

INAUGURAL-DISSERTATION  
zur  
Erlangung der Doktorwürde  
der  
Naturwissenschaftlich-Mathematischen  
Gesamtfakultät  
der Ruprechts-Karls-Universität  
Heidelberg

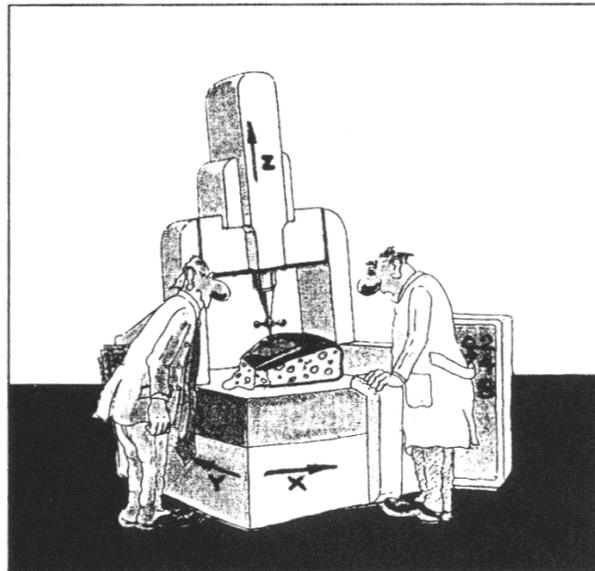
vorgelegt von  
Dipl.-Phys. Georg Wiora geb. Pfundt  
aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 25. April 2001



**Optische 3D-Messtechnik:**  
**Präzise Gestaltvermessung mit einem  
erweiterten Streifenprojektionsverfahren**

Gutachter: Prof. Dr. Bernd Jähne  
Prof. Dr. Karlheinz Meier



*"Boss, I have the feeling  
that we are exaggerating  
a bit, aren't we?"*

Schematische Darstellung einer mechanischen Koordinaten-Messmaschine

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Streifenprojektion mit zeitlich kodierten Beleuchtungsmustern hat sich nach ihrer Erfindung – trotz vorhandener Schwächen – schnell neben den, seit Jahrzehnten ausgereiften, mechanischen Koordinaten-Messmaschinen in der 3D-Messtechnik etabliert. Diese Arbeit stellt einen Beitrag zu ihrer Konsolidierung dar.

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit werden die Genauigkeitsgrenzen eines Streifenprojektionssystems mit einem neuen Ansatz theoretisch erfasst. Es wird ein Verfahren zur präzisen Bestimmung der systematischen, räumlich hochfrequenten Fehler eines Streifenprojektionssystems beschrieben. Durch die genaue Bestimmung der systematischen Fehler wird ihre Korrektur mit Hilfe einer Umkehrfunktion möglich.

Außerdem wird ein vereinfachtes radiometrisches Kalibrierverfahren vorgestellt, das mehr System-spezifische Phänomene als die herkömmlichen Methoden erfasst und dabei mit geringerem Aufwand umzusetzen ist.

Basierend auf erprobten numerischen Methoden der Photogrammetrie wird ein geometrisches Kalibrierverfahren für eine hoch genaue Systemkalibrierung spezifiziert, das mit einem einfachen Kalibrierkörper und ohne den Einsatz einer Präzision-Positioniermechanik auskommt.

Da die Robustheit jedes Messsystems eine wesentliche Komponente für seine Einsetzbarkeit ist, wird ein robuster Dekoder für kombinierte Gray-Kode/Phasenschiebe Systeme beschrieben, der auch mit schwierigen Objekt-Situationen zurecht kommt und für nicht dekodierte Punkte eine genaue Klassifizierung der Ausfall-Ursache angibt.

Schließlich werden eine Implementierung dieser Techniken im *Ganymed*-System und einige ausgewählte Anwendungen beschrieben.

## ABSTRACT

Fringe projection with spatially and temporally modulated light has quickly established beside the well known mechanical coordinate measurement machines – even though it has still weak points. This thesis is a contribution to it's consolidation.

With a new approach the precision limits are described theoretically. A method for the precise measurement of systematic and high frequent spatial errors of a fringe projection system is presented. With the exact knowledge of the systematic errors their correction using the inverse function is possible. Further a simplified radiometric camera calibration method is explained that handles more system specific phenomenas than conventional methods and is simpler in implementation.

Based on the well tested numerical methods of photogrammetry a new geometric high precision system calibration method is specified. It needs only a simple flat calibration body and does not require a precision mechanics for positioning.

Because robustness is evident for the practical use of a measurement system, a robust decoder for a combined Gray-code/phase-shift system is described that handles even complex object situations. An exact classification for measurement problems is provided.

