tab. 25| Quelle: Selbst 206
Tab. 26| Quelle: Selbst 208
Tab. 27| Quelle: Selbst 226
Tab. 28| Quelle: Selbst, nach Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 2005, Seite 5; Ohne Verf. (DIN EN ISO 483), 1999 , Seite 6; Greenspan, 1977 Seite 92 238
Tab. 29| Quelle: Selbst 257
Tab. 30| Quelle: Selbst 258
Tab. 31| Quelle: Selbst 268
Tab. 32| Quelle: Selbst 268
Tab. 33| Quelle: Selbst 269
Tab. 34| Quelle: Selbst 270
Tab. 35| Quelle: Selbst 271
Tab. 36| Quelle: Selbst 272
Tab. 37| Quelle: Selbst 273
Tab. 38| Quelle: Selbst 273
Tab. 39| Quelle: Selbst 276
Tab. 40| Quelle: Selbst 277
Tab. 41| Quelle: Selbst 277
Tab. 42| Quelle: Selbst 277
Tab. 43| Quelle: Selbst 278
Tab. 44| Quelle: Selbst 279
Tab. 45| Quelle: Selbst 280
Tab. 46| Quelle: Selbst 280
Tab. 47| Quelle: Selbst 281
Tab. 48| Quelle: Selbst 282
Tab. 49| Quelle: Selbst 288
Tab. 50| Quelle: Selbst 289
Tab. 51| Quelle: Selbst 313
Tab. 52| Quelle: Selbst 314
Tab. 53| Quelle: Selbst 315
Tab. 54| Quelle: Selbst 318
Tab. 55| Quelle: Selbst 354
Tab. 56| Quelle: Selbst 354
Tab. 57| Quelle: Selbst 371
Tab. 58| Quelle: Selbst 371
Tab. 59| Quelle: Selbst 374
Tab. 60| Quelle: Selbst 375
Tab. 61| Quelle: Selbst 384
Tab. 62| Quelle: Selbst 384
Tab. 63| Quelle: Selbst 386
Tab. 64| Quelle: Selbst 387
Tab. 65| Quelle: Selbst 392
Tab. 66| Quelle: Selbst 392
Tab. 67| Quelle: Selbst 394
Tab. 68| Quelle: Selbst 395
Tab. 69| Quelle: Selbst 403
Tab. 70| Quelle: Selbst 403
Tab. 71| Quelle: Selbst 405
Tab. 72| Quelle: Selbst 406
Tab. 73| Quelle: Selbst und Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung, 2013 und frühere ... 435
Tab. 74| Quelle: Selbst 460
Tab. 75| Quelle: Selbst 460
Tab. 76| Quelle: Selbst 463
Tab. 77| Quelle: Selbst 463
Tab. 78| Quelle: Selbst 463
Tab. 79| Quelle: Selbst 466
Tab. 80| Quelle: Selbst 467
Tab. 81| Quelle: Selbst 471
Tab. 82| Quelle: Selbst 471
Tab. 83| Quelle: Selbst 474

Tab. 84| Quelle: Selbst..... 476
Tab. 85| Quelle: Selbst..... 477
Tab. 86| Quelle: Selbst..... 477
Tab. 87| Quelle: Selbst..... 481
Tab. 88| Quelle: Selbst..... 484
Tab. 89| Quelle: Selbst..... 485
Tab. 90| Quelle: Selbst..... 487
Tab. 91| Quelle: Selbst..... 489
Tab. 92| Quelle: Selbst..... 491
Tab. 93| Quelle: Selbst..... 493
Tab. 94| Quelle: Selbst..... 494
Tab. 95| Quelle: Selbst..... 495
Tab. 96| Quelle: Selbst..... 497
Tab. 97| Quelle: Selbst..... 499
Tab. 98| Quelle: Selbst..... 502
Tab. 99| Quelle: Daniel Claus, selbst bearbeitet... 508
Tab. 100| Quelle: Selbst..... 510
Tab. 101| Quelle: Selbst..... 514
Tab. 102| Quelle: Selbst..... 515
Tab. 103| Quelle: Selbst..... 525
Tab. 104| Quelle: Daniel Claus, bearbeitet selbst und selbst 531
Tab. 105| Quelle: Selbst..... 535

30.3 Literaturverzeichnis

(alphabetisch geordnet)

Ashley-Smith, Jonathan; Umney, Nick; Ford, David:
Let´s be honest - realistic environmental Parameters for loaned objects. In: Ashok, R.; Smith, P. (Hrsg.): Preventive Conservation Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994: ICOM Commitee for Conservation. Los Angeles, 1994, S. 28–31

Associazione Giovanni Secco Suardo (LMCR):
Multilingual Technical Scientific Glossary in Conservation and Restoration. URL http://www.associazionegiovannisecco suardo.it/?q=en/node/163 [abgerufen 2013-10-22]

Atkinson, Kirby:
Environmental Conditions for the Safeguard of Collections: A Background to the Current Debatte on the Control of Relative Humidity and Temperature. In: Reedy, C. (Hrsg.): Studies in Conservation: Band 4, Jahrgang 59. 2014, S. 205–212

Bachmann, Andreas:
Das unmerkliche Schwinden der Originale. In: Bachmann, K.; Dasser, K.; Reichwald, H.; Schießl, U. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK: Band. 2, Jahrgang 11. 1997, S. 201–206

Baur, Joachim:
Ausstellen: Trends und Tendenzen im kulturhistorischen Feld. In: Graf, B.; Rodekamp, V. (Hrsg.): Museen zwischen Qualität und Relevanz: Denkschrift zur Lage der Museen. Berliner Schriftenreihe zur Museumsforschung. Institut für Museumsforschung – Staatliche Museen zu Berlin: Band 30. Berlin, 2012 S. 141-154

Bauer, Norbert (Hrsg.):
Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. Fraunhofer-Allianz Vision. Band 6. Stuttgart, 2003

Bauer, Norbert (Hrsg.):
Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung:
Qualitätssicherung in der Praxis. Stuttgart, 2007

Bertani, Duilio; Cetica, Maurizio; Melozzi, Mauro; Pezzati, Luca:
High-Resolution Optical Topography Applied to Ancient Painting Diagnostics. In: Javidi, B. (Hrsg.): Optical Engineering. Band 34, Nummer 4 / 1219. 1995, S. 1–7

Besch, Ulrike (Hrsg.):
Restauratoren Taschenbuch. 1998. München, 1997

Bickersteth, Julian:
Environmental Conditions for the Safeguard of Collections: What Schould our Set Points be? In: Reedy, C. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band. 4, Jahrgang 59. 2014, S. 218–224

Blender (3D-Grafik Software):
Unternehmenswebsite: Stichting Blender Foundation. URL http://www.blender.org [abgerufen 2015-04-13]

Brachert, Thomas:
Patina: Von Nutzen und Nachteil der Restaurierung. 2. Auflage. München, 1995

Bratasz, Lukasz:
Allowable Microclimatic Variations in Museums and Historic Buildings: Reviewings the Guidelines. In: Ashley-Smith, J.; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S.11–19

Bratasz, Lukasz; Kozlowski, Roman:
Laser Sensors for Continuous In-Situ Monitoring of the Dimensional Response of Wooden Objects. In: Scott, D. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band. 3, Jahrgang 50. 2005, S. 307–315

Brewer, Al; Forno, Colin:
Moiré Fringe Analysis of Cradled Panel Paintings. In: Thomson, G. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band. 1, Jahrgang 42. 1997, S. 211–230

Broström, Tor; Vyhlidal, Tomas; Simeunovic, Goran; Larsen, Poul; Zitek, Pavel:
Evaluation of Different Approaches of Microclimate Control in Cultural Heritage Buildings. In: Ashley-Smith, A.; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S.105–115

