

Übersicht zur Dissertation  
»Statistische Ereignisdetektion in Bildfolgen«  
Martin Brocke, Universität Heidelberg, November 2002

Abstract (englisch) . . . . .	1
Zusammenfassung (deutsch) . . . . .	1
Ausführliche Zusammenfassung der Dissertation . . . . .	2
Vollständiges Inhaltsverzeichnis der Dissertation . . . . .	3
Einführung in das Thema der Dissertation . . . . .	6
Organisatorischer Rahmen der Dissertation . . . . .	7
Veröffentlichungen und begleitende Arbeiten . . . . .	7
Zielsetzung der Dissertation . . . . .	9
Kapitelübersicht zur Dissertation . . . . .	9
Übersicht zum Kapitel 1: Einführung (Seite 1ff.) . . . . .	10
Übersicht zum Kapitel 2: Bekannte Verfahren (Seite 5ff.) . . . . .	10
Übersicht zum Kapitel 3: Statistischer Ansatz zur Ereignisdetektion (Seite 47ff.) . . . . .	13
Übersicht zum Kapitel 4: erste Anwendung: Ereignisdetektion zur Qualitätssicherung (Seite 91ff.) . . . . .	16
Übersicht zum Kapitel 5: zweite Anwendung: Ausreißerdetektion in Thermographiedaten (Seite 137ff.) . . . . .	18
Übersicht zum Kapitel 6: Resumée (Seite 159ff.) . . . . .	19
Schlußbemerkung aus der Dissertation . . . . .	19
Vollständiges Literaturverzeichnis aus der Dissertation . . . . .	21 bis 36

Dieses Dokument und die zugrunde liegende Dissertation wurden an der Universität Heidelberg über den HeiDok-Katalog (<http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/>) der Universitätsbibliothek Heidelberg und über die Deutsche Bibliothek Frankfurt (<http://www.ddb.de/>) als elektronische Volltexte veröffentlicht und können unter <http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/> kostenlos und ohne Zugangsbeschränkung als PDF-Dokumente abgerufen werden.

## **Abstract (englisch)**

This thesis presents a technique to detect statistically unlikely changes in noisy image sequences. Methods for outlier detection are well known in statistical data analysis. This work applies these techniques to image processing. Appropriate statistical tests are performed to identify the relevant pixels by hypothesis testing. The image sequence is represented as a separate time series for each image pixel with the assumption that at steady state the scene is static. This assumption is commonly made for many applications in surveillance and spatio-temporal measurements. The significance level related to the hypothesis test remains the only free parameter. This allows an even comparison of the algorithm's performance across different data sets. A confidence measure is calculated for each binary decision (inlier vs. outlier). Effects such as occlusion or false positives that occur for multiple outliers are controlled by an iterative extension. The algorithm was put into practice twice 1) A complete computer vision system for an industrial laser welding process control was patented. It replaces human visual inspection for mass production and improves robustness over spatially integrating sensors. 2) The algorithm has been applied to infrared image sequences in order to distinguish events caused by two separate processes. Hence heat flux parameter estimation was improved by an outlier detector module at the beginning of the estimation scheme. The technique presented has proven to be an easy-to-configure, modular, and fast tool for event detection in image sequences.

## **Zusammenfassung (deutsch)**

Diese Arbeit stellt eine Technik zur Detektion plötzlich auftauchender, untypischer Einzelereignisse in verrauschten, unruhigen Bildfolgen vor. Verfahren zur Ausreißerdetektion aus der statistischen Datenanalyse wurden für die Bildverarbeitung angepaßt, geeignete Teststatistiken gefunden und die gesuchten Pixel mit Hypothesentests abgetrennt. Dafür wird die Bildfolge als Zeitreihen-Ensemble einzelner Pixel aufgefaßt, die – stationäre Szenen vorausgesetzt – Stichproben der Teststatistik sind. Zeitliche Stationarität ist typisch für viele Anwendungen (Überwachung und räumlich-zeitlicher Meßdatenaufnahme). Das Verfahren hat als einzigen Parameter das Signifikanzniveau des Hypothesentests, womit über verschiedene Datensätze und Anwendungen hinweg Vergleichbarkeit hergestellt wird. Zur binären Entscheidung über Ausreißerzugehörigkeit wird ein Gütemaß dafür mitgeliefert. Unerwünschte Effekte (Verdeckungen/Fehldetektionen bei multiplen Ausreißern) unterdrückt eine iterative Erweiterung. Der Unterschied zu bisherigen Verfahren ist die Ausnutzung der vollen zeitlichen Information anstelle räumlicher Stichproben, die nur aus zwei aufeinanderfolgenden Einzelbildern entstammen. Zwei praktische Umsetzungen des Verfahrens sind: 1) Bei einer Prozeßkontrolle eines Fügeverfahrens mit stark rauschender Sensorik aus der industriellen Qualitätssicherung konnte die Ereignisdetektion in ein automatisiertes Überwachungssystem bis zur Patentreife weiterentwickelt werden. Es ersetzt in der Massenproduktion eine 100%-Sichtprüfung und überwindet erstmals die Schwierigkeiten herkömmlicher, räumlich integrierender Sensoren. 2) Bei der Analyse von thermographischen Bilddaten konnten Bildintensitäten zweier unterschiedlicher physikalischer Ursachen voneinander getrennt werden und die Parameterschätzung der Wärmeflüsse durch frühzeitige Ausreißerdetektion verbessert werden. Das entwickelte Verfahren gibt dem Anwender ein einfach konfigurierbares, schnelles, modular einsetzbares Werkzeug zur Überwachung von Bildfolgen auf untypische Ereignisse an die Hand.

## **Ausführliche Zusammenfassung der Dissertation**

In der vorliegenden Arbeit wird eine Technik zur Ereignisdetektion in Bildfolgen entwickelt. Gesucht werden dabei in stationären Szenen plötzlich auftauchende, untypische Einzel-Ereignisse wie sie durch Ausfälle der Sensorik, Verdeckungen, durchquerende Objekte, Zustandsänderungen des beobachteten Prozesses, Beleuchtungsausfälle, Erschütterungen und dergleichen mehr entstehen können; diese Szenen können stark verrauscht sein und eine hohe, räumlich inhomogene innere Unruhe durch den Szeneninhalt besitzen. Dafür wurden bekannte Verfahren zur Ausreißerdetektion aus der statistischen Datenanalyse für die Bildverarbeitung angepaßt, geeignete Teststatistiken/Stichproben gefunden und mit Hypothesentests solche Pixel abgetrennt, die Ausreißereigenschaften haben und somit zu den gesuchten, plötzlichen und für die Bildfolge untypischen Ereignissen gehören. Die Bildfolge wird dazu als Ensemble von Zeitreihen der einzelnen Pixel aufgefaßt, die unter der Voraussetzung stationärer Szenen, als Stichprobe für die Teststatistik benutzt werden. Die Voraussetzung wird von einer großen Zahl Anwendungen aus dem Bereich Überwachung und räumlich-zeitlicher Meßdatenaufnahme erfüllt. Die eingesetzte Stichprobenfunktion hat als einzigen äußeren einstellbaren Parameter das Signifikanzniveau des Stichprobentests. Durch die Rückführung simpler Schwellwertverfahren auf diesen Parameter wurde ein Maß gefunden, das über verschiedene Datensätze und Anwendungen hinweg Gültigkeit hat und eine Vergleichbarkeit herstellt. Neben der binären Entscheidung der Ausreißerzugehörigkeit wird zu jedem Bildpunkt ein über die Teststatistik bestimmtes Gütemaß für die getroffene Entscheidung mitgeliefert. Unerwünschte Effekte, die bei Vorhandensein mehrfacher Ausreißer zu Verdeckungen oder Fehldetektionen in der jeweiligen Stichprobe führen, werden durch eine iterative Erweiterung erfolgreich unterdrückt. Im Unterschied zur Ausnutzung der vollen zeitlichen Information arbeiteten bisherige Verfahren stets auf räumlichen Stichproben, die nur aus zwei aufeinanderfolgende Einzelbildern einer Sequenz entnommen wurden. Das Verfahren wurde in zwei sehr unterschiedlichen Anwendungen in die Praxis umgesetzt. Bei einer Prozeßkontrolle eines sehr unruhigen Fügeverfahrens mit stark rauschender Sensorik aus dem Gebiet der industriellen Qualitätssicherung konnte die Ereignisdetektion mittels ihres Gütemaßes in ein automatisiertes Überwachungssystem bis zur Patentreife weiterentwickelt werden. Es ersetzt heute in der Massenproduktion eine 100%-Sichtprüfung und überwindet erstmals die Schwierigkeiten herkömmlicher, räumlich integrierender Sensoren, die nie einsatzreife in der Massenproduktion erreichten. Bei der Analyse von thermographischen Bilddaten im zweiten Anwendungsgebiet konnten Bildintensitäten, die von zwei unterschiedlichen physikalischen Ursachen erzeugt wurden, voneinander getrennt und die Parameterschätzung der Wärmeflüsse durch frühzeitige Herausnahme von Ausreißern verbessert werden. Das entwickelte Verfahren gibt dem Anwender ein einfach konfigurierbares, schnelles, modular einsetzbares Werkzeug in die Hand, um Bildfolgen automatisch auf untypische Ereignisse zu überwachen und sich in nachfolgender Algorithmik speziell der Eigenschaften dieser Ereignisse anzunehmen oder diese aus dem Datensatz zu entfernen, um Fehler durch Ausreißer in der späteren Auswertung, Parameterschätzung oder Modellbildung zu vermeiden.

# Vollständiges Inhaltsverzeichnis der Dissertation

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	2
1.2	Überblick zur vorliegenden Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Verfahren zur Ausreißeranalyse und Änderungsdetektion</b>	<b>5</b>
2.1	Überblick . . . . .	5
2.2	Methoden aus der statistischen Datenanalyse . . . . .	6
2.2.1	Was sind Ausreißer? . . . . .	6
2.2.2	Klassische Verfahren zur Ausreißerdetektion . . . . .	7
2.2.3	Simonoff-Methode zur Ausreißerdetektion . . . . .	13
2.2.4	Wilks-Methode zur Ausreißerdetektion . . . . .	19
2.2.5	Methode nach Hadi mit robusten Schätzern . . . . .	21
2.2.6	Zusammenfassung . . . . .	23
2.3	Änderungsdetektoren der Bildverarbeitung . . . . .	23
2.3.1	Einleitung und Überblick . . . . .	23
2.3.2	Objektdetektion versus Änderungsdetektion . . . . .	24
2.3.3	Änderungsdetektion mit lokalen Bildmodellen . . . . .	25
2.3.4	Ansätze zur Glättung mit Markov-Zufalls-Feldern . . . . .	31
2.3.5	Änderungsdetektion mit Hypothesentests . . . . .	31
2.3.6	Glättung der Änderungskarten mit Bayes-Methoden . . . . .	38
2.3.7	Ansätze zur Kompensation von Beleuchtungsschwankungen . . . . .	41
2.3.8	Bewegungsschätzung versus Änderungsdetektion . . . . .	42
2.3.9	Kontinuierliche Berechnung des Hintergrundes . . . . .	43
2.3.10	Änderungsdetektoren für Multimediaformate . . . . .	45
2.3.11	Schlußbemerkung . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Statistischer Ansatz zur Detektion von Ereignissen</b>	<b>47</b>
3.1	Überblick . . . . .	47
3.2	Bildinhalte und Bildverstehen bei Sequenzen . . . . .	47
3.3	Herleitung der varianznormierten Mittelwertabweichung . . . . .	49
3.3.1	Analogie zum Inversen Kontrastverhältnis . . . . .	49
3.3.2	Varianznormierte zeitliche Abweichung . . . . .	50
3.3.3	Nachbarschaften . . . . .	50
3.3.4	Schwellwertbildung und Bemerkungen zur Teststatistik . . . . .	52

3.3.5	Mögliche Modifikationen . . . . .	54
3.3.6	Iterativer Ansatz . . . . .	55
3.3.7	Resultierende Größen und Weiterverarbeitung . . . . .	58
3.3.8	Zusammenfassung . . . . .	59
3.4	Invariante Merkmale aus der momentenbasierten Objektanalyse . . . . .	60
3.4.1	Überblick . . . . .	60
3.4.2	Merkmale . . . . .	60
3.4.3	Reguläre und zentrale Momente . . . . .	61
3.4.4	Invarianten aus Momenten . . . . .	63
3.4.5	Der Momententensor . . . . .	66
3.4.6	Die Invarianten nach Hu . . . . .	68
3.4.7	Vollständigkeit von Momenten und charakteristische Funktion . . . . .	71
3.4.8	Inverses Momentenproblem . . . . .	72
3.4.9	Legendre-Momente . . . . .	74
3.4.10	Weitere Invariantensätze . . . . .	76
3.4.11	Momente und Rauschen . . . . .	78
3.4.12	Diskrete Momente . . . . .	80
3.4.13	Dreidimensionale Momente und Invarianten . . . . .	81
3.4.14	Schnelle Berechnung von Momenten . . . . .	81
3.4.15	Zusammenfassung . . . . .	83
3.5	Polynomklassifikatoren . . . . .	83
3.5.1	Übersicht . . . . .	83
3.5.2	Problematik der Klassifikation . . . . .	84
3.5.3	Mathematisches Gerüst der Polynomklassifikatoren . . . . .	85
3.5.4	Abgrenzung zu anderen Klassifikatoren . . . . .	87
3.5.5	Zusammenfassung . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Ereignisdetektion zur Qualitätssicherung</b>	<b>91</b>
4.1	Übersicht . . . . .	91
4.2	Bildverarbeitung im industriellen Umfeld . . . . .	92
4.3	Laserschweißen . . . . .	93
4.4	CMOS-Kameratechnik . . . . .	98
4.5	Aufgabenstellung und Prozeß . . . . .	103
4.6	Industrielle Randbedingungen und Anforderungen . . . . .	105
4.7	Lösungsansatz für die Qualitätssicherung . . . . .	107
4.8	Aufbau und Ablauf des Überwachungssystems . . . . .	109

4.9	Algorithmik zur Änderungsdetektion . . . . .	111
4.10	Teststatistik und Bestimmung kritischer Werte . . . . .	115
4.11	Rauschen im Vergleich zu den Variationen . . . . .	120
4.12	Erkennung von Objekten und deren Beschreibung . . . . .	123
4.13	Merkmale . . . . .	124
4.14	Klassifikation . . . . .	125
4.15	Durchgeführte Versuche . . . . .	127
4.16	Ergebnisse . . . . .	129
4.17	Vergleich mit anderen Systemen . . . . .	135
<b>5</b>	<b>Ausreißerdetektion in Thermographiedaten</b>	<b>137</b>
5.1	Übersicht . . . . .	137
5.2	Motivation . . . . .	138
5.3	Datenaufnahme und Kameratechnik . . . . .	139
5.4	Reflektionen als Ausreißer . . . . .	141
5.5	Bestimmung des Wärmeflusses . . . . .	142
5.6	Lösungsansatz durch Ausreißerdetektion . . . . .	148
5.7	Konstruktion stationärer Szenenstücke . . . . .	150
5.8	Durchführung und Ergebnisse der Ereignisdetektion . . . . .	152
5.9	Grenzen des Verfahrens . . . . .	155
<b>6</b>	<b>Resumée</b>	<b>159</b>
6.1	Wahl des Verfahrens . . . . .	159
6.2	Herausragende Eigenschaften der verwendeten Teststatistik . . . . .	161
6.3	Wahl der Anwendungen . . . . .	162
6.4	Rückführung auf bekannte Verfahren . . . . .	163
6.5	Schlußbemerkung . . . . .	164
<b>A</b>	<b>Anhang: Rechenschema für inverses Momentenproblem</b>	<b>167</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>170</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>171</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>

»An outlier is an observation that deviates so much from other observations as to arouse suspicion that it was generated by a different mechanism.«  
Douglas M. Hawkins [Hawkins, 1980]

## Einführung in das Thema der Dissertation

Mit dieser Arbeit soll die Brücke zwischen der multidimensionalen Bildverarbeitung und der statistischen Datenauswertung geschlagen werden, um in Bildfolgen untypische Ereignisse automatisch zu erkennen. Die dabei entwickelten Methoden werden auf zwei völlig unterschiedlichen Datensätze einmal aus der industriellen Fertigung und Qualitätssicherung, zum anderen aus der Bilddatenaufnahme im Rahmen wissenschaftlicher Versuchskampagnen angewendet und auf ihre Einsatztauglichkeit geprüft.