Finally exemplary implementations of this techniques in the *Ganymed*-System and some selected applications are described.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Anforderungen . . . . .	2
1.3	Historie . . . . .	2
1.4	Stand der optischen 3D-Messtechnik . . . . .	3
1.5	Aufbau und Zielsetzung der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Genauigkeitsgrenzen</b>	<b>11</b>
2.1	Leuchtdichteerhaltung in Lichtquellen . . . . .	11
2.2	Statistische Grenzen der Messgenauigkeit . . . . .	14
2.3	Systematische Grenzen der Messgenauigkeit . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>23</b>
3.1	Radiometrische Kalibrierung . . . . .	23
3.2	Photogrammetrische Grundlagen . . . . .	31
3.3	Kamerakalibrierung . . . . .	39
3.4	Systemkalibrierung . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Streifenprojektion</b>	<b>51</b>
4.1	Zeitliche Modulationsverfahren . . . . .	51
4.2	Gray-Kode . . . . .	52
4.3	Phasenschieben . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Systembeschreibung und Anwendungen</b>	<b>77</b>
5.1	Das <i>Ganymed</i> 3D-Messsystem . . . . .	77
5.2	Ausgewählte Anwendungen . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Schluss</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>Danksagung</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Glossar</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Herleitungen</b>	<b>101</b>
B.1	Lineare Regression . . . . .	101
B.2	Beugungsbild des Einzelspaltes . . . . .	102

<b>C Technische Daten</b>	<b>105</b>
C.1 Der Kodak KAI1010M CCD-Sensors . . . . .	105
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>106</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>113</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Im Rahmen des *Reverse-Engineering Projekts* in der Abteilung für *Optische Messtechnik/Modelltechnik*<sup>1</sup> der *Daimler-Benz AG*<sup>2</sup> stand man 1994 vor der Aufgabe, ein optisches Messsystem zu entwickeln, das die Rückführung von realen Bauteilen in digitale Daten unter Werksbedingungen bei geringem apparativem Aufwand und mit hoher Genauigkeit ermöglicht.

Die Anforderungen an ein solches Messsystem aus Sicht der Fahrzeug-Herstellung bei DaimlerChrysler sind im Wesentlichen durch die dort üblichen Fertigungstoleranzen definiert. In vielen Bereichen, wie zum Beispiel der Umformtechnik, dem Metallgießen, der Herstellung von Kunststoffteilen und dem Zusammenbau, liegt die zulässige Toleranz bei 100  $\mu\text{m}$  oder darüber. Ein System, das für die produzierenden Bereiche interessant sein soll, darf diese Obergrenze mit seiner Messgenauigkeit nicht überschreiten.

Eine andere Randbedingung ist historisch begründet: Der überwiegende Teil der Messaufgaben wird in der Produktion und im Produktionsumfeld heute immer noch mit mechanischen Messgeräten, so genannten Koordinatenmessmaschinen (KMM), bewältigt. Diese Maschinen sind zwar sehr genau – je nach Ausführung bis zu 10  $\mu\text{m}$ – aber auch sehr unflexibel und langsam. Sie benötigen einen klimatisierten Messraum und ein solides Fundament für einen erschütterungsfreien Betrieb. Allein die Investitionen in die Gebäude- und Klimatechnik betragen üblicherweise mehrere Millionen Euro, die eigentliche Maschine schlägt nochmals mit dem gleichen Betrag zu Buche. Hinzu kommt noch die Logistik um die Messobjekte zum Messraum zu transportieren. Hier besteht ein erhebliches Einsparpotential an Zeit und Geld, wenn das Messsystem zum Messobjekt kommt, das sich beispielsweise in einer Fertigungsstraße befindet und nicht umgekehrt!

Weitere Möglichkeiten der Produktivitätssteigerung ergeben sich, wenn man die mechanischen Systeme nicht einfach durch optische Systeme nachahmt, sondern deren Vorteile nutzt. Gegenüber der punkweisen Antastung durch KMMn liefert ein flächenhaft arbeitendes optisches System eine fast vollständige Beschreibung der Objektoberfläche. Diese digitale Beschreibung kann in nachfolgenden Prozessen zum Beispiel für Einbau-Untersuchungen in der virtuellen Realität genutzt werden, lange bevor das reale Teil schließlich zur Verfügung steht.

---

<sup>1</sup>Heute *Messtechnik und Modelltechnik*

<sup>2</sup>Heute *DaimlerChrysler AG*

## 1.2 Anforderungen

Aus diesen Gegebenheiten lassen sich verkürzt folgende Anforderungen an ein optisches Messsystem ableiten:

- Mobilität
- Zuverlässigkeit
- einfache und robuste Vor-Ort-Kalibrierung
- großes Messvolumen
- Unabhängigkeit von Oberflächeneigenschaften
- absolute Genauigkeit, 100  $\mu\text{m}$  oder besser
- Robustheit gegen Umwelteinflüsse und Fehlbedienung
- Aufbau ohne mechanische Präzisionspositionierung
- niedrige Investitions- und Betriebskosten
- kurze Messzeiten

Natürlich sind nicht alle diese Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen, so ist im Allgemeinen die Genauigkeit umgekehrt proportional zum Messvolumen und bei nicht beliebig kurzen Messzeiten muss auch eine gewisse Konstanz der Umgebungsbedingungen gegeben sein. Dagegen lassen sich Anforderungen wie Mobilität und Robustheit weitgehend unabhängig voneinander erfüllen.