Brozio, Patricia; Michelmann, Alexandra.; Dangelmaier, Sabine (Hrsg.):
Restauratoren Taschenbuch 2010/2011. München, 2009

Buchta, Dominic; Hein, Niclas; Heinemann, Carolin; Pedrini, Giancarlo; Krekel, Christoph; Osten, Wolfgang:
Artwork Inspection by Shearography with Adapted Loading. In: Tippur, H. (Hrsg.): Experimental Mechanics. Band. 1, Jahrgang 55, Nummer 113401. 2015(a), S.1–11

Buchta, Dominic; Hein, Niclas; Pedrini, Giancarlo; Krekel, Christoph; Osten, Wolfgang:
Combination of Topology and Structural Information for Damages and Deterioration Analysis of Artworks. In: Pezzati, L.; Targowski, P. (Hrsg.): SPIE Procedings: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology. Band IV, Nummer 9527. 2015(b), S.1–10

Bucklow, Spike:
The Description of Craquelure Patterns. In: Thomson, G. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band 1, Jahrgang 42. 1997, S.129–139

Buczynski, Bodo; Hartwieg, Babette; Schaible, Volker:
Bewahren: Aufgabe, Qualifikation und Position der Konservierung und Restaurierung. In: Graf, B. ; Rodekamp, V. (Hrsg.): Museen zwischen Qualität und Relevanz: Denkschrift zur Lage der Museen. Berliner Schriftenreihe zur Museumsforschung. Institut für Museumsforschung – Staatliche Museen zu Berlin: Band 30. Berlin, 2012, S. 89–1012

Burmester, Andreas; Eibl, Melanie:
Die Münchner Positionen zu Klima und Kulturgut, (selbstv. Dokument. Doerner Institut, Bayerische Staatsgemäldesammlung). URL http://www.doernerinstitut.de/downloads/Stellungnahme_Doerner_Bizot_de.pdf [abgerufen 2014-01-25]

Burmester, Andreas; Müller, Manfred:
The Registration of Transportation Damage Using Digital Image Processing. In: Bachmann, W.; Reichwald, H.; Schießl, U.; Dasser, K. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band. 2, Jahrgang 6. 1992, S. 335–345

Burmester, Andreas; Müller, Manfred; Schwerner, Florian:
Locating Transportation Damages by Digital Imaging: Two Case Studies. In: Bridgland, J. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 10th Triennial Meeting, Washington, DC, USA, 22-27 August 1993: Preprints: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. 1993, S. 401–405

Burmester, Andreas; Wei, W.[?]:
All Good Paintings Crack: Nondestructive Analysis of Transport Damage of Paintings Using Digital Image Processing. In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art, 3.-8. Oktober 1994. Band 45. Berlin, 1994, S.114–126

Caldicott, Peter:
Vibration and Schock in Transit Situations: A Practical Evaluation Using Random Vibration Techniques. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 345–368

Cassar, May:
Environmental Management: Guidelines for Museums and Galleries. Londond, New York, 1995

Colville, James; Kilpatrick, William; Mecklenburg, Marion:
A Finite Element Analysis of Multi-Layered Orthotropic Membranes with Application to Oil Paintings on Fabric. In: Brommelle, N.; Thomson, G. (Hrsg.): IIC Preprints of the Contributions to the Washington Congress, 3-9 September 1982: Preprints: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. London, 1982, S. 146–150

Costain, Charles:
Scientific Rationale for Studies on Packing and Transportation of Paintings: An Introduction to the Issues. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 12–24

Dell GmbH (Notebookspezifikation):
Dell Precision M6600: Notebook. URL http://www.dell.com/de/unternehmen/p/precision-m6600/pd [abgerufen 2012-08-14]

Deutsche Forschungsgemeinschaft (Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte):
DFG Jahresbericht - Programme und Projekte. URL http://jahresbericht.dfg.de/2011/OCTOPUS;jsessionid=7DBAB4BE9C52DB50C5E8DEBD9B5A073D;jsessionid=66C4B79719F88897B9CA349CFEA0C7D1?module=2011&task=showDetail&context=projekt&id=201547731 [abgerufen 2013-04-18]

Deutscher Museumsbund (Ethik & Standards):
Ethik & Standards (Bewahren). URL http://www.museumsbund.de/de/das_museum/ethik_standards/museumsethik/bewahren [abgerufen 2014-01-21]

Dillon, Catherine; William, Lindsay; Taylor, Joel; Kalliopi, Fouseki; Bell, Nancy; Strlic, Matija:
Collections Demography: Stakeholders' Views on the Lifetime of Collections. In: Ashley-Smith, A.; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S. 45–58

Dobrusskin, Beate; Glaus, Kirsten; Rosstone, Jean; Mentzel, Elke:
Katalog der Schadensbilder: Spuren und Phänomene an Kunst und Kulturgut: Papier. Schriftenreihe Konservierung und Restaurierung der HKB. Bern, 2012

Doerner Institut (Klima - Bizot-Gruppe):
Klima und Kulturgut: Wissen und Unwissen. URL http://www.doernerinstitut.de/de/projekte/kuk2012/kuk_1.html [abgerufen 2013-05-06]

Doerner, Max; Hoppe, Thomas:
Malmaterial und seine Verwendung im Bilde. 19. Auflage. Berlin, 2001

Dougherty, Harold:
Charles Tumosa and Marion Mecklenburg (Smithsonian Institut). URL http://siris-sihistory.si.edu/ipac20/ipac.jsp?&profile=all&source=~!sichronology&uri=full=3100001~!7061~!0#focus [abgerufen 2012-09-28]

Duden (Wörterbuch: Alterung):
Alterung. URL http://www.duden.de/rechtschreibung/Alterung [abgerufen 2013-09-19]

Duden (Wörterbuch: Craquelé):
Craquelé. URL http://www.duden.de/rechtschreibung/Craquele [abgerufen 2013-09-19]

Duden (Wörterbuch: Schaden):
Schaden. URL http://www.duden.de/rechtschreibung/Schaden [abgerufen 2013-09-19]

Dupont, Cornelius:
Movement of Wood and Canvas for Paintings in Response to High and Low RH Cycles. In: Thomson, G. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band. 2, Jahrgang 12. 1967, S. 76–80

Eggert, Gerhard:
Im Museum = außer Gefahr? Wie anorganische Exponate zerfallen. In: ICOM Deutschland (Hrsg.): Zur Ethik des Bewahrens: Konzepte, Praxis, Perspektiven - Jahrestagung 2013 von ICCOM Deutschland: Köln, 17. bis 19. Oktober 2013. ICOM Deutschland - Beiträge zur Museologie. Band 4. Berlin, 2014, S. 115–124

Eibl, Melanie; Burmester, Andreas:
Learning From History: Historic Indoor Climate Conditions and Climate Control Strategies. In: Ashley-Smith, A.; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S. 217–232

Eibner, Alexander:
Entwicklung und Werkstoffe der Tafemalerie. Nachdruck der Ausgabe von 1928. München, 1974

Eipper, Paul-Bernhard. (Hrsg.):
Ölfarben-Oberflächenuntersuchung mittels 3D-Streifenprojektion: Untersuchung unbehandelter und behandelter Ölfarbenoberflächen durch das 3D-Streifenprojektionsverfahren auf Mikrospiegelbasis. Saarbrücken, 2010

Erhardt, David:
Art in Transit: Material Considerations. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 25–36

Erhardt, David; Mecklenburg, Marion:
Relative Humidity Re-Examined. In: Roy, A.; Smith, P. (Hrsg.): Preventive Conservation Practice, Theory and Research: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994. Los Angeles, 1994, S. 32–38