In der Verarbeitung von Bildfolgen, in der Regel zeitlichen Abfolgen von Grauwertbildern, ist die Detektion von Ereignissen und Änderungen in den Bildern ein vorrangiges Ziel: die Erfassung von Bildveränderung (engl. *change detection*) ist Voraussetzung und Grundlage für die Berechnung von Optischem Fluß, Bewegung und Segmentierung von bewegten Objekten. Moderne Anwendungen sind zu finden bei der Stereobild-Analyse, in der Kodierung von Videomaterial (MPEG-Standard), der Videoüberwachung (Objektschutz, Verkehrsüberwachung), Robotik und der industriellen Qualitätssicherung von Prozessen, aus der wir eine Anwendung in dieser Arbeit ausführlich diskutieren werden. Änderungsdetektion ist dabei ein oft verborgen und im Vorfeld der Verarbeitung (engl. *early vision*) stattfindender Prozeß, für den Algorithmen Ende der 70er Jahre entworfen wurde, als Datenspeicher und Rechenspeicher erstmals eine Verarbeitung von Bildfolgen zuließen. Heute wären *change detectors* wahrscheinlich vergessen, wenn nicht in den 90er Jahren ein enormer Bedarf an effizienten Kompressionsmöglichkeiten von Bildfolgen durch die Möglichkeit der Übertragung von Bilddaten im Internet und die Realisierung großer digitaler Videoarchive aufgekommen wäre.

Fassen wir die einzelnen Pixel in einer Bildfolge als Ensemble von Zeitreihen oder bei mehrkanaligen Bildern als multivariate Werte auf, so stellt uns die Disziplin der statistischen Datenanalyse unter dem Begriff der Ausreißerdetektion (engl. *outlier detection*) Werkzeuge zur Suche nach abrupten Sprüngen in den Daten zur Verfügung. Ähnlich wie die Änderungsdetektoren in der Bildverarbeitung sind auch die Ausreißerdetektoren der Statistik ein – gemessen an der jeweiligen Disziplin – altes, hier sehr zu unrecht unbeachtetes, Werkzeug. Ausreißerdetektion sollte jeder Verarbeitung experimentell ermittelter Datensätze vorausgehen und hat zum Ziel, offensichtliche Meßfehler, Ablesefehler, Zahlendreher, bei automatischer Datenaufnahme auch Geräteausfälle oder eingebrachte Störungen auszuschließen, um Resultate in Form von Meßgrößen oder validierten Modellen auf tatsächlich relevante Daten zu stützen.

Obwohl letztlich mit großer Sicherheit davon auszugehen ist, daß bei aufwendigen Experimenten und großen Datensätzen immer Ausreißer vorhanden sind, werden systematische Tests zur Suche danach selten betrieben. Gründe dafür mögen darin liegen, daß die Ausreißerdetektion fast ausschließlich in der Sprache der Statistiker formuliert ist, die zusätzlich zum Verständnis der Inhalte in den Sprachgebrauch der Anwenderdisziplinen übertragen werden muß, daß die statistische Datenanalyse nicht zum Lehrkanon naturwissenschaftlicher Grundlagen gehört, ihre Original-Literatur aufgrund des

Alters der Methoden wenig zugänglich ist und die Verfahren auch mit heutigen Mitteln der Auswertung zeitraubend geblieben sind. Für eine stärkere Beachtung spricht, daß nicht wenige experimentelle Nachweise und Experimente der modernen Physik, die sich deutlich an der statistischen Nachweisgrenze bewegen, ausschließlich von Statistikern zu einem Ergebnis geführt wurden oder zu falschen Schlüssen, weil die statistische Absicherung der Resultate unsauber geführt wurde.

Während in der statistischen Datenanalyse von “Ausreißern” gesprochen wird und in der Bildverarbeitung und Überwachungstechnik von “Änderungen” die Rede ist, wird in dieser Arbeit meist nach “Ereignissen” gesucht. Auch ist in der Statistik der Begriff “Ausreißer” eher negativ besetzt, und es werden in der Regel keine weiteren Untersuchungen außer dem reinen Erkennen und Löschen an den Ausreißern vorgenommen, wogegen es in dieser Arbeit gerade um ein Verständnis der physikalischen Ursachen jener Bildelemente geht, die als “Ausreißer” erscheinen. Ebenso ist der Begriff der “Änderungen” in der Bildverarbeitung historisch bedingt heute automatisch mit den Gebieten Bewegungsanalyse und Optischem Fluß verknüpft; beide Themen werden in dieser Arbeit nur am Rande vorkommen. Die Gründe gegen die Verwendung der Bezeichnungen “Ausreißer” und “Änderungen” rechtfertigen aber nicht unbedingt, durchgängig und weitaus passender von “untypischen Ereignissen” zu sprechen: immer dort, wo es die Nähe zu bereits bekannten Detektionsverfahren oder der in den oben genannten Disziplinen übliche Sprachgebrauch nahelegt, werden wir weiterhin von Ausreißern oder Änderungen sprechen.

## **Organisatorischer Rahmen der Dissertation**

Die vorliegende Arbeit wurde am Interdisziplinären Zentrum für wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg als Industriepromotion bei der Robert Bosch GmbH (Forschung und Vorausbildung, Automatisierungstechnik) in Schwieberdingen betreut. Seitens beider Stellen flossen durch diese Arbeit neue Erkenntnisse in ein landesgefördertes Projekt *OPEN-EYE* zahlreicher Partner aus Wissenschaft und Industrie, bei dem der Einsatz neuer Sensorik (in unserem Fall der HDRC-Sensor) für die multidimensionale Bildverarbeitung (hier Sequenzbildverarbeitung) erarbeitet werden sollte. Die in Kapitel 4 vorgestellte Anwendung stammt aus dem industriellen Bereich. Für die Anwendung in Kapitel 5 wurden Daten benutzt, die aus Meßkampagnen des Institutes für Umweltphysik der Universität Heidelberg stammen.

## **Veröffentlichungen und begleitende Arbeiten**

Mit Abschluß dieser Promotion wurden Ausschnitte und einzelne Ergebnisse in einem Konferenzbeitrag und einem Zeitschriftenartikel veröffentlicht

[Brocke, 2002] Brocke, Martin:

Statistical Image Sequence Processing for Temporal Change Detection.

In: Van Gool, Luc (Hrsg.): *Pattern Recognition 2002, 24. DAGM Symposium, Zürich*, Springer-Verlag, 2002 LNCS, Lecture Notes in Computer Science, S. 215–223



[Jähne, Bernd und Brocke, Martin et al., 2002] Jähne, Bernd und Brocke, Martin et al.  
Für Anspruchsvolle - Multidimensionale Bildverarbeitung in der Produktion.  
In: *Journal Qualität und Zuverlässigkeit*, Hanser-Verlag, Nr. 11, 2002, Vol. 47

und patentiert in

[Brocke, Martin u. a., 2002] Brocke, Martin; Schmidt, Matthias Dirk und andere:  
Verfahren zur automatischen Beurteilung von Laserverarbeitungsprozessen,  
Deutsches Patent DE 10103255 A1, Offenlegung 14.08.2002

In Planung ist ein Beitrag im Sammelband zu Ergebnissen der Forschergruppe am Interdisziplinären  
Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen

[Brocke, 2003] Brocke, Martin:  
In Planung: Statistical Image Sequence Processing for Temporal Change Detection.  
In: Jähne, Bernd (Hrsg.): *Image Sequence Analysis to Investigate Dynamic Processes*, Springer-  
Verlag, LNCS, Lecture Notes in Computer Science, 2003

Zu den bearbeiteten Gebieten wurden in drei Teilbereichen Diplomarbeiten angefertigt

[Sax, 2001] Sax, Alexander:  
Bau eines Teststandes für schnelle und hochdynamische CMOS-Bildverarbeitungssysteme  
Diplomarbeit, Fachhochschule Esslingen, 2001

[Ritter, 2001] Ritter, Soltan:  
Klassifikation von Änderungen in Bildfolgen  
Diplomarbeit, Fachhochschule Esslingen, 2001

[Seiffert, 2001] Seiffert, Thomas:  
Messverfahren und Kenngrößen zur Beurteilung des dynamischen Kontrastauflosungsvermögens  
elektronischer Bildaufnehmer  
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 2001

und kleinere Praktika betreut. Eine parallel laufende Arbeit

[Schmidt, 2003] Schmidt, Matthias Dirk:  
Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschweißen mit hochdynamischer Bildverarbeitung  
Promotion, IFSW, Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, 2003

konzentrierte sich auf die physikalischen Hintergründe beim Laserschweißen sowie den Fertigungs-  
nachweis des in Kapitel 4 vorgestellten Systems. Eine Anschlußarbeit

[Hader, 2004] Hader, Sören:  
Arbeitstitel: Klassifikation und Data Mining  
Dissertation, Universität Mannheim, 2004

konzentriert sich unter dem Stichwort data-mining auf die systematische Auswertung großer Datensätze, wie sie bei der Verarbeitung von Bildfolgen in der industriellen Massenproduktion typischerweise anfallen.

## **Zielsetzung der Dissertation**

Der in dieser Arbeit zentrale Ereignisdetektor (Kapitel 3) wird in Aufgaben der Bildfolgenverarbeitung eingesetzt, in denen gerade die Änderungen von Bild zu Bild oder über mehrere Bilder hinweg gesucht werden: diese stellen die Datenregionen von eigentlichem Interesse dar.

Ziel ist es, einen solchen möglichst generell gehaltenen Algorithmus auf verschiedene Bilddaten anzuwenden, mit früheren Verfahren zu vergleichen und die Probleme in zwei unerschiedlichen Anwendungen zu lösen. Die gestellte Aufgabe ist aus der Praxis motiviert, in der nach einem einfachen und schnellen Verfahren gesucht wird, um plötzliche und untypische Ereignisse in Bildfolgen stationärer Prozesse automatisch zu finden.

Für die industrielle Aufgabenstellung aus der Prozeßüberwachung (Kapitel 4) ist dies die sichere Detektion von Prozeßfehlern und außergewöhnlichen Ereignissen, die die Qualität der Prozesse mindern und zu fehlerhaften Bauteilen führen. Die zu entwerfende Algorithmik soll als Qualitätskontrolle des Prozesses diese schadhafte Teile schnell und sicher identifizieren und mit einem Alarm melden.

Für die umweltphysikalische Aufgabenstellung (Kapitel 5) gilt es, in Bilddaten mit starken Intensitätsvariationen ungewöhnlich helle und plötzlich auftauchende Bildregionen zu finden. Grauwertintensitäten in diesen Gebieten werden von einem anderen physikalischen Prozeß als die übrigen Werte im Bild verursacht und dürfen daher nicht in die Parameterschätzung eines Modelles einfließen, das für die reguläre Verteilung der Grauwerte entworfen wurde. Konkret soll für die gleichzeitige Berechnung von Temperaturfeldern und Bewegungsfeldern zu den bereits implementiert vorliegenden robusten Verfahren ein Ausschlußverfahren offensichtlicher Ausreißer-Effekte hinzukommen und die Parameterschätzungen stabiler und sicherer zu machen.

## **Kapitelübersicht zur Dissertation**

Im Kapitel 1 (Seite 1ff.) wird eine Einführung in die Thematik gegeben, Zielsetzung und Rahmen der Arbeit erläutert. Auszüge daraus wurden weiter oben übernommen. In Kapitel 2 (Seite 5ff.) werden die in der statistischen Datenanalyse bekannten Verfahren zur Ausreißerdetektion und die in der digitalen Bildverarbeitung anerkannten Verfahren zur Änderungsdetektion vorgestellt. Zahlreiche zentrale Begriffe und Effekte werden eingeführt und praxiserprobte Methoden beschrieben. In Kapitel 3 (Seite 47ff.) wird aus dieser theoretischen Vorbereitung ein neues Verfahren zur Ereignisdetektion in stationären und möglicherweise stark verrauschten Bildfolgen entworfen und mit einer iterativen

Verschleifung um eine robusten Erweiterung ergänzt. Eine Darstellung der Theorie der momentenbasierten Formanalyse und der Klassifikation schließen sich an. Die beiden Kapitel 4 (Seite 91ff.) und 5 (Seite 137ff.) behandeln dann ausführlich die beiden sehr unterschiedlichen Umsetzungen des Verfahrens in die Praxis. Beide Anwendungen werden motiviert und ihre Bedeutung erläutert, Sensorik der jeweiligen Bildaufnehmer (hochdynamische CMOS-Kamera und Infrarot-Kamera), genereller Versuchsaufbau und Randbedingungen der Datenaufnahme ebenso besprochen wie die genaue Anpassung des in dieser Arbeit zentralen Verfahrens. Aus den Ergebnissen ziehen wird im Kapitel 6 (Seite 159ff.) ein Resümée und bewerten abschließend Vorteile, herausragende Eigenschaften und Begrenzungen des Verfahrens im Vergleich mit anderen Methoden.