## 1.3 Historie

Nach einigen Studien an damals schon auf dem Markt befindlichen Systemen von ABW, Steinbichler, GOM mbH und Breuckmann, kam man zu dem Schluss, dass eine Eigenentwicklung unumgänglich war. In den folgenden Jahren wurde auf dem Prinzip der aktiven Triangulation mit kodierter Streifenprojektion, ein Messsystem entwickelt, das aus nur *einer* Kamera und einem kalibrierten Projektor bestand und ohne Präzisionsmechanik navigieren konnte (s. Abb. 1.1). Ein nicht geringer Teil der Entwicklungskapazität floss in die Bedienungs- und Auswertprogramme, um eine Benutzungsoberfläche zur Verfügung zu stellen, die eine einfache Bedienung bei gleichzeitig großer Flexibilität für die weitere Entwicklung der Abläufe ermöglichte. Allerdings war zur Kalibrierung des Systems noch eine zweite Kamera notwendig und die Messgenauigkeit war noch weit von der gewünschten Spezifikation entfernt.

Als ich im April 1997 mit dieser Arbeit begann, waren die vorrangigen Ziele, die Kalibrierung mit nur einer Kamera zu bewältigen und die Messgenauigkeit auf unter 0,1 mm zu verbessern. Auch die Robustheit unter produktionsnahen Bedingungen war noch nicht auf dem gewünschten Niveau.



**Abbildung 1.1:** Der *Ganymed* -Messkopf bestehend aus Kamera, Projektor und Ringlichtquelle. In a) ist der Prototyp aus dem Jahr 1997 dargestellt, b) zeigt den Sensor im Design-Gehäuse von 1999. Die Konstruktion des Gehäuses erlaubt die Konfiguration des Sensors für unterschiedliche Messvolumina und -abstände ohne Austausch von Gehäuseteilen oder Änderung der Verkabelung.

## 1.4 Stand der optischen 3D-Messtechnik

Damals waren verschiedene flächenhafte Messprinzipien auf dem Markt verfügbar ([Jiang und Bunke 1997](#)). Ihre Funktionsweisen und Grenzen sollen hier zusammenfassend dargestellt werden. Die Einteilung der Verfahren ist an [Schwarte u. a. \(1999\)](#) orientiert, die die Messverfahren in die drei Gruppen Flugzeitmessung, Interferometrie und Triangulation einteilen. Diese sollen im Folgenden näher erläutert werden.

### 1.4.1 Interferometrie

Bei der klassischen Interferometrie wird kohärentes Licht in zwei Teilwellen aufgespalten: einen Objektstrahl und einen Referenzstrahl. Beide Teilwellen werden dann in einem Detektor überlagert. Handelt es sich um einen zweidimensionalen Detektor, resultiert ein Interferogramm, das die Phasenverschiebung zwischen Objekt- und Referenzstrahl wiedergibt.

Führt man diese Messung mit mindestens drei verschiedenen Phasenpositionen des Referenzstrahls durch, kann die Phasenverschiebung zwischen Objekt- und Referenzstrahl nach dem *Phasenschiebungsverfahren* bestimmt werden ([Carré 1966](#); [Surrel 1996](#)). Mit dieser Technik ist eine eindeutige Abstandsmessung nur innerhalb eines Bereiches von einer Lichtwellenlänge  $\lambda$  möglich. Durch den Einsatz mehrerer Wellenlängen lässt sich der Eindeutigkeitsbereich auf die Schwebungswellenlänge vergrößern.

Die Genauigkeit dieser Verfahren liegt zwischen  $\lambda/100$  und  $\lambda/1000$ . Ihre große Empfindlichkeit erfordert allerdings einen extrem stabilen Aufbau der optischen Komponenten. Das wirkt sich nachteilig auf den Preis und die Robustheit entsprechender Geräte aus.

## 1.4.2 Flugzeitmessung

Eine Methode der absoluten Entfernungsmessung ist die Flugzeitmessung. Da sich ein Lichtpuls mit der Gruppengeschwindigkeit  $c$  ausbreitet, ist die vom Licht innerhalb der Zeit  $\tau$  zurückgelegte Strecke  $c\tau$ . Da das Licht die Strecke zwischen Sensor und Objekt zweimal zurücklegt, ist der Abstand  $s$  des Sensors vom Objekt folglich:

$$s = c\tau/2 . \quad (1.1)$$

Zur Bestimmung der Flugzeit werden verschiedene Modulationsverfahren eingesetzt. Eine Übersicht ist in Abb. 1.2 dargestellt.