Falser, Michael:
Von der Venice Charter 1964 zum Nara Document on Authenticity 1994: 30 Jahre »Authentizität« im Namen des kulturellen Erbes der Welt. In: Kunstgeschichte. Open Peer Reviewed Journal (2011). URL http://www.kunstgeschichte-ejournal.net/121/ [2014-05-06]

Fasser, Maximilian (Fa. Steinbichler):
Auflösung_COMET5. 2013. Email, abgedruckt im Anhang dieser Schrift

Fasser, Maximilian (Fa. Steinbichler):
Verstärkungsfaktor_Kamera (Gain). 2013. Email, abgedruckt im Anhang dieser Schrift

Felbermeyer, Johannes:
Central Art Collecting Point (Munich, Germany), 1945. The Getty Research Institute. URL http://archives.getty.edu/view/action/nmets.do?DOCCHOICE=5554293.xml&dvs=1390491542888~170&locale=de_DE&search_terms=johannes%2520felbermeyer&adjacency=N&VIEWER_URL=/view/action/nmets.do?&DELIVERY_RULE_ID=4&usePid1=true&usePid2=true [2014-01-23]

Fink, Gerhard:
Ovids Metamorphosen: Meisterwerke kurz und bündig. München, 2000

Fischer, Lisanne:
Ein Tafelfresko von Georg Muche: Analyse der Werktechnik- Bestands und Zustandsaufnahme- und Erstellung eines Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (unv. Masterarbeit). Stuttgart, 2013. URL http://wandmalereirestaurierung.abk-stuttgart.de/archiv-projekte/diplomarbeiten-abstracts/ [2013-03-21]

Foba AG (Stativspezifikation):
Unternehmenswebsite: Stativ. Foba AG. URL http://www.foba.ch/eng/programm/programm.htm [abgerufen 2012-02-03]

Frankowski, Gottfried:
Optische 3D-Meßtechnik für Forschung und Produktion mit digitaler Mikrospiegel-Streifenprojektion: Fachtagung „Qualitätssicherung durch Meßtechnik und Bildverarbeitung": Steyr, 1999. URL http://www.gfm3d.com/images/stories/publikationen/3d_messtechnik.pdf [2014-02-07]

Franz, Maximilian (Fa. Steinbichler):
Datennachverarbeitung_in_COMETplus. 2013. Email, abgedruckt im Anhang dieser Schrift, siehe hierzu: Fasser, Maximilian (Fa. Steinbichler): Auflösung_COMET5. 2013

Geo DZ (Schleifender Schnitt), Geografielexikon:
Schleifender Schnitt. URL http://www.geodz.com/deu/d/schleifender_Schnitt [abgerufen 2012-08-21]

Giesler (Fa. Steinbichler), Matthias:
Sensorbedienung_HiRes-LoRes. 2012. Email, abgedruckt im Anhang dieser Schrift

Graf, Berndhard:
Besucherorientierung als Leitziel der Museumsarbeit in der Bundesrepublik Deutschland. In: Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Geöffnet! das Museum für den Besucher: 10. Bayerischer Museumstag: Landshut 7.-9. Juli 1999. Band. 34. München, 2000, S. 21–29

Graf, Bernhard; Rodekamp, Volker; Institut für Museumsforschung - Staatliche Museen zu Berlin e. V. (Hrsg.):
Museen zwischen Qualität und Relevanz: Denkschrift zur Lage der Museen. Berliner Schriftenreihe zur Museumsforschung. Institut für Museumsforschung – Staatliche Museen zu Berlin: Band 30. Berlin, 2012

Green, Timothy:
A Cushioned Transit Frame for Paintings. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991(a), S. 37–48

Green, Timothy:
Performance Criteria for Packing. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991(b), S.49–58

Greenspan, Lewis:
Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. In: Institute for Basic Standards: National Bureau of Standards: Washington, D. C. 20234 (Hrsg.): Journal of Research of the National Bureau of Standards: Physics and Chemistry. Band 81 A , Nummer 1. Washington, 1977, S. 89–96

Großeschmidt, Henning:
Stabilisierung des Raumklimas als Grundlage sachgerechter Bewahrung, oder: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Großvitrine. In: Fugger, W.; Kreilinger, K. (Hrsg.): Das Museumsdepot: Grundlagen: Erfahrungen: Beispiele: Museums-Bausteine. Band 4. München, 1998, S. 49–79

Guidi, Gabriele; Atzeni, Carlo; Seracini, Mauizio; Lazzari, Sara: Painting Survey by 3D Optical Scanning:
The Case of Adoration of the Magi by Leonardo da Vinci. In: Scott, D. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band 1, Jahrgang 49. 2004, S. 1–12

Guidi, Gabriele; Spinetti, Alessandro; Carosso, Luca; Atzeni, Carlo; Scott, David:
Digital Three-Dimensional Modelling of Donatello's David by Frequency-Modulated Laser Radar. In: Studies in Conservation. Band 1, Jahrgang 54. 2009, S. 3–11

Gutzmer, Alexander; Kowalski, Christine; Rukavina, Flaminia (Hrsg.):
Restauratoren Fachwörterbuch: A Conservation Dictionary. München, 2013

Hackney, Stephen; Green, Timothy:
Packing Case Designs. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 69–77

Hedley, Gerry:
Relative Humidity and the Stress/Strain Response of Canvas Paintings: Uniaxial Measurements of Naturally Aged Samples. In: Bomford, D.; Moncrieff, A.; Scott, D. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band. 3, Jahrgang 33. 1988, S. 133–148

Heilig, Matthias:
Verwölbungsmessungen an Gemäldetafeln von Jan Baegert. In: Brozio, P. (Hrsg.): Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik. Band 1. 2010, S. 20–21

Hein, Niclas:
3D-Weißlicht-Streifenprojektionsscanner zur Untersuchung von Transportschäden an Skulpturen. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (unv. Diplomarbeit). Stuttgart, 2007

Hein, Niclas; Krekel, Christoph:
3D-Weißlicht-Streifenprojektionsscanner zur Untersuchung von Transportschäden an Skulpturen. In: Gabler, W.; Reichwald, H.; Schaible, V.; Schießl, U. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 1, Jahrgang 24. 2010, S. 146–159

Heinemann, Carolin:
Digitale Shearografie zur Zustandsanalyse von Gemälden: Evaluierung des Verfahrens und Vorstellung einer Auswertungsstrategie zur Interpretation der Phasenbilder. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (unv. Diplomarbeit). Stuttgart, 2013

Heinemann, Carolin; Hein, Niclas; Krekel, Christoph; Morawitz, Michael; Pedrini, Giancarlo; Osten, Wolfgang:
Digitale Shearografie zur Zustandsanalyse von Gemälden. In: Gabler, W.; Schaible, V.; Krekel, C. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 1, Jahrgang 28. 2014, S. 51–64

Herdin, Marcus:
Von Vermutungen, Wissen, Nachlässigkeit und Verantwortung: Gedanken zu Klimavorgaben und Energieeinsparungen in Museen. In: Heilig, M. (Hrsg.): Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik. Band 7. 2012, S. 61–69

Hermida, Alfred:
Digital Cameras Save Artworks. URL http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/1862234.stm [abgerufen 2015-05-01]

Hilbert, Günter S. (Hrsg.):
Sammlungsgut in Sicherheit: Beleuchtung und Lichtschutz, Klimatisierung, Sicherungstechnik, Brandschutz. Berliner Schriftenreihe zur Museumskunde. Band 1. 2 Auflage. Berlin, 1996

Hiscox, Robert:
Insuring Works of Art in Transit. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 79–83

Hopfner, Ingrid:
Measuring of Movements of Medieval Panel Paintings for Handling and Transport. In: Krüger, M. (Hrsg.): Cultural Heritage Preservation: EWCHP 2011: Proceedings of the European Workshop on Cultural Heritage Preservation: Berlin, Germany, September 26 to 28, 2011. Stuttgart, 2011, S. 205–209