## **Übersicht zum Kapitel 1: Einführung (Seite 1ff.)**

Die Einführung in Thematik, Arbeitsgebiete, Zielsetzung und Durchführung dieser Arbeit deckt sich in weiten Teilen mit diesem Dokument.

## **Übersicht zum Kapitel 2: Bekannte Verfahren (Seite 5ff.)**

In diesem Kapitel werden Ausreißerdetektoren (engl. *outlier detectors*), so werden sie in der statistischen Datenanalyse genannt, und Detektoren für Änderungen (engl. *change detectors*), wie sie in der Bildverarbeitung bekannt sind, vorgestellt. Wir konzentrieren uns dabei auf klassische und allgemein gebräuchliche Verfahren beider Disziplinen und gehen an solchen Stellen tiefer in die Theorie, an denen Ideen und Erkenntnisse für das neue, im Rahmen dieser Dissertation gefundene Verfahren (siehe Kapitel 3) relevant sind. Zwischen den beiden Fachgebieten der statistischen Datenanalyse (Abschnitt 2.2) und der Bildfolgenverarbeitung (Abschnitt 2.3) gibt es bezüglich der Detektion ungewöhnlicher und einmaliger Ereignisse in zweidimensionalen Zeitreihen, also Bildsequenzen, nach intensiver Sichtung der Literatur bisher keine Verbindungen.

### **Ausreißerdetektoren der statistischen Datenanalyse**

Nach einer einleitenden Begriffsklärung im Abschnitt 2.2.1 besprechen wir mit der Thompson-Teststatistik

[Thompson, 1935] Thompson, William R.:

On a criterion for the rejection of observations and the distributions of the ratio of the deviation to the sample standart deviation

Annals of Mathematical Statics 1935, Volume 6, pp 214 - 219

in Abschnitt 2.2.2 eines der wichtigsten klassischen Verfahren und erläutern anhand der vor allem von Grubbs, Chandra Sekar und Pearson geführten Diskussion dazu unerwünschte Effekte (Seite 10), die multiple Ausreißer auf einen Detektor haben können. Auch wird eine allgemeine Formulierung für einen Hypothesentest auf Basis einer Signifikanz  $\alpha$  gegeben. Mit den Methoden von Simonoff und denen von Wilks in den Abschnitten 2.2.3 und 2.2.4 besprechen wir moderne Verfahren, die Fehldetektionen durch multiple Ausreißer nach den Ideen und Ansätzen von Rosner ausschließen. Die Methode von Hadi (Abschnitt 2.2.5) schließlich kombiniert aktuelle Ansätze robuster Schätzer

mit Ausreißerdetektoren. Auf Übersichtsartikel zu zahlreichen weiteren Verfahren verweisen wir in der Zusammenfassung (Abschnitt 2.2.6).

Während letztlich bei allen Datenaufnahmen und Messungen gründliche Ausreißerdetektionen einer Auswertung vorangehen sollten, sind die Verfahren im naturwissenschaftlich-technischen Bereich auch heute noch wenig bekannt und selten eingesetzt. So wären die Fragestellungen zur Ausreißeridentifikation nach ihrer ersten Blütezeit in den 30er Jahren vor allem in den Zeitschriften BIOMETRIKA und TECHNOMETRICS fast in Vergessenheit geraten, wenn nicht Jahrzehnte später mit den robusten Schätzern

[Huber, 1980] Huber, Peter J.:  
Robust Statistics,  
New York, Wiley & Sons, 1980

[Rousseeuw, Peter J. und Leroy, Annik M., 1987] Rousseeuw, Peter J.; Leroy, Annik M.:  
Robust Regression and Outlier Detection  
New York, Wiley & Sons, 1987

neue Akzente gesetzt worden wären. Die weit verstreute und sporadische Literatur wird zusammengefaßt in

[Hawkins, 1980] Hawkins, Douglas M.:  
Identification of Outliers  
Chapman and Hall, London, 1980

[Barnett, Vic und Lewis, Toby, 1994] Beckman, R. J.; Cook, R. D.:  
Outlier....s,  
Technometrics silver issue 25th anniversary, 1983, Volume 25, p.119-149

Der Eingang selbst klassischer hier vorgestellter Verfahren in Standard-Software zur statistischen Datenauswertung steht aber noch aus; auch die im folgenden Abschnitt gesichteten Verfahren, die in der Bildverarbeitung unter dem Namen "Ausreißerdetektoren" in Teilen sogar nochmal erfunden wurden, vermitteln ein ähnliches Bild.

Ein Grund für diese Vernachlässigung mag in den komplexen und auch heute noch Rechenzeitintensiven Iterationen der Verfahren liegen, die teilweise eher graphisch orientierte Zwischenschritte haben und immer wieder auf umfangreiche Tabellenwerke zur Bestimmung kritischer Werte oder Grenzen zurückgreifen. Ein anderer Grund für die Zurückhaltung der Experimentatoren mag darin liegen, daß es mit der bloßen Identifikation der Ausreißer nicht getan ist. Was tun mit Ausreißern? Weder das rücksichtslose Streichen ohne jede Interpretation noch die unbegründete Beibehaltung offensichtlich falscher Werte sind gangbare Wege. Eine individuelle Ursachenforschung oder erneute Messung sind in der experimentellen Praxis groß angelegter Experimente aber oft schlichtweg unmöglich.

### **Änderungsetektoren der Bildfolgenanalyse**

Für die bereits bekannten Verfahren aus dem Bereich der Bildverarbeitung leiten wir in Abschnitt

2.3.1 mit einem historischen Rückblick, intuitiven Ansätzen und deren Probleme zu einem kurzen Einschub in Abschnitt 2.3.2 über, in dem die Änderungsdetektion von der Objektdetektion abgegrenzt wird. In Abschnitt 2.3.3 wird das inzwischen klassische und erste Verfahren zur Änderungsdetektion aus den Arbeiten von Nagel et al., vor allem

[Hsu, Y. Z. u. a., 1984] Hsu, Y.Z.; Nagel, H.-H.; Rekers, G.:  
New likelihood test methods for change detection in image sequences  
Computer Vision, Graphics and Image Processing, vol. 26, pp. 73–106, 1984

vorgestellt, zu dem Bouthemy et al. (Abschnitt 2.3.4) die Bayes-Methoden von Geman et al.

[Geman, Stuart und Geman, Donald, 1984b] Geman, Stuart; Geman, Donald:  
Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images,  
PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 6, pp. 721–741, Nov. 1984

zur Regularisierung der Ergebnisse hinzufügte. Aach et al.

[Aach, 1993] Aach, Til:  
Bayes-Methoden zur Bildsegmentierung, Änderungsdetektion und Verschiebungsvektorschätzung,  
Dissertation, RWTH Aachen: Fortschrittberichte VDI Reihe 10, Nr.261, Düsseldorf, 1993

[Aach, Til u. a., 1993b] Aach, Til; Kaup, André; Mester, Rudolf:  
Statistical model-based change detection in moving video  
Signal Processing (Elsevier), Vol. 31, No. 2, pp. 165-180, March 1993

benutzte diese in zahlreichen Anwendungen der Bildverarbeitung – für den Bereich der Änderungsdetektion werden zuerst seine Hypothesentests mit unterschiedlichen Teststatistiken in Abschnitt 2.3.5 vorgestellt und dann die Glättungen (Abschnitt 2.3.6), die im wesentlichen die Entscheidungsschwellen modifizieren. Aktuelle Erweiterungen zum Problem der Beleuchtungsschwankungen werden in Abschnitt 2.3.7 genannt. Nachdem die Änderungsdetektion von der Bewegungsschätzung in Abschnitt 2.3.8 abgegrenzt wurde, werden noch kurz für diese Arbeit interessante Aspekte der kontinuierlichen Berechnung eines Hintergrundbildes und der Bildfolgenanalyse im Multimediabereich in den Abschnitten 2.3.9 und 2.3.10 angesprochen.

In der Bildverarbeitung sind zahllose Verfahren zur Änderungsdetektion bekannt und gebräuchlich. Die hier vorgestellten wichtigsten und theoretisch fundierten Verfahren der expliziten Änderungsdetektion aus der Bildvorverarbeitung (engl. *early vision*) werden ergänzt durch viele implizite Verfahren, die bei der Bildfolgenanalyse eingearbeitet wurden. Aus den Erkenntnissen der Hypothesentests, Stichprobenwahl, Möglichkeiten zur Glättung und der Wahl der gegeneinander zu vergleichenden Daten (bis auf die Detektoren mit Hintergrundreferenzbildern wurden stets Differenzbilder zugrunde gelegt, also nur zwei Bilder einer ganzen Bildfolge benutzt) werden wir im folgenden Kapitel 3 eine für unsere Zwecke passende Änderungsdetektion aufbauen.

Aus diesem Kapitel werden später vor allem relevant: die Thompson-Teststatistik (2.1) (auf Seite 7ff.), deren Schwellwerte in Tabelle 2.1 (Seite 8), die allgemeine Formulierung eines Hypothesentests (Seite 12) und die Änderungsdetektoren mit Hypothesentests (Abschnitt 2.3.5, Seiten 31ff.).

## Übersicht zum Kapitel 3: Statistischer Ansatz zur Ereignisdetektion (Seite 47ff.)

Unser Ziel ist es, stark verrauschte Prozesse oder Prozesse mit typischerweise hohen Variationen zu überwachen und Ausreißer zu detektieren, die nicht den üblichen Variationen entsprechen, sich aber in deren Größenordnungen bewegen. Bei der Verarbeitung von Bildsequenzen, also dreidimensionaler  $(x, y, t)$  Daten, sind dafür Anwendungen in der Überwachung im weitesten Sinne denkbar, so daß hier zu entwickelnde Algorithmik als Alarm-Geber oder als ein Modul der Datenvorverarbeitung zur Überprüfung der Datenkonsistenz dienen kann.

In diesem Kapitel wird die in dieser Arbeit verwendete Rechenmethode entwickelt. Im ersten Teil wird gezeigt, wie aus den Bilddaten Regionen extrahiert werden können, die untypische Ereignisse aufweisen. Dieser Ansatz nimmt in Details einige Ideen früherer Arbeiten auf, setzt jedoch insgesamt wegen der typischen Eigenschaften (Abschnitt 3.2) der hier zur Untersuchung anstehenden Daten neu an und beschreibt ein bisher auch in angrenzenden Gebieten nicht bekanntes Verfahren (Abschnitt 3.3). Zusammenfassend sei festgehalten, daß die vorgestellte varianznormierte Mittelwertabweichung (3.1) und deren iterative Berechnungen die gestellte Aufgabe löst, verschiedene Szeneninhalte zu trennen und Pixel, die schlagartige Änderungen zeigen, sicher und mit einem Gütemaß versehen zu detektieren. Die iterativen Ansätze verhindern Maskierungs- und Überschwemmungseffekte. Die vorgeschlagene Methode ist bei Einsatz einer typischen kritischen Schwelle aus Tabelle 2.1 (Seite 8) parameterfrei. Modifikationen (Betragsbildung, Anwendung auf mehrere Teilintervalle) erlauben eine datengetriebene Analyse von Bildsequenzen, die aus mehreren stückweise stationären Szenen bestehen und Ausschläge in höhere oder niedrigere Grauwertintensitäten zeigen. Die detektierten Pixel werden mit klassischen Methoden der Bildverarbeitung zu Regionen (2D oder 3D) zusammengefaßt und indiziert. Als Ergebnisse (in Abschnitt 3.3.7 zusammengefaßt) liegen dann vor:

- eine binäre Sequenz mit indizierten Regionen, deren Pixel starke Änderungen im zeitlichen Ablauf haben
- die Teststatistik  $f$  (letzte durchgeführte Iteration von  $f^{(i)}$ ) als Sequenz mit einer Aussage, wie stark in jedem Pixel ein solcher Ausschlag war
- aus den iterativen Verfahren:  $\beta$  und dessen räumliches Mittel, die beide eine Aussage darüber machen, auf welchem Datenumfang die Mittelwertberechnungen der einzelnen Pixel beruhen und wie häufig Abweichungen in den Pixeln  $(x, y, n)$  und der Sequenz  $n$  insgesamt vorkommen

### Momentenbasierte Formanalyse

Die identifizierten Regionen werden als Objekte verstanden, und es werden Merkmale zugeordnet: klassische Verfahren der momentenbasierten Formanalyse (Abschnitt 3.4) werden dazu ausführlich diskutiert. Dieses Unterkapitel ist bewußt so geschrieben, daß nur an dieser Materie interessierte Leser alle Informationen dort finden und kein Vorwissen aus anderen Kapiteln zum Verständnis benötigen. Die Objektanalyse, die auf den als “reguläre Momente” oder “zentrale Momente” bezeichneten Integralen der Bilder oder Regionen beruht, wurde historisch gesehen von Ming-Kuei Hu

[Hu, 1961] Hu, Ming-Kuei:  
Pattern Recognition by Moment Invariants  
Proceedings of the IRE Institute of Radio Engineers, vol 49, pp. 1428, September 1961

[Hu, 1962] Hu, Ming-Kuei:  
Visual pattern recognition by moment invariants,  
IRE (Institute of Radio Engineers) transactions on information theory New York, vol. IT-8, February 1962, pp. 179-187

[Teague, 1980] Teague, Michael Reed:  
Image Analysis via the General Theory of Moments  
Journal of the Optical Society of America vol. 70, pp. 920-930, No. 8, (August 1980), 1980

aus der im neunzehnten Jahrhundert intensiv betriebenen Mathematik der algebraischen Formen und Invariantentheorie auf die Mustererkennung übertragen. In den 70er Jahren wurden zahlreiche Sätze von Momenten vorgeschlagen, aus denen leicht Sätze invarianter Größen, die für die Mustererkennung wesentlichen Größen, abgeleitet werden können. Vergleiche zwischen verschiedenen Sets von Momenten in der Praxis der Klassifikation führten zahlreiche Autoren durch; frühe Anwendungen konzentrierten sich vor allem auf *template matching* (Schrifterkennung und militärische Aufgaben). Insbesondere die Parallelisierbarkeit der Berechnung der Momente führte zu zahlreichen Publikationen zur schnellen Berechnung von Momenten. Einige wenige Ansätze zur Theorie der Momente in mehr als zwei Dimensionen liegen vor. Der heutige Trend zur multidimensionalen Bildverarbeitung und der Einzug der 3D-Bildverarbeitung mit Volumenbildern oder Zeitserien in die Standardanwendungen, die mit einfacher Hardware bereits lösbar sind, könnte zu einer Wiederentdeckung der höherdimensionalen Aspekte dieses klassischen Werkzeuges der Mustererkennung führen. Ein interessanter Aspekt sind hierbei die Bemühungen um FPGA-Realisierungen binärer oder bereits 8-bit tiefer Momentenberechnung auf Framegrabberkarten oder in intelligenten Kamerasensorboards.