### 1.4.2.1 Pulsmodulation

Das von der Theorie her einfachste Modulationsverfahren ist die Pulsmodulation. Dabei wird direkt die Laufzeit eines kurzen Lichtimpulses gemessen. Das Verfahren stellt sehr hohe Anforderungen an Verstärkerbandbreite und Zeitmessung und wird daher in der Optik noch nicht eingesetzt. In der Radartechnik ist es dagegen sehr verbreitet, da es die absoluten Distanzen mehrere Ziele in verschiedenen Abständen mit nur einem Sensor unterscheiden kann.

### 1.4.2.2 Pseudozufällige Modulation

Ein weiteres Modulationsverfahren verwendet ein pseudozufälliges Signal zur Modulation des Strahls. Die Auflösung ist dabei durch die Modulationsfrequenz, der Eindeutigkeitsbereich durch die Kodelänge gegeben. Das Verfahren erlaubt die Erkennung mehrerer Ziele bei einem großen Eindeutigkeitsbereich und einer hohen Auflösung (Klein 1993; Schwarte, Heinol, Xu, Li und Buxbaum 1997). Leider ist dieses Verfahren für optische Anwendungen noch nicht auf dem Markt erhältlich. Im Radar-Bereich wird es jedoch schon erfolgreich eingesetzt.

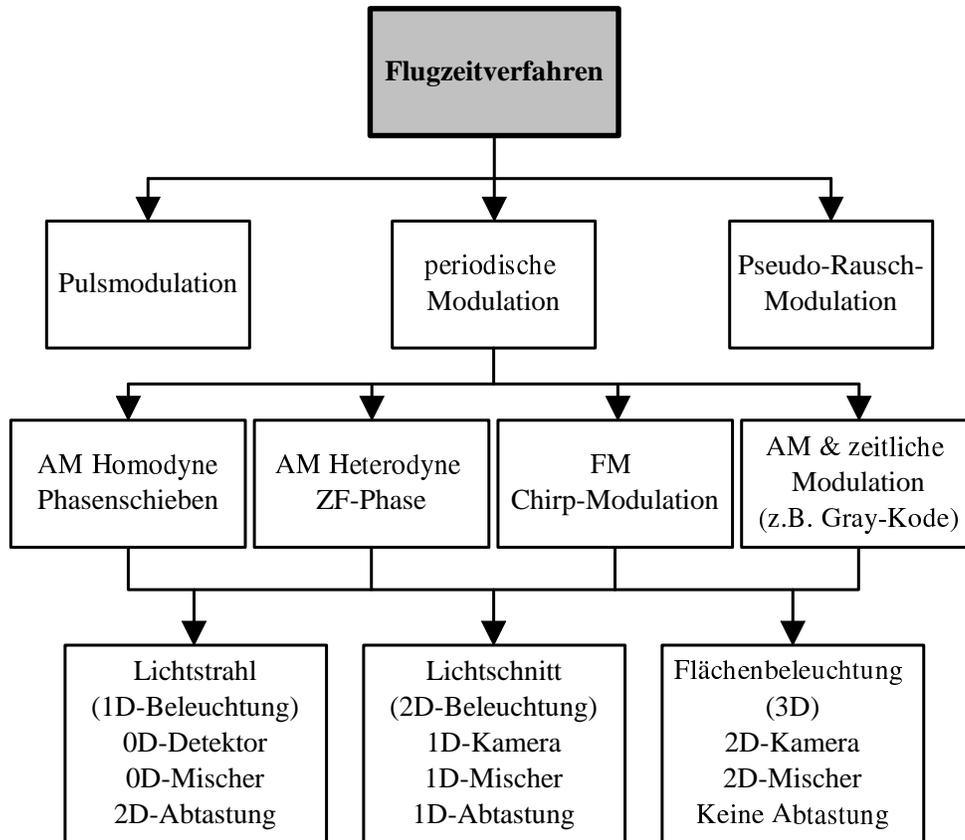
### 1.4.2.3 Periodische Modulation

Die im praktischen Einsatz am weitesten verbreiteten Verfahren verwenden einen amplituden- oder frequenzmodulierten Laser. Das vom Objekt reflektierte Licht wird mit dem Modulationssignal optisch oder elektrisch gemischt. Das Mischsignal enthält die Information über die Phasenverschiebung zwischen dem Modulationssignal und dem empfangenen Signal.

Die Zahl der möglichen Modulationsverfahren (s. Abb. 1.2) und ihre Kombinationsmöglichkeiten mit verschiedenen Abbildungsoptiken ist so groß, dass hier nur am Beispiel der Amplitudenmodulation die erreichbare Genauigkeit erläutert werden soll.