Hopfner, Ingrid:
Measuring of Movements of Medieval Panel Paintings for Handling and Transport. In: Žarnić, R.; Rajčić, V.; Vodopivec B. (Hrsg.): Heritage Protection: From Dokumentation to Interventions: International Conference on Cultural Heritage Preservation: 29 May - 1 June, 2012: Split, Croatia. Ljubjana, 2012, S. 169-170

Hopfner, Ingrid; Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH): Messungen von Bewegungen, Vibrationen und Erschütterungen an Holztafelbildern:
Kunsthistorisches Museum Wien. URL http://www.msr.ch/media/pdf/stories/Bewegungsmessungen_Holztafelbilder_Hopfner_KHM_Wien.pdf [abgerufen 2014-12-09]

Hornemann Institut (Glossar Wandmalerei):
Europäisches illustriertes Glossar für Fachbegriffe der Wandmalerei und Architekturoberfläche. URL http://193.175.110.9/hornemann/german/EU_Projekt_EwaGlos.php [abgerufen 2013-10-01]

Huber, Joachim; Lerber, Karin:
Handhabung und Lagerung von mobilem Kulturgut: Ein Handbuch für Museen, kirchliche Institutionen, Sammler und Archive: Publikationen der Abteilung Museumsberatung. Bielefeld, 2003

Hughes, Henry:
The Role of the British Council in the Transport of Paintings. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 85–88

ICOMOS Deutschland, ICOMOS Luxemburg, ICOMOS Österreich, ICOMOS Schweiz; Langini, Alex; Lipp, Wilfried; Müller, Eduard; Petzet, Michael. (Hrsg.):
Internationale Grundsätze und Richtlinien der Denkmalpflege: Monumenta I: Deutsche Übersetzung. Stuttgart, 2012

ICCOMOS (NARA Document on Authenticity):
The NARA Document on Authenticity (1994). URL http://www.international.icomos.org/fr/component/content/article/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/386-the-nara-document-on-authenticity-1994 [abgerufen 2013-03-18]

ICOM - Internationaler Museumsrat (Hrsg.):
ICOM - Ethische Richtlinien für Museen (Code of Ethics for Museums). Deutsche Übersetzung der Fassung von 2001. Berlin, 2003. URL http://www.icom-oesterreich.at/shop/data/container/Code_of_ethics/code2003_dt.pdf [2014-01-14]

ICOM - Internationaler Museumsrat (Hrsg.):
Ethische Richtlinien für Museen von ICOM. 2. Auflage der deutschen Version. Berlin, 2010

Institut für Technische Optik (Projektwebsite):
ITO-Projektwebsite - Optical Methods for Damage Assessment of Artworks. URL http://www.uni-stuttgart.de/ito/forschung/forschung_km/Artworks/ [abgerufen 2013-04-18]

Jahn, Johannes (Hrsg.):
Wörterbuch der Kunst. 8 Auflage. Stuttgart, 1975

Janis, Katrin:
Restaurierungsethik im Kontext von Wissenschaft und Praxis. München, 2005

Jeberien, Alexandra:
Braucht es eine weitere Richtlinie zur Klimatisierung von Museen und Sammlungen? In: Kowalski, C. (Hrsg.): Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik. Band 8. 2014, S. 45–45

Jokiletho, Jukka:
In Relation to the World Heritage Convention. In: Larsen, K. E. (Hrsg.): Nara Conference on Authenticity: Proceedings: Nara, Japan, 1-6 November 1994: UNESCO World Heritage Centre. Trondheim. 1995, S. 18–33

Jung, Steffen:
Oberflächenbeurteilung: Rauheitsmessung. Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente. 2011 (unv. Dokument). URL http://www.ima.uni-stuttgart.de/pdf/studium/bachelor/dt/spezialisierungsfachversuche/HFV_Oberflaechenbeurteilung_2012.pdf [abgerufen 2013-10-08]

Kalms, Michael; Osten, Wolfgang; Jüptner, Werner:
Scherografie – die Umsetzung des Prinzips in ein mobiles Prüfsystem. In: Wagner, E. (Hrsg.): Technisches Messen: tm. Band 69, Heft 5. 2002, S. 217–226

Keck, Lukasz:
Mechanical Alteration of the Paint Film. In: Van Asperen De Boer, J. (Hrsg.): Studies in Conservation. Bamd 1, Jahrgang 14. 1969, S. 9–30

Koller, Manfred:
Das Staffeleibild der Neuzeit. In: Kühn, H. (Hrsg.): Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken. Band 1, 2 Auflage. Stuttgart, 1997

Kotterer, Michael:
Standardklimawerte für Museen? Ergebnisse eines Projekts. In: Besch, U. (Hrsg.): Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik. Band 1. 2004(a), S. 106–116

Kotterer, Michael:
Standardklimawerte und Haustechnik für Museen und historische Gebäude in der Diskussion. In: Kotterer, M.; Großeschmidt, H.; Boody, F.; Kippes, W. (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung: Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn. Wien und Regensburg, 2004(b), S. 86–97

Kotterer, Michael; Großeschmidt, Henning.; Boody, Frederick P.; Kippes, Wolfgang (Hrsg.):
Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung: Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn. Wien und Regensburg, 2004

Kracht, Kerstin; Wagner, Utz von:
Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Ölgemälden. In: Wieners, C. (Hrsg.) Gamm Proceedings: Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics. Band. 1, Jahrgang 10. 2010, S. 251–252

Krekel, Christoph; Hein, Niclas:
Kunsttransport: Gibt es eine Grenze zwischen Schaden und beschleunigter Alterung? In: ICOM Deutschland (Hrsg.): Zur Ethik des Bewahrens: Konzepte, Praxis, Perspektiven - Jahrestagung 2013 von ICCOM Deutschland: Köln, 17. bis 19. Oktober 2013: ICOM Deutschland - Beiträge zur Museologie. Band 4. Berlin, 2014, S. 127–140

Krekel, Christoph; Hein, Niclas; Skowranek, Heide:
Preservation of Cultural Heritage: The Bridge Between Inspection and Conservation. In: Osten, W. (Hrsg.): Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging on Metrology. Berlin, Heidelberg, 2013, S. 721–728

Kühn, Hermann:
Farbmaterialien: Pigmente und Bindemittel. In: Kühn, H. (Hrsg.): Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken. Band 1, 2 Auflage. Stuttgart, 1997

Kühn, Hermann:
Erhaltung und Pflege von Kunstwerken: Material und Technik: Konservierung und Restaurierung. 3 Auflage. München, 2001

Lasyk, Lukasz; Bratasz, Lukas; Kozlowski, Roman:
Vibration as a Hazard During the Transportation of Canvas Paintings. In: Scott, D. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band 1, Jahrgang 53. 2008, S. 64–68

Läuchli, Matthias; Bäschlin, Nathalie; Hoess, Anita; Fankhauser, Thomas; Palmbach, Cornelius; Ryser, Marcel:
Packing Systems for Paintings: Damping Capacity in Relation to Transport-Induced Shock and Vibration. In: Bridgland, J. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 17th Triennial Conference, Melbourne: 15–19 September, 2014: Preprints. Band. 2. Los Angeles, 2014, S. 1–9

Ledwoch, Klaus-Dietrich (Hrsg.):
Kittel: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen: Band 1, Geschichte, Grundlagen, Naturstoffe, anorganische Bindemittel. Band 1. 2 Auflage. Stuttgart, Leipzig, 2001

Lehle, Peter:
Dynamische und strukturierte Beleuchtung für die optische Meßtechnik. Berichte aus dem Institut für Technische Optik Stuttgart. Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität Stuttgart. Band 35 (Dissertation). Stuttgart, 1998