Wir stellen die regulären Momente und die zentralen Momente als Merkmale vor und konstruieren daraus die ersten Hu-Invarianten. Legendre-Momente werden damit verglichen, und einige Bemerkungen zur schnellen Berechnung von Momenten und deren Invarianten auch im dreidimensionalen Raum schließen das Kapitel ab. Einführungen in die momentenbasierte Objektanalyse finden sich in Lehrbüchern der Bildverarbeitung

[Jain, 1989] Jain, Anil K.:  
Fundamentals of digital image processing,  
Prentice Hall, New Jersey, 1989

[Jähne, 2002] Jähne, Bernd:  
Digitale Bildverarbeitung  
5. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2002

Die für die Bildverarbeitung relevante Mathematik der Invarianten im zweidimensionalen Raum und eine Übersicht zur wissenschaftlichen Literatur liefern

[Reiss, 1993] Reiss, Thomas H.:  
Recognizing Planar Objects Using Invariant Image Features,  
Lecture notes in computer science, No. 676, Springer, Berlin, 1993

[Mundy, Joseph L. und Zisserman, Andrew, 1992] Mundy, Joseph L.; Zisserman, Andrew:  
Geometric Invariance in Computer Vision,  
The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992

[Prokop, Richard J. und Reeves, Anthony P., 1992] Prokop Richard J.; Reeves, Anthony P.:  
A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition,  
Graphical Models and Image Processing, vol 54 , no 5 , September, 1992, pp. 438 – 460

Mit der momentenbasierten Objekterkennung mit Parametern, die invariant unter affinen Transformationen bleiben, haben wir ein Verfahren der Objekterkennung mit Invarianten (engl. *invariant object recognition*, IOF) vorgestellt. Mit den unter den affinen Transformationen Translation, Rotation und Achsenskalierung invarianten Parametern (3.26), die wir aus den normierten zentralen Momenten berechnen können, haben wir ein mächtiges Werkzeug, um detektierte geschlossene Regionen in ihrer geometrischen Form und ihrer Relevanz für unsere Aufgabe mit einem kleinen Satz skalarer Werte zu beschreiben. Diese wurden aus einem mathematisch fundierten Gerüst abgeleitet und sind erweiterbar in höhere Ordnungen wie auch in die dreidimensionale Formanalyse. Wir haben uns dabei weitgehend auf die Analyse von Grauwertobjekten beschränkt und spezielle Fälle wie binäre Regionen oder Bildinvarianten nur am Rande behandelt. Invarianten unter projektiven Transformationen haben wir dabei ebenso außer acht gelassen wie die lokalen Invarianten oder die Konstruktion von Invarianten aus Integralen über die Transformationsgruppe.

Andere Verfahren der IOF sind Fourierdeskriptoren vor allem auf Objekträndern, direkte optische Techniken, genetische Algorithmen oder der Einsatz neuronaler Netze. Unter den zahllosen Invariantensätzen der momentenbasierten Objekterkennung gelten die Zernike-Momente als erste Wahl, wenn es um die Rekonstruktion von Grauwertobjekten geht, insbesondere bei additivem Rauschen. Sie haben aber den entscheidenden Nachteil, im Diskreten wegen der notwendigen Normierung auf die Einheitsscheibe  $x^2+y^2 \leq 1$  und den zugrundeliegenden radialen Polynomialen einen ungleich höheren Rechenaufwand zu verlangen als alle anderen vorgestellten Invariantensätze. Legendre-Momente sind zwar mit ihrer Orthogonalität (nicht redundant) theoretisch attraktiv, haben aber das schlechteste Signal-Rausch-Verhältnis. In der in Kapitel 4 vorgestellten Anwendung werden wir daher auf normierte zentrale Momente und deren Hu-Invarianten (3.26) zurückgreifen.

### **Klassifikatoren**

Schließlich leitet ein Abschnitt zur geeigneten Merkmalsauswahl über in die vergleichende Darstellung von Klassifikatoren (Abschnitt 3.5). Auch dieser Abschnitt kann als eigenständige Einführung in die Thematik dienen und setzt nicht die Kenntnis anderer Abschnitte voraus.

Zu den als potentielle Bereiche von Änderungen identifizierten Regionen innerhalb des Bildstapels liegen Merkmale vor, anhand derer eine abschließende Entscheidung getroffen werden soll, ob die identifizierte Änderung ein relevantes Ereignis ist oder nicht. Die Abbildung aus dem Merkmalsraum mit typischerweise  $10^1$  Merkmalen in den Entscheidungsraum mit 2 Dimensionen ist eine weitere



Datenreduktion, die direkt auf die gewünschte Aussage führt. Wahl und Konstruktion eines Klassifikators muß eng verwoben mit der Auswahl und Bewertung von Merkmalen geschehen, wie die gestellten Fragen gezeigt haben. Nach einer Motivation von Klassifikationsverfahren als solchen stellen wir die Mathematik von drei verschiedenen Klassifikationsverfahren vor, mit denen später die zu den detektierten Änderungen aus Abschnitt 3.3.7 gefundenen Parameter aus Abschnitt 3.4 eine Zuordnung in die beiden Klassen “relevante Änderung” und “keine Änderung” für einzelne Bilder oder die gesamte Bildsequenz vorgenommen werden kann. Die Klassifikatoren werden bei der industriell orientierten Anwendung in Kapitel 4 benutzt, sollen aber bereits hier in ihrer Theorie vorgestellt und von anderen Verfahren abgegrenzt werden. Die hier verwendeten verteilungsfreien Klassifikatoren, die eine solche Abbildung bewerkstelligen, benötigen Vorwissen (Trainingsdaten) in Form von Merkmalsvektoren und der jeweiligen Klassenzugehörigkeit. Aus den vorgestellten Klassifikatoren (Nächster-Nachbar, k-Nächster-Nachbar, Minimum-Mean-Distance und Polynomklassifikator) haben wir den Polynomklassifikator als für unsere Zwecke geeigneten identifiziert. Als Literatur insbesondere zu Polynomklassifikatoren seien genannt:

[Schürmann, 1996] Schürmann, Jürgen:  
Pattern Classification - A Unified View of Statistical and Neural Approaches  
John Wiley & Sons, 1996

[Kreßel, Ulrich u. a., 1990] Kreßel, Ulrich; Franke, J.; Schürmann, Jürgen:  
Polynomklassifikator versus Multilayer-Perzeptron  
In: Großkopf, R. E. (Hrsg.): Mustererkennung 1990, 12. DAGM Symposium Oberkochen-Aalen,  
1990, pp. 75 - 81

Mit der Teststatistik, der momentenbasierten Formanalyse und den Polynomklassifikatoren liegen die methodischen Werkzeuge für zwei Anwendungen (Übersichtstabelle 6.1, Seite 162) bereit, die in den nachfolgenden Kapiteln 4 und 5 beschrieben werden.

## **Übersicht zum Kapitel 4: erste Anwendung: Ereignisdetektion zur Qualitätssicherung (Seite 91ff.)**

Die erste Anwendung der vorgestellten statistischen Methode zur Detektion von Änderungen wird Bildfolgen aus der industriellen Qualitätskontrolle untersuchen. Aufgabe ist es, einen zu filmenden Prozeß abzusichern gegen plötzlich auftauchende Schwankungen, Objekte, die das Bildfeld durchqueren, Sensorausfälle und dergleichen mehr. Es sind also für jede einzelne Bildfolge all jene Pixel zu markieren, die zu plötzlichen, singulären und unerwarteten Ereignissen in ihren Grauwerten gehören. Die Detektion von geänderten Regionen wird hierbei zu einer Objektdetektion weiterentwickelt und erlaubt als zentraler Baustein der Auswertung schließlich eine abschließende Gut/Schlecht-Aussage über den beobachteten Prozeß und damit über das in diesem Prozeß gefertigte Bauteil.

Moderne Bildverarbeitungssysteme ermöglichen heute industrielle Inspektions- und Qualitätssicherungsaufgaben, die bis vor kurzem noch als unrealisierbar galten. Qualitätskontrolle in der automatisierten Massenproduktion bedeutet traditionell die Prüfung des fertigen Werkstückes, kann aber

auch die Überwachung des Herstellungsprozesses selbst sein. Ein von einer Kamera beobachteter Arbeitsschritt ist dann in der Regel auf Anomalien zu prüfen. Solche Ausreißer deuten auf Fehler am Produkt oder im Prozeß hin und müssen zum Ausschleusen der betroffenen Teile und einem Signal für Wartungsbedarf an der betroffenen Station führen.

Nach einer Einführung in die drei Themen industrielle Bildverarbeitung (Abschnitt 4.2), Laserschweißen (Abschnitt 4.3) und CMOS-Kameras (Abschnitt 4.4) werden aus der konkreten Anwendung (Abschnitt 4.5) die technischen Randbedingungen (Abschnitt 4.6) entnommen, und ein Lösungsansatz (Abschnitt 4.7) für die gestellte Aufgabe entworfen. Nach der Bereitstellung der Bilddaten und eines Ablaufkonzeptes der Auswertung (Abschnitt 4.8) passen wir die in Kapitel 3 vorgestellte Algorithmen auf dieses Problem an (Abschnitt 4.9 bis 4.11) und erläutern die Ergebnisse (Abschnitt 4.15 und 4.16) der Auswertungen. Eine Bewertung und Vergleich (Abschnitt 4.17) mit anderen Systemen runden das Kapitel ab.

Als relevante Literatur seien genannt für CMOS-Technologie

[Tian, 2000] Tian, Hui:

Noise Analysis in CMOS Image Sensors,  
PhD Thesis, Stanford University, CA, 2000

[Seiffert, 2001] Seiffert, Thomas:

Messverfahren und Kenngrößen zur Beurteilung des dynamischen Kontrastaufklärungsvermögens elektronischer Bildaufnehmer  
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 2001

[Gröning, 2002] Gröning, Herrmann:

Monokulares 3D-Tracking und radiometrische Kalibrierung  
Dissertation, Universität Heidelberg, 2002

[Seger, Ulrich u. a., 1999] Seger, Ulrich; Apel, Uwe; Höfflinger, Bernd:

HDRC-Imagers for Natural Visual Perception  
In: Jähne, Bernd; Geißler, Peter; Haußecker, Horst: Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1: Sensors and Imaging, pp. 223 - 236, Academic Press, 1999

[Loose, 1999] Loose, Markus:

A Self-Calibrating CMOS Image Sensor with Logarithmic Response  
Dissertation, Universität Heidelberg, 1999

Für den Themenbereich Laserschweißen

[Nordbruch, Stefan u. a., 2000] Nordbruch, Stefan; Tschirner, P.; Gräser, A.:

Analyse von HDRC-Bildern des Werkstoffübergangs des MSG-Schweißprozesses  
Sommer, G. et al (Hrsg.): Mustererkennung 2000, 22. DAGM Symposium, Kiel 2000, Springer Verlag, Heidelberg, Seiten 147 - 154

[Schmidt, 2003] Schmidt, Matthias Dirk:

Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschweißen mit hochdynamischer Bildverarbeitung  
Promotion, IFSW, Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, 2003

## Übersicht zum Kapitel 5: zweite Anwendung: Ausreißerdetektion in Thermographiedaten (Seite 137ff.)

Für die zweite Anwendung der entwickelten Detektion von Ereignissen greifen wir auf Meßdaten zurück, die auf Forschungsexpeditionen des Institutes für Umweltphysik der Universität Heidelberg bei Feldmessungen gewonnen wurden. Sie wurden in

[Garbe, 2001] Garbe, Christoph Sebastian:  
Measuring Heat Exchange Processes at the Air-Water Interface from Thermographic Image Sequence Analysis  
PhD thesis, University of Heidelberg, December 2001

[Garbe, C. S. und Jähne, B., 2001] Garbe, Christoph Sebastian; Jähne, Bernd:  
Reliable estimates of the sea surface heat flux from image sequences  
In: Radig, B. et al (Hrsg.): Mustererkennung 2001, 23. DAGM Symposium, München 2001 LNCS  
Lecture notes on computer science No. 2191, pp. 194 – 201, Springer Verlag, 2001

ausgewertet und in den Kontext von Laborergebnissen vom Heidelberger Aeolotron (Wind-Wellenkanal) gestellt. Weitere Arbeiten zu Messungen des Gasaustausches an Wasseroberflächen mittels Wärmeflüssen als Tracer sind

[Haußecker, 1996] Haußecker, Horst:  
Messung und Simulation von kleinskaligen Austauschvorgängen an der Ozeanoberfläche mittels Thermographie  
Dissertation, Universität Heidelberg, 1996

[Schimpf, 2000] Schimpf, Uwe:  
Untersuchung des Gasaustausches und der Mikroturbulenz an der Meeresoberfläche mittels Thermographie  
Dissertation, Universität Heidelberg, 2000

Sowohl bei den Bildfolgen aus dem Labor wie denen aus Feldmessungen treten nach der Kalibration Regionen schlagartig erhöhter Bildintensitäten auf, die schnell und unter Veränderung ihrer unregelmäßigen, wenig kompakten Form durch das Bildfeld wandern. Diese Bereiche in einer Bildvorverarbeitung sicher zu detektieren, so daß die eigentlichen Auswertungen solche Pixel nicht mehr miteinbeziehen, das ist die hier an die Ausreißerdetektion gestellte Aufgabe.

Im ersten Abschnitt 5.2 führen wir in die Thematik des Gasaustausches an Meeresoberflächen ein und geben Gründe an für das Interesse an Modellen, Parametrisierungen und Transferraten, welche die aufwendigen Labor- und Felduntersuchungen rechtfertigen. Die Sensorik und Datengewinnung sind in Abschnitt 5.3 beschrieben, woraus sich das Zustandekommen der Reflektionen (Abschnitt 5.4) verstehen läßt. Eine Übersicht zu Verfahren der Auswertung dieser Daten durch zahlreiche andere Autoren wird in Abschnitt 5.5 sehr kompakt zusammengestellt – vor allem, um ein Verständnis für

die Problematik der Ausreißer in den Daten zu vermitteln und die Notwendigkeit bisheriger robuster Parameterschätzer oder der hier zusätzlich anwendbaren (Abschnitt 5.6) Ausreißerdetektion anschaulich zu machen. Nachdem die Bildfolgen in Abschnitt 5.7 in stückweise stationäre Szenen eingeteilt wurden, führen wir in Abschnitt 5.8 die in dieser Arbeit vorgeschlagene Detektion durch und erläutern abschließend die Ergebnisse und Grenzen (Abschnitt 5.9) des Verfahrens.