Bei der Amplitudenmodulation muss die Intensität des Mischsignals bei mindestens drei verschiedenen, bekannten Phasenlagen gemessen werden, da neben der gesuchten Phase auch die Amplitude und die Grundhelligkeit mitbestimmt werden müssen. Daher spricht man auch vom *Phasenschiebungsverfahren*. Die Phase lässt sich so auf eine Wellenlänge  $\lambda_m$  eindeutig zu bestimmen. Allerdings ist  $\lambda_m$  nicht mehr die Lichtwellenlänge  $\lambda$ , wie bei der Interferometrie, sondern die Modulationswellenlänge. Bei einer typischen Modulationsfrequenz  $\nu_m$  von rund 300 MHz (Luhmann 2000, Kap. 3.3.4.1) ist der Eindeutigkeitsbereich

$$l = \frac{c}{\nu_m} \quad (1.2)$$



**Abbildung 1.2:** Übersicht über die Verfahren der Flugzeitmessung nach (Schwarte, Heinol, Buxbaum, Ringbeck, Xu und Hartmann 1999).

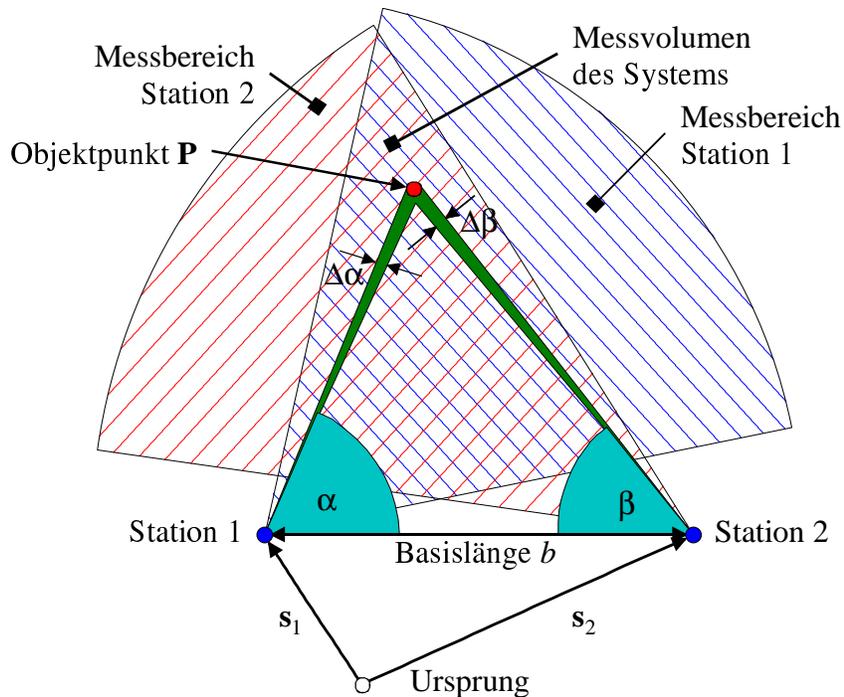
etwa 10 m lang. Die erreichbare Messgenauigkeit hängt sowohl von  $l$  als auch von der Genauigkeit der Phasenbestimmung ab. Typische Phasenschiebverfahren erreichen Genauigkeiten zwischen  $l/100$  und  $l/1000$ , je nach Anzahl der Phasenschiebestufen. Die mögliche Genauigkeit liegt somit typischerweise bei wenigen Millimetern. Mit höheren Modulationsfrequenzen lässt sich das zwar verbessern, aber nur zum Preis eines verkleinerten Messabstandes.

Erhöht man die Anzahl der Phasenschiebestufen, bzw. der Frequenzen beim Heterodyn-Verfahren, lässt sich die Genauigkeit auf Kosten der Messzeit erhöhen. Typische Abtastraten liegen bei etwa 2000 Punkten pro Sekunde.

### 1.4.3 Triangulation

Das Grundprinzip der Triangulation stammt aus der Geodäsie<sup>3</sup> und ist schon seit dem Altertum bekannt. Ein Objektpunkt wird, wie in Abb. 1.3 dargestellt, von zwei Standpunkten mit bekanntem Abstand angepeilt. Die Basislinie und die beiden Peilstrahlen bilden ein Dreieck, in dem alle Winkel und eine Seite bekannt sind. Die Position des dritten Eckpunktes kann damit relativ zu den beiden anderen Ecken berechnet werden. Die Triangulationsmethoden lassen sich in die

<sup>3</sup>Der Begriff Geodäsie stammt vom griechischen „ $\delta\alpha\epsilon\iota\nu$ “, das bedeutet „Teilen“ (Brockhaus 1990).