Leisher, William:
The Borower-Risk Assessment and Responsibilities. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 89–91

Leissner, Johanna; Fuhrmann, Constanze:
Climate for Culture. URL http://www.climateforculture.eu/index.php?inhalt=home [abgerufen 2014-11-28]

Linden, Jeremy; Reilly, James; Herzog, Peter:
Field-Tested Methodology for Optimizing Climate Management. In: Ashley-Smith; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S. 93–103

Lipinski, Wolf-Hartwig:
Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gemälden auf textilem Bildträger unter biaxialer Dehnung. Weiße Reihe des Institutes für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart. Band 26. München, 2010

Lorenz, Klaus:
Erstellung bibliographischer Belege nach DIN 1505 Teil 2. 2 Auflage. 1997. URL http://www.bui.haw-hamburg.de/fileadmin/redaktion/diplom/Lorenzen__litverz.pdf [abgerufen 2013-03-16]

Lüthy, Hans (Hrsg.):
Schweizerisches Institut für Kunstwissenschaft: Ausstellung zum 20 jährigen Bestehen: Helmhaus Zürich, 6. Juni bis 4. Juli 1971: Schweizerisches Institut für Kunstwissenschaft. Zürich, 1971

Maas, Hans-Gerd:
Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. (Habilitation). Zürich, 1997

Mairinger, Franz:
Strahlenuntersuchung an Kunstwerken. Leipzig, 2003

Marcon, Paul:
Shock, Vibration, and the Shipping Environment. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 121–132

Marcon, Paul:
Shock, Vibration, and Protective Package Design. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 107–132

Marcon, Paul:
A Circular Slide Rule for Protective Packing Desing. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 93–106

Martens, Marco; Schellen, Henk:
Climate Risk Assessment in Museums. In: Ashley-Smith A.; Burmester, A.; Eibl, M. (Hrsg.): Climate for Collections: Standards and Uncertainties. München, 2013, S. 363–374

Mazzoni, Ira:
Bedeutet VASARI das Ende der Ausstellungen? In: Hecht, A. (Hrsg.): art - Das Kunstmagazin. Band 7. Hamburg, 1994, S. 114–115

Mecklenburg, Marion (Hrsg.):
Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles:
Mechanical Behavior of Paintigs Subjected to Changes in Temperature and Relative Humidity. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991(a), S. 173–216

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles:
An Introduction Into the Mechanical Behavior of Paintings under Rapid Loading Condition. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991(b), S. 137–171

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles; Erhardt, David:
Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In: Dorge, V.; Howlett, C. (Hrsg.): Painted Wood: History and Conservation: The Getty Conservation Institute. Los Angeles, 1994, S. 464–483

Merrill, Ross:
The Problem of Packing and Shipping: The Rationale for Scientific Studies. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 217–221

Michalski, Stefan:
An Overall Framework for Preventive Conservation and Redmedial Conservation. In: Grimstad, K. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 9th Triennial Meeting, Dresden, German Democratic Republic: 26-31 August 1990: Preprints. Band 2. Los Angeles, 1990(a), S.589–591

Michalski, Stefan:
Paintings-Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock, and Vibration. In: Grimstad, K. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 9th Triennial Meeting, Dresden, German Democratic Republic: 26-31 August 1990: Preprints. Band 2. Los Angeles, 1990(b), S.223–248

Michalski, Stefan:
Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values. In: Bridgland, J. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 10th Triennial Meeting, Washington, DC, USA: 22-27 August 1993: Preprints. Band 2. Los Angeles, 1993, S. 624–629

Michalski, Stefan:
The Ideal Climate: Risk Management: the ASHRAE Chapter: Proofed Fluctuations and Toward a Full Risk Analysis Model. In: The Getty Conservation Institute (Hrsg.): Contribution to the Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies: Held in April 2007: In Tenerife, Spain. Los Angeles, 2009, S. 1–19

Morawitz, Michael; Hein, Niclas; Alexeenko, Igor; Wilke, Marc; Pedrini, Giancarlo; Krekel, Christoph; Osten, Wolfgang:
Optical Methods for the Assessment of Transport and Age Induced Defects of Artwork. In: Osten, W. (Hrsg.): Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging on Metrology. Berlin, Heidelberg, 2013(a), S. 951–955

Morawitz, Michael; Hein, Niclas; Alexeenko, Igor; Wilke, Marc; Pedrini, Giancarlo; Krekel, Christoph; Osten, Wolfgang:
Detection of Transport and Age Induced Damages on Artwork: an Advanced Concept. In: Pezzati, L.; Targowski, P. (Hrsg.): SPIE Procedings: Optics for Arts, Architecture, and Archaeology. Band IV, Nummer 8790. 2013(b), S. 721–728

Nicolaus, Knut:
Handbuch der Gemälderestaurierung. Köln, 1998

Noll-Minor, Mechthild:
Die E.C.C.O.-Publikation: Kompetenzen und Zugang zum Beruf des Konservator-Restaurators: Ein Beitrag zur Profilierung des Berufes. In: Verband der Restauratoren e.V. (VDR) (Hrsg.): Quo vadis, Restaurierung? Vorträge der Jubiläumsveranstaltung zum 10-jährigen Bestehen des Verbandes der Restauratoren e.V. (VDR): 21.–23. Oktober 2011 in Dresden. Bonn, 2011, S. 14–32

Nortmann, Ulrich:
Determinismus. In: Jordan, S.; Nimtz, C. (Hrsg.): Lexikon der Philosophie: 100 Grundbegriffe. Stuttgart, 2011, S. 63–65

Nutsch, Wolfgang:
Holztechnik Fachkunde. In: Nutsch W. [Hrsg.]: Bearbeitet von Lehrern an beruflichen Schulen und Ingenieuren. 15. völl. neubearb. Auflage. Haan-Gruiten, 1995

Olbrich, Harald; Strauss, Gerhard; Olbrich, H. (Hrsg.):
Lexikon der Kunst: Architektur, Bildende Kunst, Angewandte Kunst, Industriegestaltung, Kunsttheorie. Band. 7, Stae - Z. Leipzig, 1994

Onset Computer Corporation: Unternehmenswebsite:
Onset Datenlogger (HOBO UX100-011). URL http://www.onsetcomp.com/products/hobo-data-loggers/indoor-use [abgerufen 2012-05-31]

Padfield, Joseph; Saunders, David; Malzbender, Tom:
Polynomial Texture Mapping: A New Tool for Examining the Surface of Paintings. In: Verger, I. (Hrsg.): ICOM Committee for Conservation: 14th Triennial Meeting, The Hague: 12–16 September, 2005: Preprints. Band 1. London, 2005, S. 504–510

Palmbach, Cornelius; Bäschlin, Nathalie; Läuchli, Thomas; Hoess, Anita:
Transportmonitoring bei Gemäldetransporten - neue Datensammlung zur Charakterisierung der Schock- und Vibrationsimmissionen. In: ÖRV - Österreichischer Restauratorenverband (Hrsg.): Kunst unterwegs: Beiträge zur 23. Tagung des Österreichischen Restauratorenverbandes 2012. Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes. Band 14. Wien, 2013, S. 30–41

Pataki, Andrea:
Einflussgrößen auf den Farbeindruck von pudernden Malschichten bei der Konsolidierung mit Aerosolen. Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (unv. Dissertation). Stuttgart, 2006

Plenderleith, Harold; Philippot, Paul:
Climatology and Conservation in Museums. In: Unesco (Hrsg.): Museum Vol. XIII, Nr. 4, 1960. Band 13. Lausanne, 1960, S. 241–289 URL http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001274/127409eo.pdf [2014.11.27]