## Übersicht zum Kapitel 6: Resumée (Seite 159ff.)

Die benutzte Ereignisdetektion ist eine Analogie der Ausreißerdetektion von Thompson (Abschnitt 2.2.2) für die Bildverarbeitung und damit ein klassisches Verfahren der Ausreißeranalyse mit signifikanzbasiertem Hypothesentest. Der einzige frei wählbare Parameter darin ist das Signifikanzniveau; die Stichprobengröße (Anzahl der Bilder) wird durch die Aufgabenstellung bestimmt und sollte maximal sein. Jedes Pixel wird einzeln in einem Hypothesentest auf seine Ausreißereigenschaft hin geprüft auf Basis seines eigenen zeitlichen Werteverlaufes. Die Verteilung der Teststatistik unter der Gegenhypothese  $H_1$  muß dafür nicht bekannt sein, was ein weiterer Vorteil des Hypothesentests ist. In der Tat wurde die Teststatistik von Thompson ohne jede Nachbarschaftsinformation der Pixel untereinander benutzt: diese floß erst bei den Glättungen oder der Formanalyse (Abschnitte 3.4 und 4.13) ein, die direkt auf den Werten der Teststatistik ausgeführt wurde.

Im Schlußteil der Arbeit wird das benutzte Verfahren mit den vorgestellten bekannten Methoden aus der statistischen Datenanalyse und der Bildverarbeitung verglichen und die Wahl des Verfahrens begründet. Herausragende Eigenschaften des Verfahrens begründen die Wahl der beiden Anwendungen. Ein Vergleich mit den von Aach et al. und Nagel et al. benutzten Methoden zeigt, daß diese beiden Verfahren und die hier vorgestellte Methode auf eine gemeinsame Grundlage zurückgeführt werden können.

## Schlußbemerkung aus der Dissertation

Einleitend vorangestellt hatten wir auf Seite 6 eine der vielen möglichen und insbesondere in den wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Datenanalyse kursierenden Definitionen für ungewöhnliche Ereignisse, wie sie Hawkins [Hawkins, 1980] vorschlug. Für den an der quantitativen Umsetzung interessierten Wissenschaftler stellen sich dazu sofort die beiden Fragen *“To deviate from what?”* und *“Where to put the borderline in between **much** and **too much**?”* Die in dieser Arbeit gefundenen Antworten darauf sind einerseits der möglichst robust geschätzte Mittelwert – wir gelangen in wenigen Iterationen dorthin – und zum anderen ein Vielfaches der durch den verbesserten Mittelwert bereits robusten Standardabweichung. Es gibt zu einer Stichprobengröße und einem Risiko von Fehlurteilen, das man bereit ist einzugehen, an, wo die gesuchte Grenze zu ziehen ist. Mit einer sinnvollen Auswahl der Dauer der Szenen und einem vertretbaren Risiko von 5% bis 10% Fehlurteilen (erster Ordnung) in dieser Teststatistik gelang eine sichere Detektion der gesuchten Ereignisse in zwei völlig unterschiedlichen Anwendungen und Themengebieten (Übersichtstabelle 6.1, Seite 162). Im ersten Fall konnte das Verfahren zu einer vollständigen und überzeugenden Lösung des bisher ungelösten Problems der sicheren Prozeßüberwachung und Qualitätskontrolle beim Wärmeleitungsschweißen mit Lasern aus-

gebaut werden. Die zweite Praxisanwendung zeigt die Grenzen des Verfahrens auf, wenn nicht mehr alle notwendigen Voraussetzungen sicher eingehalten werden. Doch stellt auch in diesem Fall die mit dieser Teststatistik durchgeführte Detektion von Werten, die einer anderen Verteilung gehorchen, als daß dies vom zugrunde liegenden Modell für die bereits robustifizierte Parameterschätzung vorhergesehen wird, eine sinnvolle Ergänzung der Auswertung dar.

# Literaturverzeichnis

- [Aach 1993] AACH, Til: *Bayes-Methoden zur Bildsegmentierung, Änderungsdetektion und Verschiebungsvektorschätzung*, RWTH Aachen, Fortschrittberichte VDI Reihe 10, Nr.261, Düsseldorf, Dissertation, 1993
- [Aach, Til und Kaup, André 1995] AACH, TIL ; KAUP, ANDRÉ: Bayesian Algorithms for adaptive Change Detection in Image Sequences Using Markov Random Fields. In: *Signal Processing: Image Communication* 7 (1995), Nr. 2, S. 147–160
- [Aach, Til u. a. 1991] AACH, TIL ; KAUP, ANDRÉ ; MESTER, RUDOLF: A Statistical Framework for Change Detection in Image Sequences. In: *Proceedings 13 ième Colloque GRETSI, Juan-Les-Pins, France* (1991), S. 1149–1152
- [Aach, Til u. a. 1993a] AACH, TIL ; KAUP, ANDRÉ ; MESTER, RUDOLF: Change Detection in Image Sequences Using Gibbs Random Fields a Bayesian approach. In: *IEEE Proceedings ISPACS International Workshop on Intelligent Signal Processing and Communications Systems, Sendai, Japan, , 1993*, S. 376–381
- [Aach, Til u. a. 1993b] AACH, TIL ; KAUP, ANDRÉ ; MESTER, RUDOLF: Statistical model-based change detection in moving video. In: *Signal Processing* 31 (1993), Nr. 2, S. 165–180
- [Aach, Til u. a. 1997] AACH, TIL ; KAUP, ANDRÉ ; MESTER, RUDOLF: Statistical model-based change detection in moving video. In: *Proceedings International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, ICASSP 1997, Munich, Germany* Bd. 4: Multidimensional signal processing, neural networks, 1997, S. 2657
- [Aach, Til u. a. 2000] AACH, TIL ; TOH, DANIEL ; METZLER, VOLKER: Bayesian spatio-temporal motion detection under varying illumination. In: *European Signal Processing Conference EUSIPCO 2000* (2000)
- [Abhyankar 1991] ABHYANKAR, Shreeram S.: Invariant theory and enumerative combinatorics of young tableaux. In: *DARPA-ESPRIT Workshop on Applications of Invariance in Computer Vision*, March 1991, S. 55–108
- [Abu-Mostafa, Yaser S. und Psaltis, Demitri 1984] ABU-MOSTAFA, YASER S. ; PSALTIS, DEMITRI: Recognitive aspects of moment invariants. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6 (1984), S. 698–706
- [Abu-Mostafa, Yaser S. und Psaltis, Demitri 1985] ABU-MOSTAFA, YASER S. ; PSALTIS, DEMITRI: Image normalisation by complex moments. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 7 (1985), S. 46–55
- [Ahanger, G. und Little, T. D. C. 1996] AHANGER, G. ; LITTLE, T. D. C.: A survey of technologies for parsing and indexing digital video. In: *Journal of Visual Communication and Image Representation* 7 (1996), Nr. 1, S. 28–43

- [Alferez, Ronald-Bryan O. und Wang, Yuan-Fang 1999] ALFEREZ, RONALD-BRYAN O. ; WANG, YUAN-FANG: Geometric and Illumination Invariants for Objects Recognition. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (1999), Nr. 6, S. 505–535
- [Anderson, Peter G. und Gaboriski, Roger S. 1993] ANDERSON, PETER G. ; GABORSKI, ROGER S.: A Polynomial Method Augmented by Supervised Training for hand-Printed Character Recognition. In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks and genetic Algorithms ANNGA*, , 1993
- [Anscombe 1960] ANSCOMBE, F. J.: Rejection of outliers. In: *Technometrics* 2 (1960), Nr. 2, S. 123–147
- [Atkinson 1994] ATKINSON, A. C.: Fast, very robust methods for detection of multiple outliers. In: *Journal of the American Statistical Association* 89 (1994), S. 1329–1339
- [Bab-Hadiashar, Alireza und Suter, David 1998] BAB-HADIASHAR, ALIREZA ; SUTER, DAVID: Robust Optic Flow Computation. In: *International Journal of Computer Vision IJCV* 29 (1998), Nr. 1, S. 59–77
- [Barnett, Vic und Lewis, Toby 1994] BARNETT, VIC ; LEWIS, TOBY: *Outliers in Statistical Data*. 3. Wiley & Sons, Chichester, New York,, 1994
- [Barron, J. L. und Liptay, A. 1994] BARRON, J. L. ; LIPTAY, A.: Optic Flow to Measure Minute Increments in Plant Growth. In: *Bioimaging* 2 (1994), Nr. 1, S. 57–61
- [Beckman, R. J. und Cook, R. D. 1983] BECKMAN, R. J. ; COOK, R. D.: Outlier...s. In: *Technometrics, silver issue 25th anniversary* 25 (1983), S. 119–149
- [Beersiek 1999] BEERSIEK, Joerg: On-line monitoring of Keyhole Instabilities during Laser Beam Welding. In: *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 1999, San Diego*, , 1999
- [Beersiek 2001] BEERSIEK, Joerg: A CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding. In: *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 2001, Jacksonville*, , 2001
- [Belkasim, S. O. u. a. 1991] BELKASIM, S. O. ; SHRIDHAR, M. ; AHMADI, M.: Pattern recognition with moment invariants: A comparative study and new results. In: *Pattern Recognition* 24 (1991), Nr. 12, S. 1117–1138
- [Belkasim, S. O. u. a. 1993] BELKASIM, S. O. ; SHRIDHAR, M. ; AHMADI, M.: Corrigendum. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), Nr. 1, S. 377
- [Bernoulli, Daniel und Allen, C. G. 1777] BERNOULLI, DANIEL ; ALLEN, C. G.: The Most Probable Choice between Several Discrepant Observations and the Formation Therefrom of the Most Likely Induction. In: *Biometrika* 48 (1777), S. 1–18. – translated reprint in 1961
- [Blom, A. H. M u. a. 1999] BLOM, A. H. M ; BRASSEL, JAN-OLIVER ; OTHERS: Quality Classification and Process Control of Micro-Spot Laser Welding. In: ASHAYERI, JALAL (Hrsg.) ; SULLIVAN, WILLIAM (Hrsg.) ; AHMAD, MUNIR (Hrsg.): *Proceedings of the Ninth International FAIM Conference - Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Tilburg*. New York : Begell House, 1999, S. 929–941
- [Boreczky, J. S. und Rowe, L. A. 1996] BORECZKY, J. S. ; ROWE, L. A.: Comparison of Video Shot Boundary Detection Techniques. In: *Proceedings of IS&T / SPIE International Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology, San Jose, California* Bd. Storage and Retrieval for Image and Video Databases IV, 1996

- [Bouthemy, Patrick u. a. 1999] BOUTHEMY, PATRICK ; GELGON, M. ; GANANSIA, F.: A unified approach to shot change detection and camera motion characterization. In: *IEEE Trans.on Circuits and Systems for Video Technology* 9 (1999), Nr. 7, S. 1030–1044
- [Bouthemy, Patrick und Lalande, Patrick 1990] BOUTHEMY, PATRICK ; LALANDE, PATRICK: Detection and tracking of moving objects based on a statistical regularization method in space and time. In: FAUGERAS (Hrsg.): *Proceedings of the European Conference on Computer Vision ECCV 1990, Antibes, France*, Springer, New York, 1990, S. 307–311
- [Bouthemy, Patrick und Lalande, Patrick 1993] BOUTHEMY, PATRICK ; LALANDE, PATRICK: Recovery of moving object masks in an image sequence using local spatiotemporal contextual information. In: *Optical Engineering* 32 (1993), June, Nr. 6, S. 1205–1212
- [Boyce, J. F. und Hossak, W. J. 1983] BOYCE, J. F. ; HOSSAK, W. J.: Moment Invariants for pattern recognition. In: *Pattern Recognition Letters* 1 (1983), July, Nr. 5-6, S. 451–456
- [Braggins, Don und Schibli, Nikolaus 2001] BRAGGINS, DON ; SCHIBLI, NIKOLAUS: Image sensors for vision / Bildsensoren und ihre Zukunft. In: *Sensor Report* (2001), Nr. 5, S. 14–17
- [Brassel 2001] BRASSEL, Jan-Oliver: *Prozesskontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen*, LFT Lehrstuhl für Fertigungstechnologie Universität Erlangen, Dissertation, 2001. – Verlag Meisenbach, Bamberg
- [Brocke 2002] BROCKE, Martin: Statistical Image Sequence Processing for Temporal Change Detection. In: VAN GOOL, Luc (Hrsg.): *Pattern Recognition 2002, 24. DAGM Symposium, Zürich*, Springer-Verlag, 2002 (LNCS), S. 215–223
- [Brocke 2003] BROCKE, Martin: In Planung: Statistical Image Sequence Processing for Event Detection. In: JÄHNE, Bernd (Hrsg.): *Image Sequence Analysis to Investigate Dynamic Processes*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2003 (LNCS - Lecture Notes in Computer Science)
- [Brocke, Martin u. a. 2002] BROCKE, MARTIN ; SCHMIDT, MATTHIAS DIRK ; OTHERS: Verfahren zur automatischen Beurteilung von Laserverarbeitungsprozessen / Deutsches Patent DE 10103255 A1, Offenlegung 14.08. , 2002 (Rollnummer 39374). – Forschungsbericht
- [Burkhardt 1979] BURKHARDT, Hans: *Transformationen zur lageinvarianten Merkmalgewinnung*, University of Karlsruhe, Dissertation, 1979. – erschienen als Fortschrittbericht (Reihe 10, Nr.7) der VDI-Zeitschriften, VDI-Verlag
- [Canterakis 1996] CANTERAKIS, Nikolaos: Complete Moment Invariants and Pose Determination for Orthogonal Transformations of 3D Objects. In: *Mustererkennung 1996, 18. DAGM-Symposium, September 1996*, , 1996, S. 339–350
- [Caroni, Chrys und Prescott, Philip 1992] CARONI, CHRYS ; PRESCOTT, PHILIP: Sequential application of Wilks's multivariate outlier test. In: *Applied Statistics* 41 (1992), Nr. 2, S. 355–364
- [Cayley 1856] CAYLEY, Arthur: A second memoir upon quantics. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 146 (1856), S. 101–126
- [Chen, Z. und Mu, G. 1995] CHEN, Z. ; MU, G.: High-dynamic-range image acquisition and display by multi-intensity imagery. In: *Journal of Imaging Science and Technology*, 39 (1995), Nr. 6, S. 559–564
- [Chrzanowski, Krzysztof u. a. 2001] CHRZANOWSKI, KRZYSZTOF ; MATYSZKIEL, ROBERT ; OTHERS: Uncertainty of temperature measurement with thermal cameras. In: *Optical Engineering* 40 (2001), Nr. 6, S. 1106–1114