**Abbildung 1.3:** Das Grundprinzip der Triangulation im zweidimensionalen Fall: Von zwei verschiedenen Stationen an den Positionen  $s_1$  und  $s_2$  wird der zu bestimmende Objektpunkt  $P$  angepeilt. Dabei erhält man die beiden Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  mit der Genauigkeit  $\Delta\alpha$  und  $\Delta\beta$ . Unter Kenntnis der Basislänge  $b$  kann man dann die Koordinaten von  $P$  relativ zum Koordinatenursprung bestimmen. Der Messbereich des Gesamtsystems ist die Schnittmenge der Messbereiche der Einzel-Messsysteme.

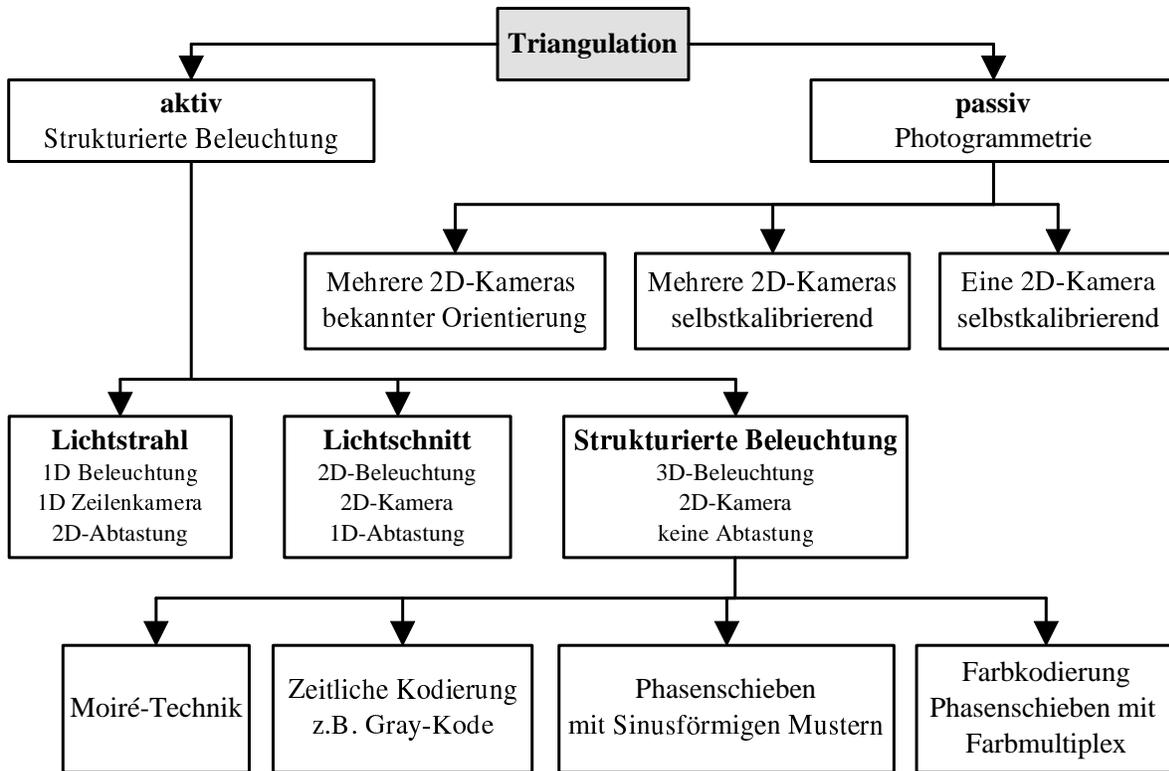
aktiven und passiven Verfahren unterteilen (s. Abb. 1.4).

### 1.4.3.1 Passive Triangulation

Bei den passiven Verfahren wird mindestens ein Sensor, in diesem Zusammenhang meist eine Kamera, mit einer *beliebigen Zahl unstrukturierter* Lichtquellen kombiniert. Das vom Objekt reflektierte Licht wird mit einer oder mehreren Kameras gleichzeitig oder sequentiell beobachtet.

Um die Koordinaten eines Objektpunktes bestimmen zu können, muss er in mindestens zwei Aufnahmen identifiziert werden (Abb. 1.5). Das kann durch die Korrelation vorhandener Objektmerkmale oder durch die automatische Identifizierung von künstlichen Markierungen erfolgen. Welche Methode angewandt wird, hängt in erster Linie von der Größe des Messobjektes und der gewünschten Genauigkeit ab. In der Satelliten- oder Luftbildphotogrammetrie, sowie bei der Gebäudevermessung werden in der Regel Objektmerkmale benutzt. Kommt es auf höchste Präzision im Nahbereich an, wird auf künstliche, meistens automatisch identifizierbare, Markierungen zurückgegriffen.