Prast, Georg:
Untersuchungen über das Bewegungsverhalten der Grazer Domtafel von Conrad Laib: Messungen der Oberflächentopographie des Tafelbildes sowie der Entwicklung von Wölbungskräften. In: Saliger, A. (Hrsg.): Conrad Laib: 19. September bis 26. Oktober 1997: Museum Mittelalterlicher Kunst - Unteres Belvedere, Orangerie: Bedeutende Kunstwerke. Band 9. Wien, 1997, S. 160–169

Rachwal, Bartosz; Bratasz, Lukasz; Krezemien, Leszek; Lukomski, Michal; Kozlowski, Roman:
Fatigue Damage of the Gesso Layer in Panel Paintings Subjected to Changing Climate Conditions. In: Pierron, F. (Hrsg.): Strain: An International Journal for Experimental Mechanics. Band 6, Jahrgang 48. 2012, S. 474–481

Richard, Mervin:
Control of Temperature and Relative Humidity in Packing Cases. In: Grimstad, K. (Hrsg.): ICOM Commitee for Conservation: 9th Triennial Meeting, Dresden, German Democratic Republic: 26-31 August 1990: Preprints. Band 2. Los Angeles, 1990, S. 279–297

Riding, Alan:
The Louvre's Art: Priceless. The Louvre's Name: Expensive. In: The New York Times. New York, 2007 URL http://www.nytimes.com/2007/03/07/arts/design/07louv.html?_r=2&oref=slogin& [2013.01.20]

Rodenstock (Objektivspezifikation):
Datenblatt Objektiv. URL http://www.rodenstock-photo.com/de/main/products/lenses-for-enlarging-and-ccd/rodagon/ [abgerufen 2012-08-14]

Sandner, Ingo:
Konservierung von Gemälden und Holzskulpturen: mit 24 Tabellen. Berlin, 1990

Santos, Pedro:
Projektwebsite: Cultlab3D (Fraunhofer Institute for Computer Graphics Research IGD). URL http://www.cultlab3d.de/ [abgerufen 2015-01-19]

Saunders, David:
Temperature and Relative Humidity Conditions Encountered in Transportation. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 299–309

Saunders, David ; Cupitt, John:
Image Processing at the National Gallery: The VASARI Project. In: Ashok, R. (Hrsg.): National Gallery Technical Bulletin. Band 14. London, 1993, S. 72–85

Schaible, Volker:
Vom Atmen der Bilder (im Original 16 mm Film, Laufzeit 6:11, Digitalisiert zum MPEG-4). URL http://restauratoren.de/ausbildung/studiumforschung/aktuelles.html [abgerufen 2015-01-13]

Schaible, Volker:
Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden. In: Bachmann, W.; Reichwald, H.; Schießl, U.; Wolters, W. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 2, Jahrgang 4. 1990(a), S. 235–250

Schaible, Volker:
Ursache und Wirkung: Gedanken zum derzeitigen Stand der Konservierungstechnik. In: Straub, R. (Hrsg.): Die Kunst und ihre Erhaltung: Rolf E. Straub zum 70. Geburtstag gewidmet. Worms, 1990(b), S. 118–129

Schaible, Volker:
Die Bedeutung vom Bewahrungsauftrag und Inszenierungswunsch für die Arbeit des Restaurators. In: Bachmann, W; Dasser, K.; Reichwald, H.; Schießl, U. (Hrsg.) Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 2, Jahrgang 11. 1997, S. 186–191

Schauerte, Günther; Graf, Bernhard (Hrsg.):
Empfehlungen für die Organisation großer Ausstellungen. Mitteilungen und Berichte aus dem Institut für Museumskunde. Band 9. Überarb. Auflage. Berlin, 2003

Schießl, Ulrich:
Konservierungstechnische Beobachtungen zur Festigung wäßrig gebundener, kreidender Malschichten auf Holz. In: Bachmann, W.; Reichwald, H.; Schießl, U.; Wolfgang Wolters (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 2, Jahrgang 3. 1989, S. 293–320

Schießl, Ulrich:
Untersuchen und Dokumentieren von bemalten Holzdecken und Täfelungen: Mit einer allgemeinen Einführung in die Grundlagen der Dokumentationsarbeit des Restaurators. Bern, Stuttgart, 1991

Schinzel, Hiltrud (Hrsg.):
Touching Vision: Essays on Restoration Theory and the Perception of Art. München, 2004

Schmelzpfenning, Georg:
Dynamisch-optische Oberflächenvermessung des plantaren Fußes. Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität Tübingen (Dissertation). Tübingen, 2011

Schürer, Ralf:
Reisen oder Nicht-Reisen: Eine Entscheidung, die (noch) nicht gefällt werden musste. In: Ulmann, A. v. (Hrsg.): Anti-Aging für die Kunst: Restaurieren - Umgang mit den Spuren der Zeit: Kulturgeschichtliche Spaziergänge im Germanischen Nationalmuseum. Band 6. Berlin, 2004, S. 92–94

Sentker, Andreas:
Roboter im Museum: Bleibt uns erhalten! Die wertvollen Sammlungen der Naturkundemuseen sollen mithilfe von Scan-Robotern akribisch erfasst und ins Internet gestellt werden. URL http://www.zeit.de/2014/47/roboter-museum-digitalisierung-kulturerbe [abgerufen 2015-01-19]

Soppa, Karolina:
Untersuchung zum Eindringverhalten von Polyacrylsäureestern bei der Konsolidierung von Leinwandgemälden: Die Markierung von Dagelan p 550/PQ 611 (früher Plexisol p 550 und Plexigum PQ 611) mit dem Fluorochrom Fluorescein-Isothiocynat (FITC). Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (unv. Diplomarbeit). Stuttgart, 2007

Spohn, Wolfgang:
Kausalität. In: Jordan, S. ; Nimtz, C. (Hrsg.): Lexikon der Philosophie, 100 Grundbegriffe. Stuttgart, 2011, S. 151–153

Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (Projektwebsite):
ABK-Projektwebsite - 3D_artscan. URL http://artscan.abk-stuttgart.de/ [abgerufen 2013-04-18]

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 34: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1990. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 34. Berlin, 1991

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 36: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1991. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 36. Berlin, 1992

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 38: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1992. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 38. Berlin, 1993

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 40: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1993. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 40. Berlin, 1994

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 43: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1994. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 43. Berlin, 1995

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 45: Erhebung der Besucherzahlen an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1995. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 45. Berlin, 1996

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 48: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1996. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 48. Berlin, 1997

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 50: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1997. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 48. Berlin, 1998

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 52: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1998. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 52. Berlin, 1999

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 53: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1999. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 53. Berlin, 2000

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 54: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2000. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 54. Berlin, 2001

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 55: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2001. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 55. Berlin, 2002

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 57: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2002. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 57. Berlin, 2003

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 58: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2003. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 58. Berlin, 2004

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 59: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2004. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 59. Berlin, 2005

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):

Heft 60: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2005: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 60. Berlin, 2006

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 61: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2006: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 61. Berlin, 2007

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 62: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2007: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 62. Berlin, 2008

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 63: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2008: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 63. Berlin, 2009

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 64: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2009: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 64. Berlin, 2010

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 65: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2010: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 65. Berlin, 2011

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 66: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2011: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 66. Berlin, 2012

Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz Institut für Museumsforschung (Hrsg.):
Heft 67: Statistische Gesamterhebung an den Museen der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2012: Including an English Summary. Materialien aus dem Institut für Museumsforschung. Heft 67. Berlin, 2013

Stadler, Wolf (Hrsg.):
Lexikon der Kunst: Malerei, Architektur, Bildhauerkunst: In 12 Bden. Bd. 11 Sem - Tot. Freiburg, 1990