- [Crank 1975] CRANK, J.: *The Mathematics of Diffusion*. 2nd. Oxford : Clarendon Press, 1975
- [Danckwerts 1970] DANCKWERTS, P. V.: *Gas-liquid reactions*. New York : MacGraw-Hill, 1970
- [Dausinger 1995] DAUSINGER, Friedrich: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität*, Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge) - University of Stuttgart, Dissertation, 1995
- [David, H. A. u. a. 1954] DAVID, H. A. ; HEARTLEY, H. O. ; PEARSON, E. S.: The distribution of the ratio a single sample of range to standart deviation. In: *Biometrika* 41 (1954), S. 482–493
- [Davies 1977] DAVIES, P. J.: Plane regions determined by complex moments. In: *Journal of Approximation Theory* 19 (1977), S. 148–153
- [Davies, Laurie und Gather, Ursula 1993] DAVIES, LAURIE ; GATHER, URSULA: The identification of multiple outliers. In: *Journal of American Statistical Association* 88 (1993), S. 782–792
- [Dickson 1914] DICKSON, Leonard E.: *Algebraic Invariants*. John Wiley & Sons, 1914
- [Dilthey 2000] DILTHEY, Ulrich: *Laserstrahlschweißen: Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 2000
- [Dixon 1953] DIXON, W. J.: Proceeding Data with Outliers. In: *Biometrics* 9 (1953), march, Nr. 1, S. 74–89
- [Donohoe, G. W. u. a. 1988] DONOHOE, G. W. ; HUSH, D. R. ; AHMED, N.: Change detection for target detection and classification in video sequences. In: *Proceedings International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing, ICASSP*, 1988, S. 1084–1087
- [Dufaux, Frédéric und Moscheni, Fabrice 1995] DUFAUX, FRÉDÉRIC ; MOSCHENI, FABRICE: Segmentation-Based Motion Estimation For Second Generation Video Coding Techniques. In: TORRES, L. (Hrsg.) ; KUNT M. (Hrsg.): *Video Coding: the Second Generation Approach*. Academic Publishers, 1995, Kap. 6, S. 219–263
- [Eisele 2002] EISELE, Heiko: *Arbeitstitel: Röntgencomputertomographie im industriellen Einsatz*, Universität Heidelberg, Dissertation, 2002
- [Feng, J. u. a. 1996] FENG, J. ; LO, K. T. ; MEHRPOUR, H.: Scene change detection algorithm for MPEG video sequence. In: *Proceedings IEEE International Conference on Image Processing ICIP 1996, Lausanne, Switzerland*, , 1996
- [Fernando, W. A. C. u. a. 1999a] FERNANDO, W. A. C. ; CANAGARAJAH, C. N. ; BULL, D. R.: Fade and Dissolve Detection in Uncompressed and Compressed Video Sequences. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 1999, Kobe, Japan*, 1999
- [Fernando, W. A. C. u. a. 1999b] FERNANDO, W. A. C. ; CANAGARAJAH, C. N. ; BULL, D. R.: Wipe Scene Change Detection in Video Sequences. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing ICIP 1999, Kobe, Japan*, 1999
- [Flusser 1998] FLUSSER, Jan: Fast calculation of geometric moments of binary images. In: *Proceedings 22nd OAGM'98 Workshop Pattern Recognition Medical Computer Vision, Illmitz, Austria, 1998*, , 1998, S. 265–274
- [Flusser und Suk 1999] FLUSSER, Jan ; SUK, Thomas: *On the Calculation of Image Moments*. 1999. – unpublished

- [Flusser, Jan und Suk, Thomas 1993] FLUSSER, JAN ; SUK, THOMAS: Pattern recognition by affine moment invariants. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), Nr. 1, S. 167–174
- [Foggia, Pasquale u. a. 1999] FOGGIA, PASQUALE ; SANSONE, CARLO ; OTHERS: Combining statistical and structural approaches for handwritten character description. In: *Image and Vision Computing* 17 (1999), Nr. 9, S. 701–711
- [Forsyth, David u. a. 1992] FORSYTH, DAVID ; MUNDY, JOSEPH L. ; ZISSERMAN, ANDREW: Transformational invariance - a primer. In: *Image and Vision Computing* 10 (1992), S. 39–45
- [Garbe 2001] GARBE, C. S.: *Measuring Heat Exchange Processes at the Air-Water Interface from Thermographic Image Sequence Analysis*. Heidelberg, Germany, University of Heidelberg, Dissertation, December 2001
- [Garbe, C. S. und Jähne, B. 2001] GARBE, C. S. ; JÄHNE, B.: Reliable estimates of the sea surface heat flux from image sequences. In: *Proc. of the 23rd DAGM Symposium*. Munich, Germany : Springer-Verlag, 2001 (Lecture Notes in Computer Science, LNCS 2191), S. 194–201
- [Garbe, C. S. u. a. 2001] GARBE, C. S. ; SPIES, H. ; JÄHNE, B.: Estimation of surface flow and net heat flux from infrared image sequences. In: *Journal of Mathematical Imaging and Vision* (2001). – Special Edition 'Analysis of Fluid Motion from Images', accepted
- [Garbe, Christoph S. u. a. 2002] GARBE, CHRISTOPH S. ; JÄHNE, BERND ; HAUSSECKER, HORST: Measuring the Sea Surface heat Flux and Probability Distribution of Surface Renewal Events. In: *Gas Transfer at Water Surfaces, Geophysical Monograph* (2002), Nr. 127, S. 109–114
- [Gather, Ursula und Becker, Claudia 1997] GATHER, URSULA ; BECKER, CLAUDIA: Outlier Identification and Robust Methods. In: MADDALA, G. S. (Hrsg.) ; RAO C.R. (Hrsg.): *Handbook of Statistics* Bd. Vol. 15: Robust Inference. Elsevier, Amsterdam, 1997, S. 123–143
- [Geman, Stuart und Geman, Donald 1984a] GEMAN, STUART ; GEMAN, DONALD: Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution, and the Bayesian Restoration of Images. In: *IEEE Trans: PAMI* 6 (1984), Nr. 6, S. 721–741
- [Geman, Stuart und Geman, Donald 1984b] GEMAN, STUART ; GEMAN, DONALD: Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6 (1984), S. 721–741
- [Glumann 1996] GLUMANN, Christiane: *Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen*, University of Stuttgart - Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge), Dissertation, 1996
- [Graf, Heinz-Gerd u. a. 1995] GRAF, HEINZ-GERD ; HÖFFLINGER, BERND ; OTHERS: Elektronisch sehen - Alternative zur CCD-Struktur bewältigt hohe Helligkeitsdynamik. In: *Elektronik* (1995), Nr. 3, S. 52–57
- [Gribsch, J. u. a. 1996] GRIBSCH, J. ; SCHLICHTERMANN, L. ; JURCA, L. ET AL.: Quality Assurance of Industrial Spot Welding with a Pulsed Nd:YAG-Laser. In: *Proceedings of International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 1996, Michigan, USA*, 1996, S. 164–173
- [Gröning 2002] GRÖNING, H.: *Monokulares 3D-Tracking und radiometrische Kalibrierung*. Heidelberg, Germany, University of Heidelberg, Dissertation, 2002. – in preparation

- [Grubbs 1950] GRUBBS, Frank E.: Sample criteria for testing outliers observations. In: *Annals of Mathematical Statistics* 21 (1950), S. 27–58
- [Grubbs 1969] GRUBBS, Frank E.: Procedures for Detecting Outlying Observations in samples. In: *Technometrics* 11 (1969), S. 1–21
- [Gutchessy, D. u. a. 2001] GUTCHESSY, D. ; TRAJKOVICZ, M. ; OTHERS: A Background Model Initialization Algorithm for Video Surveillance. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision ICCV 2001*, , 2001
- [Hack 1998] HACK, Rüdiger: *System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO<sub>2</sub> Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW*, University of Stuttgart - Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge), Dissertation, 1998
- [Hader 2004] HADER, Sören: *Arbeitstitel: Klassifikation und Data Mining*, Universität Mannheim, Dissertation, 2004
- [Hadi 1992] HADI, Ali S.: Identifying Multiple Outliers in Multivariate Data. In: *Journal of the Royal Statistical Society B* 54 (1992), Nr. 3, S. 761–771
- [Hadi 1994] HADI, Ali S.: A Modification of a Method for Detection of Outliers in Multivariate Samples. In: *Journal of the Royal Statistical Society B* 56 (1994), Nr. 2, S. 393–396
- [Hadi, Ali S. und Simonoff, Jeffrey S. 1993] HADI, ALI S. ; SIMONOFF, JEFFREY S.: Procedures for the Identification of Multiple Outliers in Linear Models. In: *Journal of American Statistical Association JASA* 88 (1993), Nr. 424, S. 1264–1272
- [Hadi, Ali S. und Simonoff, Jeffrey S. 1994] HADI, ALI S. ; SIMONOFF, JEFFREY S.: Improving the Estimation and Outlier Identification Properties of the least Median of Squares and Minimum Volume Ellipsoid Estimators. In: *Parisankhyan Samikkha* 1 (1994), Nr. 1, S. 61–70
- [Haußecker 1996] HAUSSECKER, H.: *Messung und Simulation von kleinskaligen Austauschvorgängen an der Ozeanoberfläche mittels Thermographie*, University of Heidelberg, Dissertation, 1996
- [Haußecker 1993] HAUSSECKER, Horst: *Mehrgitter-Bewegungssegmentierung in Bildfolgen mit der Anwendung zur Detektion von Sedimentverlagerungen*, Universität Heidelberg, Diplomarbeit, 1993
- [Haußecker, H. und Jähne, B. 1997] HAUSSECKER, H. ; JÄHNE, B.: A Tensor Approach for Precise Computation of Dense Displacement Vector Fields. In: PAULUS, E. (Hrsg.) ; WAHL, F. M. (Hrsg.): *DAGM*. Braunschweig : Springer, September 1997, S. 199–208
- [Haußecker, H. u. a. 1995] HAUSSECKER, H. ; REINELT, S. ; JÄHNE, B.: Heat as a Proxy Tracer for Gas Exchange Measurements in the Field: Principles and Technical Realization. In: JÄHNE, B. (Hrsg.) ; MONAHAN, E. C. (Hrsg.): *Air-Water Gas Transfer - Selected Papers from the Third International Symposium on Air-Water Gas Transfer*. Heidelberg : AEON Verlag & Studio Hanau, 1995, S. 405–413
- [Haußecker, H. u. a. 2001] HAUSSECKER, H. ; SCHIMPF, U. ; OTHERS: Physics from IR image sequences: Quantitative analysis of transport models and parameters of air-sea gas transfer. In: SALTZMAN, E. (Hrsg.) ; DONELAN, M. (Hrsg.) ; OTHERS (Hrsg.): *Gas Transfer at Water Surfaces*. American Geophysical Union, 2001 (Geophysical Monograph)
- [Haußecker, H. und Spies, H. 1999] HAUSSECKER, H. ; SPIES, H.: Motion. In: JÄHNE, B. (Hrsg.) ; HAUSSECKER, H. (Hrsg.) ; GEISSLER, P. (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 2. Academic Press, 1999, Kap. 13

- [Haußecker, Horst und Jähne, Bernd 1993] HAUSSECKER, HORST ; JÄHNE, BERND: Ein Mehrgitterverfahren zur bewegungssegmentierung in Bildfolgen. In: *Mustererkennung 1993, 15. DAGM Symposium*, , 1993, S. 27–31
- [Hauschild 1999] HAUSCHILD, Ralf: *Integrierte CMOS-Kamerasysteme für die zweidimensionale Bildsensorik*, xxx, Dissertation, 1999
- [Hawkins 1980] HAWKINS, Douglas M.: *Identification of Outliers*. Chapman and Hall, London, 1980
- [Hawkins 1985] HAWKINS, Douglas M.: Masking and Swamping. In: KOTZ, SAMUEL (Hrsg.) ; JOHNSON, NORMAN LLOYD (Hrsg.) ; READ, CAMPBELL B. (Hrsg.): *Encyclopedia of Statistical Sciences* Bd. 5. John Wiley & Sons, 1985
- [Heitz, F. und Bouthemy, Patrick 1990] HEITZ, F. ; BOUTHEMY, PATRICK: Motion estimation and segmentation using a global bayesian approach. In: *Proceedings International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing, ICASSP*, April 1990, S. 2305–2308
- [Herrmann 2002] HERRMANN, Andreas: *Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2002
- [Höflinger 1999] HÖFFLINGER, Bernd: CMOS-Bildsensor, Bilder wie sie unser Auge mag. In: *Elektronik* (1999), Februar, Nr. 5, S. 30–34
- [Hügel 1992] HÜGEL, Helmut: *Strahlwerkzeug Laser*. Teubner, 1992
- [Hilbert 1890] HILBERT, David: Über die Theorie der algebraischen Formen. In: *Mathematische Annalen* 36 (1890), S. 473–534
- [Hilbert 1893] HILBERT, David: Über die vollen Invariantensysteme. In: *Mathematische Annalen* 42 (1893), S. 313–373
- [Horn 1994] HORN, Armin: *Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten*, ISW Universität Stuttgart, Band 103, Dissertation, 1994
- [Horn, B. K. P. und Schunk, B. 1981] HORN, B. K. P. ; SCHUNK, B.: Determining Optical Flow. In: *Artificial Intelligence* 17 (1981), S. 185–204
- [Hornegger, J. u. a. 1999] HORNEGGER, J. ; PAULUS, D. ; NIEMANN, H.: Probabilistic Modeling in Computer Vision. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 2: Signal Processing and Pattern Recognition. Academic Press, 1999, Kap. 26
- [Hsu, Y. Z. u. a. 1984] HSU, Y. Z. ; NAGEL, H.-H. ; REKERS, G.: New likelihood test methods for change detection in image sequences. In: *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 26 (1984), S. 73–106
- [Hötter, Michael u. a. 1995] HÖTTER, MICHAEL ; MESTER, RUDOLF ; MEYER, M: Detection of moving objects in natural scenes by a stochastic multi-feature analysis of video sequences. In: *29th Annual 1995 International IEEE Carnahan Conference on Security Technology, Sanderstead, Surrey, England* (1995), S. 47–52
- [Hötter, Michael und Thoma, Robert 1988] HÖTTER, MICHAEL ; THOMA, ROBERT: Image Segmentation Based on Object Oriented Mapping Parameter Estimation. In: *Signal Processing: Image Communication* 15 (1988), october, Nr. 3, S. 315–334