Die Anzahl der Kameras richtet sich in erster Linie nach der Veränderungs- und Bewegungsgeschwindigkeit der Messobjekte. Müssen dynamische Vorgänge dreidimensional erfasst werden, so ist der Einsatz mehrerer synchronisierter und geometrisch kalibrierter Kameras nahezu



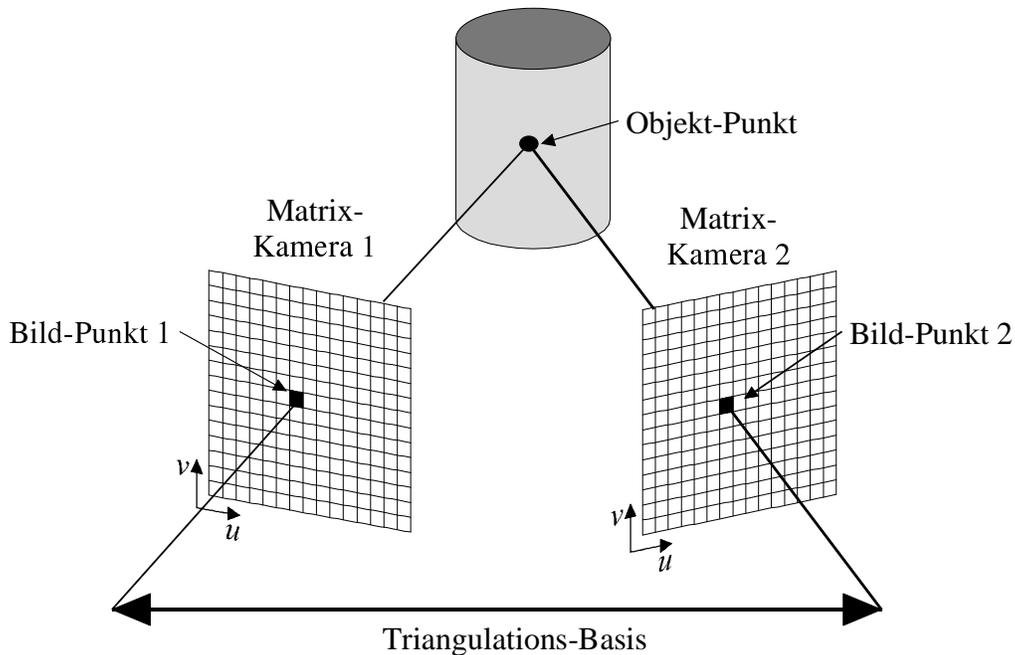
**Abbildung 1.4:** Übersicht über die verschiedenen Triangulationsverfahren nach (Schwarte, Heinol, Buxbaum, Ringbeck, Xu und Hartmann 1999).

unumgänglich. Nur einige wenige Auswerteverfahren können im Nah- oder Mikrobereich 3D-Information aus einer einzigen Perspektive gewinnen. Dazu gehören unter anderem die Shape-from-Shading (Klette, Kozera und Schlüns 1999) und Depth-from-Focus (Geißler und Scholz 1999), sowie die fokussuchenden Verfahren (Pfundt und Scheuermann 1996; Scheuermann 1997; Scheuermann, Wiora und Graf 1999). Sie benötigen allerdings zusätzliche Annahmen über Bildinhalt und Aufnahme-Konfiguration.

Das am weitesten verbreitete Verfahren für statische Aufgaben, die *digitale Nahbereichs-photogrammetrie* (Luhmann 2000) wird für Objekte bis zu Schiffs- oder Brückengröße eingesetzt und arbeitet mit nur einer Kamera und künstlicher Signalisierung. Der große Vorteil liegt in der Selbst- oder Simultankalibrierung. Die Kalibrierinformation der Kamera(s) wird aus den Messbildern selbst gewonnen. Bleibt die Kamera während der Messung stabil, kann davon ausgegangen werden, dass die Kalibrierinformation hinreichend genau aus den Daten gewonnen werden kann. Eine aufwendige Laborkalibrierung, deren Gültigkeit nach einem Transport der Kamera nicht mehr gewährleistet ist, kann somit entfallen.

### 1.4.3.2 Aktive Triangulation

Bei den aktiven Verfahren findet, im Gegensatz zur passiven Triangulation, *mindestens eine (strukturierte) Lichtquelle* Anwendung. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Lichtquellen



**Abbildung 1.5:** Zur Funktion der passiven Triangulation mit zwei Matrix-Kameras. In beiden Bildern werden die Bildkoordinaten  $(u, v)$  des gesuchten Objektpunktes  $P$  bestimmt. Mit den bekannten äußeren und inneren Orientierungen der Kameras werden dadurch zwei Geraden im Raum definiert, die sich im Idealfall im Objektpunkt schneiden.