Staniforth, Sarah:
Lending Paintings - The Conservator´s View. In: Mecklenburg, M. (Hrsg.): Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings: International Conference on the Packing and Transportation of Paintings: September 9, 10 and 11, 1991, London. Washington, 1991, S. 335–343

Steinbichler OptotechnikGmbH (Unternehmenswebsite):
Unternehmenswebsite: Steinbichler Optotechnik GmbH. URL http//www.steinbichler.de [abgerufen 2012-03-03]

Stolow, Nathan:
Standards for the Care of Works of Art in Transid. In: Thomson, G. (Hrsg.): IIC Preprints of the Contributions to the London Conference on Museum Climatology, 18-23 September, 1967: Preprints: The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. London, 1968, S. 271–284

Stolow, Nathan:
Conservation and Exhibitions: Packing, Transport, Storage and Environmental Considerations. Belfast, 1987

Straub, Rolf:
Über die Erhaltung von Holztafelbildern. In: Straub, R. (Hrsg.): Über die Erhaltung von Gemälden und Skulpturen. Zürich, Stuttgart, 1963

Straub, Rolf:
Tafel- und Tüchleinmalerei des Mittelalters. In: Kühn, H. (Hrsg.): Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken. Band 1, 2 Auflage. Stuttgart, 1997

Strojecki, Marcin; Lukomski, Michal; Krzemien, Leszek; Sobczyk, Joanna; Bratasz, Lukasz:
Acoustic Emission Monitoring of an Eighteenth-Century Wardrobe to Support a Strategy for Indoor Climate Management. In: Reedy, C. (Hrsg.): Studies in Conservation. Band 4, Jahrgang 59. 2014, S.225–232

Thamer, Hans-Ulrich:
Das »Zweite Museumszeitalter«: Zur Geschichte der Museen seit den 1970er Jahren. In: Graf, B. ; Rodekamp, V. (Hrsg.): Museen zwischen Qualität und Relevanz: Denkschrift zur Lage der Museen. Berliner Schriftenreihe zur Museumsforschung. Institut für Museumsforschung – Staatliche Museen zu Berlin: Band 30. Berlin, 2012, S. 33-42

Theobis, Elisabeht:
Katalog der Schadensbilder: Spuren und Phänomene an Kunst und Kulturgut auf Papier. In: Besch, U. (Hrsg.): Restauro: Zeitschrift für Restaurierung, Denkmalpflege und Museumstechnik. Band 6. 2013, S. 11

Thomson, Garry:
The Museum Environment: Second Edition. Belfast, 1986

Ulmann, Arnulf:
Vom Umgang mit der Kunst: Die Arbeitsweise des Restaurators. In: Ulmann, A. (Hrsg.): Anti-Aging für die Kunst: Restaurieren - Umgang mit den Spuren der Zeit: Kulturgeschichtliche Spaziergänge im Germanischen Nationalmuseum. Band 6. Berlin, 2004, S. 27–35

Umney, Nick; Ford, David:
WARP (wooden artefact rheology project). Conservation Journal: October 1993 Issue 09. URL http://www.vam.ac.uk/content/journals/conservation-journal/issue-09/warp-wooden-artefact-rheology-project/ [abgerufen 2014-12-09]

Wagner, Ekkehard (Hrsg.):
Glasschäden: Oberflächenbeschädigungen: Glasbrüche in Theorie und Praxis. 3. Auflage. Schorndorf, 2008

Ohne Verf. (Arbeitsgemeinschaft der Kunst und Museumsbibliotheken (Objektabmessungen)):
Angaben zur Objektbemessung. URL http://www.akmb.de/web/html/fachgruppen/katapaper.html [abgerufen 2012-09-28]

Ohne Verf. (AXA ART Versicherung AG):
Angaben zur Objektbemessung. URL http://www.axa-art.de/artprotect/ratgeber/object-id.html [abgerufen 2013-08-21]

Ohne Verf. (Bizot-Statement-Restauratoren):
Stellungnahme VDR: Neue Klimagrenzwerte für Kunstwerke in Museen?. 2012. URL http://restauratoren.de/termine-details/930-klimawandel-in-museen.html [2014.05.01]

Ohne Verf. (COMET 5 Bedienerhandbuch (SOB)):
COMET 5: Bedienerhandbuch. Steinbichler Optotechnik GmbH (selbstv. Dokument). 2011

Ohne Verf. (COMET 5 Sensorspezifikation):
COMET 5: 3D-Digitalisierung, high-end Sensor. Steinbichler Optotechnik GmbH (selbstv . Dokument). 2012

Ohne Verf. (COMETplus Bedienerhandbuch):
COMETplus: Bedienerhandbuch, Version 9.51 (x64). Steinbichler Optotechnik GmbH (selbstv . Dokument). 2011

Ohne Verf. (COMETplus Kalibrierung):
COMETplus: Kurzanleitung Photogrametrische Kalibrierung. Steinbichler Optotechnik GmbH (selbstv . Dokument). 2019

Ohne Verf. (Cultural Heritage Imaging):
Reflectanve Transformation Imaging (RTI). URL http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/ [abgerufen 2015-01-06]

Ohne Verf. (DIN 1304-1):
DIN 1304-1: Formelzeichen, allgemeine Formelzeichen. URL http://www.nabd.din.de/cmd?artid=2653092&bcrumblevel=1&contextid=nabd&subcommitteeid=54776667&level=tpl-art-detailansicht&committeeid=54738855&languageid=de [abgerufen 2013-07-11]

Ohne Verf. (DIN 1319-1):
DIN 1319-1, 1995-01: Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-1319-1/2440447 [abgerufen 2014-10-16]

Ohne Verf. (DIN 1505-2):
DIN 1505-2: Zitierregeln, Titelangaben von Dokumenten. URL http://www.nabd.din.de/cmd?artid=2653092&bcrumblevel=1&contextid=nabd&subcommitteeid=54776667&level=tpl-art-detailansicht&committeeid=54738855&languageid=de [abgerufen 2013-03-18]

Ohne Verf. (DIN 476):
DIN 476: Papierformate der A-,B- und C-Reihe. URL http://www.din.de/cmd;jsessionid=A478B3F85A612D423AD97F41FD275DAC.1?languageid=de&workflowname=dinSearch [abgerufen 2013-04-18]

Ohne Verf. (DIN EN ISO 483):
DIN EN ISO 483, 1999-09: Kunststoffe - Kleine Kammern für die Konditionierung und Prüfung bei konstanter relativer Luftfeuchte über wässrigen Lösungen (ISO 483:1988); Deutsche Fassung EN ISO 483:1999 (Dokument zurückgezogen). URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-483/18352692 [abgerufen 2014-11-10]

Ohne Verf. (DIN EN ISO 483):
DIN EN ISO 483, 2006-02: Kunststoffe - Kleine Kammern für die Konditionierung und Prüfung bei konstanter relativer Luftfeuchte über wässrigen Lösungen (ISO 483:2005): Deutsche Fassung EN ISO 483:2005. URL http://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-483/83309237 [abgerufen 2014-06-01]

Ohne Verf. (DIN-Norm Farbmittel 1):
Farbmittel 1. Pigmente, Füllstoffe, Farbstoffe, DIN 5033-1 und DIN 55929: Normen. 5 Auflage. Berlin, Wien, Zürich, 2000

Ohne Verf. (GFMesstechnik GmbH):
Unternehmenswebsite. GFMesstechnik GmbH, MikroCAD. URL http://www.gfm3d.com/index.php?option=com_content&id=65:mikrocad&lang=de&Itemid= [abgerufen 2013-11-18]

Ohne Verf. (Innovmetric: PolyWorks):
Unternehmenswebseite. InnovMetric Software Inc.. URL http://www.innovmetric.com/ [abgerufen 2013-08-21]