- [Hu 1961] HU, Ming-Kuei: Pattern Recognition by Moment Invariants. In: *Proceedings of the IRE Institute of Radio Engineers* Bd. 49, 1961, S. 1428
- [Hu 1962] HU, Ming-Kuei: Visual pattern recognition by moment invariants. In: *IRE (Institute of Radio Engineers) transactions on information theory* IT- 8 (1962), S. 179–187
- [Huang 1981] HUANG, Thomas S.: *Image Sequence Analysis*. Springer-Verlag, 1981
- [Huang 1982] HUANG, Thomas S.: *Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis*. Springer-Verlag, Nato Advanced Study Institute, 1982 (NATO ASI Series F: computer and system sciences)
- [Huber 1980] HUBER, Peter J.: *Robust Statistics*. New York, Wiley, 1980
- [Jain 1989] JAIN, Anil K.: *Fundamentals of digital image processing*. Prentice Hall, New Jersey, 1989
- [Jain, Anil K. u. a. 2000] JAIN, ANIL K. ; DUIN, ROBERT P. W. ; MAO, JIANCHANG: Statistical Pattern Recognition: A Review. In: *IEEE PAMI Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000), Nr. 1, S. 4–37
- [Jain, Ramesh u. a. 1979] JAIN, RAMESH ; MARTIN, W. N. ; AGGARWAL, J. K.: Segmentation through the detection of changes due to motion. In: *Journal Computer Graphics and Image Processing* 11 (1979), S. 13–34
- [Jain, Ramesh und Nagel, H.-H. 1979] JAIN, RAMESH ; NAGEL, H.-H.: On the analysis of accumulative difference pictures from image sequences of real world scenes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1 (1979), Nr. 2, S. 206–214
- [Jähne 1980] JÄHNE, B.: *Parametrisierung des Gasaustausches mit Hilfe von Laborexperimenten*. University of Heidelberg, Institut für Umweltphysik, Dissertation, 1980
- [Jähne 1993] JÄHNE, B.: *Spatio-Temporal Image Processing : Theory and Scientific Applications*. Springer-Verlag, 1993 (Lecture Notes in Computer Science)
- [Jähne 1990] JÄHNE, Bernd: From mean fluxes to a detailed experimental investigation of the gas transfer process. In: *2nd International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces - Air-Water Mass Transfer, Minneapolis 1990*, ASCE, 1990, S. 244–256
- [Jähne 2002] JÄHNE, Bernd: *Digital Image Processing*. 5th. Heidelberg, Germany : Springer-Verlag, 2002
- [Jähne, B. u. a. 1989] JÄHNE, B. ; LIBNER, P. ; OTHERS: Investigating the transfer process across the free aqueous boundary layer by the controlled flux method. In: *Tellus* 41B (1989), Nr. 2, S. 177–195
- [Jähne, Bernd und Brocke, Martin et al. 2002] JÄHNE, BERND ; BROCKE, MARTIN ET AL.: Für Anspruchsvolle - Multidimensionale Bildverarbeitung in der Produktion. In: *Journal Qualität und Zuverlässigkeit* 47 (2002), November, Nr. 11, S. 1154–1159
- [Jiang, X. Y. und Bunke, Horst 1991a] JIANG, X. Y. ; BUNKE, HORST: Ein konturbasierter Ansatz zur Berechnung von Momenten. In: *Mustererkennung 1991, 13. DAGM Symposium, München*. Heidelberg : Springer, 1991, S. 143–150
- [Jiang, X. Y. und Bunke, Horst 1991b] JIANG, X. Y. ; BUNKE, HORST: Simple and fast computation of moments. In: *Pattern Recognition* 24 (1991), Nr. 8, S. 801–806

- [Karmann, Klaus-Peter und von Brandt, Achim 1990] KARMANN, KLAUS-PETER ; VON BRANDT, ACHIM: Moving Object Recognition Using an Adaptive Background Memory. In: CAPPELLINI, V. E. (Hrsg.): *Time-Varying Image Processing and Moving Object Recognition* Bd. 2. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1990, S. 289–296
- [Karmann, Klaus-Peter u. a. 1990] KARMANN, KLAUS-PETER ; VON BRANDT, ACHIM ; GERL, R.: Moving object segmentation based on adaptive reference images. In: TORRES, L. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the EUSIPCO, Barcelona, September 1990*, 1990, S. 951–954
- [Keller, James M. u. a. 1985] KELLER, JAMES M. ; GRAY, MICHAEL R. ; GIVENS, JAMES A. JR.: A Fuzzy K-Nearest Neighbor Algorithm. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 15 (1985), Nr. 4, S. 580–585
- [Khotanzad, Alireza und Hong, Yaw Hua 1990] KHOTANZAD, ALIREZA ; HONG, YAW HUA: Invariant image recognition by Zernike moments. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 12 (1990), S. 489–497
- [Kilger 1992] KILGER, Michael: A shadow handler in a video based real time traffic monitoring system. In: *IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 1992*, 1992, S. 1060–1066
- [Koller, Dieter u. a. 1994a] KOLLER, DIETER ; WEBER, JOSEPH ; MALIK, JITENDRA: Robust multiple car tracking with occlusion reasoning. In: *European Conference on Computer Vision, ECCV 1994*, , 1994, S. 189–196
- [Koller, Dieter u. a. 1994b] KOLLER, DIETER ; WEBER, JOSEPH ; MALIK, JITENDRA: Robust Multiple Car Tracking with Occlusion Reasoning / University of California Berkeley. January 1994 (UCB/CSD-93-780 and UCB-ITS-PWP-94-01). – Forschungsbericht. – ISSN 1055-1417
- [Krebel, Ulrich u. a. 1990] KRESSEL, ULRICH ; FRANKE, J. ; SCHÜRMAN, JÜRGEN: Polynomklassifikator versus Multilayer-Perzeptron. In: GROSSKOPF, R. E. H. (Hrsg.): *Mustererkennung - 12. DAGM Symposium Oberkochen-Aalen*, , 1990, S. 75–81
- [Lalande, Patrick und Boutheymy, Patrick 1990] LALANDE, PATRICK ; BOUTHEMY, PATRICK: A statistical approach to the detection and tracking of moving objects in an image sequence. In: *Proc. of the Eusipco, Spain*, 1990, S. 947–950
- [Lambert, Georg u. a. 1995] LAMBERT, GEORG ; GAO, HUA ; OTHERS: Linienmomente und Invarianten zur Echtzeitverarbeitung vektorisierter Konturen. In: *Mustererkennung 1995, 17. DAGM Symposium, Bielefeld* (1995), S. 1–14
- [Le Gall 1991] LE GALL, D.: MPEG: A video compression standard for multimedia applications. In: *Communications of the ACM* 34 (1991), Nr. 4, S. 46–58
- [Li 1993] LI, Bing C.: A new computation of geometric moments. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), S. 109–113
- [Li 1992] LI, Y.: Reforming the theory of invariant moments for pattern recognition. In: *Pattern Recognition Letters* 25 (1992), Nr. 7, S. 723–730
- [Li, Bing Cheng und Ma, S. D. 1994] LI, BING CHENG ; MA, S. D.: Efficient computation of 3D moments. In: *Proceedings 12th International Conference Pattern Recognition* Bd. 1, 1994, S. 22–26

- [Li, Bing Cheng und Shen, J. 1991] LI, BING CHENG ; SHEN, J.: Fast computation of moment invariants. In: *Pattern Recognition* 24 (1991), Nr. 8, S. 807–813
- [Liao, Simon X. und Pawlak, Mirosław 1996] LIAO, SIMON X. ; PAWLAK, MIROSLAW: On image analysis by moments. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18 (1996), Nr. 3, S. 254–266
- [Lin, W. G. und Wang, S. S. 1994] LIN, W. G. ; WANG, S. S.: A note on the calculation of moments. In: *Pattern Recognition Letters* 15 (1994), November, Nr. 11, S. 1065–1070
- [Litwiller 2001] LITWILLER, Dave: CCD versus CMOS. In: *Photonics Spectra special issue* (2001)
- [Liu, W. T. und Businger, J. A. 1985] LIU, W. T. ; BUSINGER, J. A.: Temperature Profile in Molecular Sea Surface Temperatures. In: *Journal of Geophysical Research* 90 (1985), S. 11587–11601
- [Lo, Chong-Huah und Don, Hon-Son 1989] LO, CHONG-HUAH ; DON, HON-SON: 3D moment forms: their construction and application to object identification and positioning. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11 (1989), Nr. 10, S. 1053–1064
- [Loncaric 1998] LONCARIC, Sven: A survey of shape analysis techniques. In: *Pattern Recognition* 31 (1998), Nr. 8, S. 983–1001
- [Loose 1999] LOOSE, Markus: *A Self-Calibrating CMOS Image Sensor with Logarithmic Response*, Universität Heidelberg, Dissertation, 1999
- [Loose, Markus u. a. 1996] LOOSE, MARKUS ; MEIER, KARLHEINZ ; SCHEMMEL, JOHANNES: Entwicklung einer Kamera mit adaptiven Photorezeptoren in analoger CMOS Technologie. In: JÄHNE, Bernd (Hrsg.): *Mustererkennung 1996, 18. DAGM Symposium, Heidelberg*, Springer Verlag, 1996, S. 301–312
- [Loose, Markus u. a. 1998] LOOSE, MARKUS ; MEIER, KARLHEINZ ; SCHEMMEL, JOHANNES: CMOS image sensor with logarithmic response and self calibrating fixed pattern noise correction. In: BERNARD, T. M. (Hrsg.): *Proceedings International Symposium on Electronic Image Capture and Publishing - Advanced Focal Plane Arrays and Electronic Cameras*, , 1998 (SPIE 3410)
- [Maitra 1979] MAITRA, S: Moment invariants. In: *Proceedings of IEEE*, 1979 (67), S. 697–699
- [Makarov 1996] MAKAROV, Aleksej: Comparison of background extraction based intrusion detection algorithms. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 1996* Bd. 1, , 1996, S. 521
- [Mayer 2001] MAYER, Arnold: Lasermarkt: Stand und Perspektiven. In: DAUSINGER, F. (Hrsg.) ; HÜGEL, HELMUT (Hrsg.) ; OTHERS (Hrsg.): *Stuttgarter Lasertage 2001, SLT 2001*, September 2001, S. 1–6
- [Mech, Roland und Wollborn, Michael 1997] MECH, ROLAND ; WOLLBORN, MICHAEL: A Noise Robust Method For Segmentation Of Moving Objects In Video Sequences. In: *Proceedings International Conference on Acoustic, Speech, and Signal Processing, ICASSP 1997, Munich, Germany* (1997), S. 2657–2660
- [Mitiche, Amar und Boutheymy, Patrick 1996] MITICHE, AMAR ; BOUTHEMY, PATRICK: Computation and analysis of image motion: a synopsis of current problems and methods. In: *International journal of computer vision, IJCV* 19 (1996), July, Nr. 1, S. 29–55
- [Mundy, Joseph L. und Zisserman, Andrew 1992] MUNDY, JOSEPH L. ; ZISSERMAN, ANDREW: *Geometric Invariance in Computer Vision*. The MIT Press, Cambridge, 1992

- [Munkelt 1993] MUNKELT, Olaf: Zur Auswahl von Merkmalen. In: PÖPPL, S. (Hrsg.) ; HANDELS, H. (Hrsg.): *Mustererkennung 1993, 15. DAGM-Symposium*, , 1993, S. 84–93
- [Nagel 1978] NAGEL, H.-H.: Formation of an object concept by analysis of systematic time variations in the optically perceptible environment. In: *Computer Graphics Image Processing 7 (1978)*, Nr. 149, S. 194
- [Nagel, Hans-Hellmut und Rekers, G. 1982] NAGEL, HANS-HELLMUT ; REKERS, G.: Moving Object Masks Based on an Improved Likelihood Ratio Test. In: *Proceedings International Conference on Pattern Recognition (ICPR) (1982)*
- [Naoya 2001] NAOYA, Ohta: A Statistical Approach to Background Subtraction for Surveillance Systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision ICCV 2001* Bd. 2, , 2001, S. 481–486
- [Niemann 1983] NIEMANN, Heinrich: *Klassifikation von Mustern*. Springer, 1983
- [Noffz, K.-H. u. a. 1999] NOFFZ, K.-H. ; LAY, R. ; OTHERS: Field Programmable Gate Array image processing. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 3: Systems and Applications. Academic Press, 1999, Kap. 2
- [Nordbruch, Stefan u. a. 2000] NORDBRUCH, STEFAN ; TSCHIRNER, P. ; GRÄSER, A.: Analyse von HDRC-Bildern des Werkstoffübergangs des MSG-Schweißprozesses. In: SOMMER, G. I. (Hrsg.): *Mustererkennung 2000, 22. DAGM Symposium, Kiel*, Springer Verlag, Heidelberg, 2000, S. 147–154
- [Parshall 1989] PARSHALL, Karen H.: Toward a history of nineteenth - century invariant theory. In: *The History of Modern Mathematics*. Academic Press, 1989, S. 157–208
- [Pearson, Erwin S. und Sekar, Chandra 1936] PEARSON, ERWIN S. ; SEKAR, CHANDRA: The efficiency of statistical tools and a criterion for the rejection of outlying observations. In: *Biometrika* 28 (1936), S. 308–320
- [Penny 1996] PENNY, Kay I.: Appropriate critical values when testing for a single multivariate outlier by using the mahalanobis distance. In: *Applied Statistics* 45 (1996), Nr. 1, S. 73–81
- [Philips 1993] PHILIPS, Wilfried: A new fast algorithm for moment computation. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), S. 1619–1621
- [Prokop, Richard J. und Reeves, Anthony P. 1992] PROKOP, RICHARD J. ; REEVES, ANTHONY P.: A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition. In: *Graphical Models and Image Processing* 54 (1992), September, Nr. 5, S. 438–460
- [Pudil, P. u. a. 1994] PUDIL, P. ; NOVOVICOVA, J. ; KITTLER, J.: Floating Search Methods in Feature Selection. In: *Pattern Recognition Letters* 15 (1994), Nr. 11, S. 1119–1125
- [Reiss 1991] REISS, Thomas H.: The revised fundamental theorem of moment invariants. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13 (1991), S. 830–834
- [Reiss 1993] REISS, Thomas H.: *Recognizing Planar Objects Using Invariant Image Features*. Springer, 1993 (Lecture notes in computer science 676)
- [Rekers 1982] REKERS, G.: *Die Charakterisierung von Zuständen und Zustandsänderungen in Straßenszenen sowie deren Identifizierungen in TV-Bildfolgen*, Universität Hamburg, Diplomarbeit, 1982