Ohne Verf. (INSPECTplus Handbuch):
INSPECTplus: Handbuch, Version 5. Steinbichler Optotechnik GmbH (unv. Dokument). 2011

Ohne Verf. (Keyence GmbH):
Unternehmenswebsite: VH-Z100UR. Keyence GmbH. URL http://www.digitalmicroscope.com/solutions/vhx_lens/rzlens_z100_ur.php [abgerufen 2013-11-18]

Ohne Verf. (KTI-Projekt Hochschule der Künste Bern):
Transportkunst - Fragile Gemälde auf Reisen. URL http://www.gemaeldetransport.ch/ [abgerufen 2014-01-25]

Ohne Verf. (Leuchtmittel OSRAM):
Spektrum Leuchtmittel: OSRAM P-VIP_200E206. OSRAM GmbH (unv. Dokument). 2012. Email, abgedruckt im Anhang dieser Schrift

Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH):
Gemäldetransport. URL http://www.msr.ch/de/anwendungsgebiete/datenlogger-MSR165-kunsttransport.html [abgerufen 2014-01-25(a)]

Ohne Verf. (MSR Electronics GmbH):
Unternehmenswebsite: MSR Electronics GmbH: Messen von Bewegungen, Vibrationen und Erschütterungen an Holztafelbildern. URL http://www.msr.ch/de/anwendungsgebiete/Messen-von-Bewegungen-und-Erschuetterungen-bei-Transport-von-Bildern-mit-Datenlogger-MSR255.html [abgerufen 2014-12-09(b)]

Ohne Verf. (OPTONET S.R.L.):
Unternehmenswebseite. Optonet S.R.L.. URL http://www.optonet.it/ [abgerufen 2013-08-21]

Ohne Verf. (The MathWorks GmbH: Matlab):
Unternehmenswebseite. MathWorks GmbH. URL http://de.mathworks.com/ [abgerufen 2013-08-21]

Ohne Verf. (University of Southampton):
VASARI: Visual Arts System for Archiving and Retrieval of Images. URL http://users.ecs.soton.ac.uk/km/projs/vasari/ [abgerufen 2015-01-05]

Ohne Verf. (Verband der Restauratoren):
Klimawandel in Museen? URL http://restauratoren.de/termine-details/930-klimawandel-in-museen.html [abgerufen 2014-12-08]

Ohne Verf. (Walter Knoll AG & Co. KG):
Vostra - Einzelsessel für Walter Knoll. Walter Knoll AG & Co. KG. URL http://www.walterknoll.de/de/produkte/vostra-einzelsessel [abgerufen 2014-12-08]

Wagner, Monika; Rübel, Dietmar; Hackenschmidt, Sebastian:
Lexikon des künstlerischen Materials: Werkstoffe der modernen Kunst von Abfall bis Zinn. München, 2002

Wangermann, Gert:
Der Problemlösungsprozess in der naturwissenschaftlich-experimentellen Forschung: Ein Beitrag zur Analyse. In: Stiller, H. (Hrsg.): Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften der DDR: Abteilung Gesellschaftswissenschaften. Band 1, Jahrgang 1984. Berlin, 1984

Wehlte, Kurt; Wehlte, Germar:
Werkstoffe und Techniken der Malerei. 6. Auflage. Ravensburg, 1992

Weickmann, Johannes; Weckenmann, A. (Hrsg.):
Assistenzsystem für die Prüfung von Blechbauteilen mit Mehrkomponenten-Streifenprojektionssystemen unter Anwendung der „virtuellen Rückdeformation". Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Band. 20. Erlangen-Nürnberg, 2011

Wiese, Steffen:
Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik: Das Verhalten im Mikrobereich. Berlin, Heidelberg, 2010

Wiora, Georg:
Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät der Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg (Dissertation). Heidelberg, 2001

Wollny, Barbara:
3-D-Druck von alten Meistern. URL http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/3-D-Druck-alten-Meistern [abgerufen 2015-01-19]

Zehnder, Konrad:
Schadenvorgänge am bemalten und mit Weizenstärke fixierten Fichtenholztafeln durch Luftfeuchteschwankungen: (Laborversuche zu Zillis, Kirche St. Martin). In: Bachmann, W.; Dasser, K.; Reichwald, H.; Schießl, U. (Hrsg.): Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK. Band 2, Jahrgang 11. 1997, S. 301–316

Zeiss AG (Objektivspezifikation):
Download-Center: Datenblatt Objektiv. URL http://lenses.zeiss.com/photo/de_DE/service/download_center.html [abgerufen 2012-08-14]

31. Eidesstattliche Erklärung

Ich, Niclas Hein, erkläre hiermit, dass die vorgelegte Dissertation von mir selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Alle von mir benutzten Veröffentlichungen, ungedruckten Materialien, sonstige Hilfsmittel sowie Textstellen, die ich wörtlich oder inhaltlich aus gedruckten oder ungedruckten Arbeiten übernommen habe, habe ich als solche gekennzeichnet und mit den erforderlichen bibliographischen Angaben nachgewiesen. Unterstützungsleistungen, die ich von anderen Personen erhalten habe, wurden in der Dissertationsschrift als solche benannt.

Ort, Datum, Unterschrift

32. Danksagung

Zuallererst gilt mein ausgesprochen herzlicher Dank Prof. Dr. Christoph Krekel – meinem ersten Gutachter, der diese Arbeit und das zugrundeliegende Forschungsprojekt ins Leben gerufen hat. Im Glauben an mich, hat er mir die Möglichkeit zur Mitarbeit und Forschung an diesem, für mich extrem spannenden Thema gegeben. Er hat mich mit seinen Anregungen hervorragend unterstützt, nachahmungswürdig inspiriert und intellektuell herausgefordert – was ich in dieser lohnenden Phase meiner akademischen Laufbahn als eine große Bereicherung empfunden habe. Einen besseren Doktorvater hätte ich mir nicht aussuchen können. Danke! In diesen Dank möchte ich ebenso Prof. Volker Schaible mit einbeziehen, meinem zweiten Gutachter. Auch er trug mit bereichernden, schöpferischen Einfällen und praktischen Lösungsvorschlägen maßgeblich zum Gelingen der Forschung und damit auch zu dieser Dissertation bei. Ohne beider wertvollen Rat wäre diese interdisziplinäre Arbeit nicht entstanden.

Darüber hinaus gilt mein Dank der 'Deutsche Forschungsgemeinschaft' für die Projekt-Finanzierung und die Bereitstellung des Streifenprojektionsscanners. Beides stellte gewissermaßen die Basis dar. Überdies geht mein Dank an meinen ehemaligen Forschungskollegen Michael Morawitz, der in der ersten Projekthälfte mit bereichernden Anregungen und Diskussionsbeiträgen meinen Horizont wiederholt erweitert hat. Es war mir eine Herzensfreude mit ihm zusammen zu arbeiten. Im Zuge dessen möchte ich mich auch bei dem Leiter des 'Institut für Technische Optik' ('ITO') Prof. Dr. Wolfgang Osten, und folgenden wissenschaftlichen Institutsmitarbeitern für Rat und Tat bedanken: Dominic Buchta, Dr. Wolfram Lyda, Dr. Giancarlo Pedrini, Daniel Claus. Seitens der 'Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart' schließe ich in meine Danksagung ein: Carolin Heinemann, Elisabeth George, Stella Overmann, Andrea von Hedenström. Ein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern der Firma 'Steinbichler Optotechnik GmbH' Matthias Giesler, Maximilian Franz und Patrick Fasser für ihre außergewöhnliche Freundlichkeit und den hervorragenden Support. Sie haben mir mit großer Hilfsbereitschaft, Geduld und gezeigtem Interesse optoelektronische, technische und gerätespezifische Zusammenhänge erörtert die mir bis dato als Konservierungswissenschaftler verborgen waren.