- [Ridder, C. u. a. 1995] RIDDER, C. ; MUNKELT, OLAF ; KIRCHNER, H.: Adaptive background estimation and foreground detection using kalman-filtering. In: *In Proceedings International Conference on Recent Advances in Mechatronics*, 1995, S. 193–199
- [Ritter 2001] RITTER, Soltan: *Klassifikation von Änderungen in Bildfolgen*, Fachhochschule Esslingen und Robert Bosch GmbH FV/PLF2, Diplomarbeit, 2001
- [Rivlin, Ehud und Weiss, Isaac 1995] RIVLIN, EHUD ; WEISS, ISAAC: Local invariants for recognition. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 (1995), Nr. 3, S. 226–238
- [Robertson, Mark A. u. a. 2000] ROBERTSON, MARK A. ; BORMAN, SEAN ; STEVENSON, ROBERT L.: Estimation-Theoretic Approach to Dynamic Range - Enhancement Using Multiple Exposures. In: *Image Processing* (2000)
- [Rohlf 1975] ROHLF, F. J.: Generalization of the gap test for the detection of multivariate outliers. In: *Biometrika* 31 (1975), S. 93–101
- [Rosner 1975] ROSNER, Bernard: On the detection of outliers. In: *Technometrics* 17 (1975), Nr. 2, S. 221–227
- [Rothe, Irene und Süsse, Herbert 1993] ROTHE, IRENE ; SÜSSE, HERBERT: Ein allgemeiner Zugang zur Berechnung von Invarianten. In: *Mustererkennung 1993, 15. DAGM-Symposium, Lübeck, , 1993, S. 67–74*
- [Rothe, Irene und Voss, Klaus 1992] ROTHE, IRENE ; VOSS, KLAUS: Orientierungsbestimmung von Objekten durch Momentinvarianten. In: *Mustererkennung 1992, 14. DAGM Symposium, Dresden, , 1992, S. 42–49*
- [Rothe, Irene u. a. 1994] ROTHE, IRENE ; VOSS, KLAUS ; OTHERS: A General Method to Determine Invariants / Fakultät für Informatik und Mathematik, Universität Jena. 1994. – Forschungsbericht. Fakultät für Informatik und Mathematik, Universität Jena
- [Rousseeuw, Peter J. und Leroy, Annik M. 1987] ROUSSEEUW, PETER J. ; LEROY, ANNIK M.: *Robust Regression and Outlier Detection*. Wiley & Sons, New York, 1987
- [Ruoff 1989] RUOFF, Wolfgang: *Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern*. Springer Verlag, 1989
- [Sadjadi, Firooz A. und Hall, Ernest L. 1980] SADJADI, FIROOZ A. ; HALL, ERNEST L.: Three dimensional moment invariants. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2 (1980), Nr. 2, S. 127–136
- [Salmon 1885] SALMON, George: *Lessons introductory to the Modern Higher Algebra*. 4th. Dublin : Figgis & Co., 1885
- [Sansone 1991] SANSONE, Giovanni: *Orthogonal Functions*. New York : Dover Publications, 1991
- [Sax 2001] SAX, Alexander: *Bau eines Teststandes für schnelle und hochdynamische CMOS-Bildverarbeitungssysteme*, Fachhochschule Esslingen, Diplomarbeit, 2001
- [Schanz 1998] SCHANZ, Michael: *Eindimensionale CMOS Bildsensorik mit integrierter Signalverarbeitung*, Universität Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik, Dissertation, Jun 1998
- [Scharr 2000] SCHARR, H.: *Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung*. Heidelberg, Germany, University of Heidelberg, Dissertation, 2000

- [Schimpf 2000] SCHIMPF, U.: *Untersuchung des Gasaustausches und der Mikroturbulenz an der Meeresoberfläche mittels Thermographie*. Heidelberg, Germany, University of Heidelberg, Dissertation, 2000
- [Schimpf, Uwe u. a. 1999] SCHIMPF, UWE ; HAUSSECKER, HORST ; JÄHNE, BERND: Thermography for small-scale air-sea interaction. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 3: Systems and Applications. Academic Press, 1999, Kap. 35
- [Schmidt 2003] SCHMIDT, Matthias D.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen mit hochdynamischer Bildverarbeitung*, IFSW Institut für Strahlwerkzeuge Universität Stuttgart, Dissertation, 2003
- [Schneider, Bernd u. a. 1999] SCHNEIDER, BERND ; RIEVE, PETER ; BÖHM, MARKUS: Image Sensors in TFA (Thin Film on ASIC) Technology. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 1: Sensors and Imaging. Academic Press, 1999, Kap. 9
- [Schrey 2001] SCHREY, Olaf: *Methoden zur Dynamikerweiterung in der zweidimensionalen CMOS-Bildsensorik*, Fachbereich Elektronik, Gesamthochschule Duisburg, Dissertation, 2001
- [Schürmann 1977] SCHÜRMAN, Jürgen: *Polynomklassifikatoren für die Zeichenerkennung*. Oldenbourg Verlag, 1977
- [Schürmann 1996] SCHÜRMAN, Jürgen: *Pattern Classification - A Unified View of Statistical and Neural Approaches*. John Wiley, 1996
- [Schulz-Mirbach 1995] SCHULZ-MIRBACH, Hanns: Invariant features for gray scale images. In: *Mustererkennung 1995, 17. DAGM Symposium, Bielefeld, , 1995, S. 1–17*
- [Seger, Ulrich u. a. 1999] SEGER, ULRICH ; APEL, UWE ; HÖFFLINGER, BERND: HDRC-Imagers for Natural Visual Perception. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Application* Bd. 1: Sensors and Imaging. San Diego : Academic Press, 1999, Kap. II-8
- [Seiffert 2001] SEIFFERT, Thomas: *Messverfahren und Kenngrößen zur Beurteilung des dynamischen Kontrastauflösungsvermögens elektronischer Bildaufnehmer*, Universität Karlsruhe (TH), Diplomarbeit, 2001
- [Seitz 1999] SEITZ, Peter: Solid-State Image Sensing. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 2: Signal Processing and Pattern Recognition. Academic Press, 1999, Kap. 14
- [Sethi, Ishwar und Patel, Nilesh V. 1995] SETHI, ISHWAR ; PATEL, NILESH V.: A Statistical Approach to Scene Change Detection. In: *SPIE Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Database III* Bd. 2420, , 1995, S. 329–338
- [Siggelkow, Sven u. a. 2001] SIGGELKOW, SVEN ; SCHAEEL, MARC ; BURKHARDT, HANS: SIMBA - Search IMages By Appearance. In: *Mustererkennung 2001, 23. DAGM Symposium, München*, Springer, 2001, S. 7–16
- [Sikora 1997] SIKORA, Thomas: MPEG Digital Video-Coding Standards. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 14 (1997), Nr. 5, S. 82–100
- [Simoncelli 1999] SIMONCELLI, E. P.: Bayesian Multiscale Differential Optical Flow. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 2: Signal Processing and Pattern Recognition. Academic Press, 1999, Kap. 14

- [Simonoff 1992] SIMONOFF, Jeffrey S.: General approaches to stepwise identification of unusual values in data analysis. In: STAHEL, WERNER. (Hrsg.) ; WEISBERG, S. (Hrsg.): *Directions in Robust Statistics and Diagnostics*. Heidelberg : Springer-Verlag, 1992, Kap. 2, S. 223–242
- [Soille 1999a] SOILLE, Pierre: *Morphological Image Analysis*. Springer-Verlag, 1999
- [Soille 1999b] SOILLE, Pierre: Morphological Operators. In: JÄHNE, BERND (Hrsg.) ; GEISSLER, PETER (Hrsg.) ; HAUSSECKER, HORST (Hrsg.): *Handbook of Computer Vision and Applications* Bd. 2: Signal Processing and Pattern Recognition. Academic Press, 1999, Kap. 21
- [Soloviev, A. V. und Schlüssel, P. 1994] SOLOVIEV, A. V. ; SCHLÜSSEL, P.: Parameterization of the Cool Skin of the Ocean and the Air-Ocean Gas Transfer on the Basis of Modeling Surface Renewal. In: *Journal of Physical Oceanography* 24 (1994), Nr. 6, S. 1339–1346
- [Stauder, Jürgen u. a. 1999] STAUDER, JÜRGEN ; MECH, ROLAND ; OSTERMANN, JÖRN: Detection of Moving Cast Shadows for Object Segmentation. In: *IEEE Transactions on Multimedia* 1 (1999)
- [Steen 1998] STEEN, William M.: *Laser material processing*. Springer, 1998
- [Sylvester 1878] SYLVESTER, James J.: Proof of the hitherto undemonstrated fundamental theorem of invariants. In: *Philosophical Magazine* 5 (1878), S. 178–188
- [Talenti 1987] TALENTI, Giorgio: Recovering a function from a finite number of moments. In: *Inverse Problems* 3 (1987), S. 5001–517
- [Teague 1980] TEAGUE, Michael R.: Image Analysis via the General Theory of Moments. In: *Journal of the Optical Society of America* 70 (1980), Nr. 8, S. 920–930
- [Teague 1982] TEAGUE, Michael R.: Calculation of irradiance moments. In: *Applied Optics* 21 (1982), S. 3292–3298
- [Teh, Cho-Huak und Chin, Roland T. 1986] TEH, CHO-HUAK ; CHIN, ROLAND T.: On digital approximation of moment invariants. In: *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 33 (1986), S. 318–326
- [Teh, Cho-Huak und Chin, Roland T. 1988] TEH, CHO-HUAK ; CHIN, ROLAND T.: On image analysis by the methods of moments. In: *PAMI IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10 (1988), Nr. 4, S. 496–513
- [Thompson 1935] THOMPSON, William R.: On a criterion for the rejection of observations and the distributions of the ratio of the deviation to the sample standart deviation. In: *Annals of Mathematical Statics* 6 (1935), S. 214–219
- [Tian 2000] TIAN, H.: *Noise Analysis in CMOS Image Sensors*, Ph.D Thesis, Stanford University, CA, Dissertation, 2000
- [Tian, Hui u. a. 2001] TIAN, HUI ; FOWLER, BOYD ; EL GAMAL, ABBAS: Analysis of Temporal Noise in CMOS Photodiode Active Pixel Sensor. In: *IEEE Journal of solid-state Circuits* 36 (2001), Nr. 1, S. 42
- [Tietjen 1972] TIETJEN, Gary L. Moore Roger H.: Some Grubbs-type statistics for the detection of several outliers. In: *Technometrics* 14 (1972), S. 583–597
- [Tietjen, Gary L. Moore Roger H. und Beckman, R. J. 1973] TIETJEN, GARY L. MOORE ROGER H. ; BECKMAN, R. J.: Testing for a Single Outlier in Simple Linear Regression. In: *Technometrics* 15 (1973), S. 717–721

- [Torres-Méndez, L. A. u. a. 2000] TORRES-MÉNDEZ, L. A. ; RUIZ-SUÁREZ, J. C. ; OTHERS: Translation, Rotation and Scale-Invariant Object Recognition. In: *IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications And Reviews* 30 (2000), February, Nr. 1
- [Toth, Daniel und Aach, Til 2001] TOTH, DANIEL ; AACH, TIL: Improved minimum distance classification with Gaussian outlier detection for industrial inspection. In: *11th International Conference on Image Analysis and Processing Palermo, Italy* (2001)
- [Toth, Daniel u. a. 2000] TOTH, DANIEL ; AACH, TIL ; METZLER, VOLKER: Illumination Invariant Change Detection. In: *Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation 2000, Austin, Texas* (2000)
- [Toyama, K. und Wallflower 1999] TOYAMA, K. ; WALLFLOWER: Principles and practice of background maintenance. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision ICCV 1999*, 1999, S. 255–261
- [Trier, Oivind Due. u. a. 1996] TRIER, OIVIND DUE. ; JAIN, ANIL K. ; TAXT, TORFINN: Feature extraction methods for character recognition - a survey. In: *Pattern Recognition* 29 (1996), S. 641–662
- [Wallis 1976] WALLIS, R. H.: An approach to the space variant restoration and enhancement of images. In: *Proceedings of Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science 1976*, 1976, S. 329–340
- [Wang, Yuan-Fang und Alferez, Ronald-Bryan O. 1998] WANG, YUAN-FANG ; ALFEREZ, RONALD-BRYAN O.: A Unified Framework for Image-Derived Invariants. In: *The 3rd Asian Conference on Computer Vision, Hong Kong*, , 1998, S. 542–549
- [Weiss 1993] WEISS, Isaac: Geometric Invariants and Object Recognition. In: *International Journal of Computer Vision* 10 (1993), Nr. 3, S. 207–231
- [Wilks 1963] WILKS, S. S.: Multivariate Statistical Outliers. In: *Sankhya Serie A.* 25 (1963), S. 407–426
- [Winkler 1995] WINKLER, Gerhard: Image analysis, random fields and dynamic Monte Carlo methods: A Mathematical Introduction. In: *Applications of Mathematics* (1995), Nr. 27
- [Wong, Robert Y. und Hall, Ernest L. 1978] WONG, ROBERT Y. ; HALL, ERNEST L.: Scene matching with moment Invariants. In: *Computer Graphics and Image Processing* 8 (1978), S. 16–24
- [Wood 1996] WOOD, Jeffrey: Invariant pattern recognition: a review. In: *Pattern Recognition* 29 (1996), Nr. 1, S. 1–17
- [Yakimovsky 1976] YAKIMOVSKY, Yoram: Boundary and object detection and real world images. In: *Journal of the ACM Association for Computing Machinery* 23 (1976), Nr. 4, S. 599–618
- [Yang 1995] YANG, Luren: Fast computation of 3-D geometric moments using a discrete Gauss' theorem. In: *Computer Analysis of Image and Pattern* Bd. 970. Springer, 1995, S. 649–654
- [Yang, Luren und Albreghsten, Fritz 1994] YANG, LUREN ; ALBREGSTEN, FRITZ: Fast and exact computation of moments using discrete Green's theorem. In: *Proceedings of NOBIM*, , 1994, S. 82–90
- [Yang, Luren u. a. 1997] YANG, LUREN ; ALBREGTSEN, FRITZ ; TAXT, TORFINN: Fast computation of three dimensional geometric moments using a discrete divergence theorem and a generalization to higher dimensions. In: *GMIP Graphical Models and Image Processing* 59 (1997), Nr. 2, S. 97–109
- [Zakaria, M. F. u. a. 1987] ZAKARIA, M. F. ; VROOMEN, L. J. ; OTHERS: Fast algorithm for the computation of moment invariants. In: *Pattern Recognition* 20 (1987), Nr. 6, S. 639–643

- [Zernike 1934] ZERNIKE, Fritz: Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form, der Phasenkontrastmethode. In: *Physica* 1 (1934), S. 689–704
- [Zhang, H. u. a. 1993] ZHANG, H. ; KANKANHALLI, A. ; SMOLIAR S.W.: Automatic Partitioning of Full-motion Video. In: *Journal of Multimedia Systems* 1 (1993), Nr. 1, S. 10–28
- [Zhang, H. J. u. a. 1994] ZHANG, H. J. ; YOW, C. Y. ; OTHERS: Video Parsing Using Compressed Data. In: *Proceedings SPIE 1994 Symposium on Image and Video Processing, San José, California, 1994*, S. 142–149