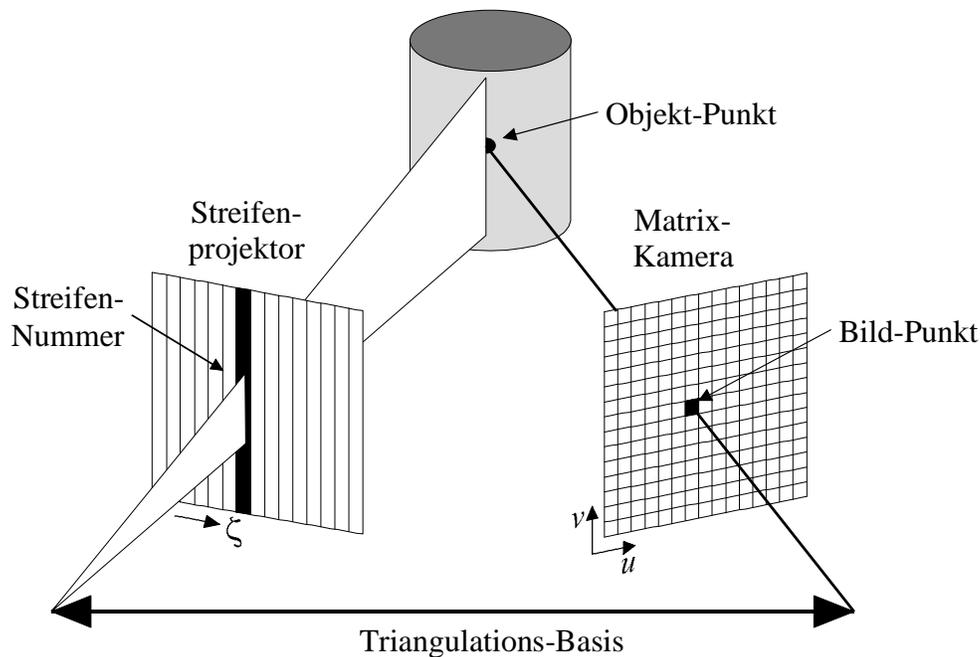
werden nun diskutiert.

### 1.4.3.3 Lichtstrahl

Eine Realisierungsform ist die 2D-Abtastung des Objektes mit einem Lichtpunkt und die Beobachtung mit einer Zeilenkamera mit Zylinderoptik. Geometrisch betrachtet definiert der Lichtstrahl eine Gerade und die Zeilenkamera eine Ebenenschar. Der Schnittpunkt ist eindeutig und ergibt den gesuchten Objektpunkt. Diese Methode kommt nur bei Hochgeschwindigkeitsmessungen von wenigen Punkten zum Einsatz, da eine vollständige Abtastung der Objektoberfläche durch dem Lichtstrahl mit großem zeitlichen und mechanischem Aufwand verbunden ist.

### 1.4.3.4 Lichtschnitt

Sehr verbreitet sind dagegen die so genannten Lichtschnitt-Sensoren. Dabei wird eine Lichtlinie auf das Objekt projiziert und mit einer Matrix-Kamera beobachtet. Die Objektpunkt-Koordinaten ergeben sich aus dem Schnitt der Lichtebene und den durch die beleuchteten Bildpunkte der Kamera definierten Sehstrahlen. Die maximale Anzahl von Messpunkten pro Messung ist durch die Zeilenzahl der Kamera gegeben und liegt zur Zeit zwischen 200 und 4000 Punkten. Lichtschnitt-Sensoren lassen sich sehr gut in Produktionsprozessen zur Überwachung von Produkten auf Förderbändern einsetzen, da sie hohe Datenraten liefern und keine mechanischen Komponenten benötigen. Zur Rundumvermessung von dreidimensionalen Körpern sind sie weniger



**Abbildung 1.6:** Bei der aktiven Triangulation wird der Projektor als inverse Kamera betrachtet. Die Nummer des Streifens ist seine *virtuelle* Bildkoordinate  $\zeta$ . Durch eine zeitliche Kodierung der Beleuchtung kann  $\zeta$  für den gesuchten Objekt-Punkt  $P$  aus einer Sequenz von Kamera-Bildern bestimmt werden. Mit den Kamera-Bild-Koordinaten  $(u, v)$  und den bekannten äußeren und inneren Orientierungen von Kamera und Projektor wird eine Gerade und eine Ebene im Raum definiert, die sich in  $P$  schneiden.

gut geeignet, da sie eine mechanische Präzisionsführung zur Erfassung von zusammenhängenden Flächen benötigen.

### 1.4.3.5 Strukturierte Beleuchtung

Bei der strukturierten Beleuchtung beobachten eine oder mehrere Matrix-Kameras ein räumlich und nach Bedarf auch zeitlich moduliertes Lichtfeld. Abbildung 1.6 zeigt einen Aufbau mit einer Kamera und einem Streifenprojektor. Zur Berechnung der 3D-Koordinate eines Objektpunktes müssen sowohl dessen Bildkoordinaten  $(u, v)$  im Kamerabild, als auch die Nummer des ihn beleuchtenden Streifens  $\zeta$  bekannt sein. Bei einfachen Szenen lässt sich  $\zeta$  durch Abzählen im Kamerabild ermitteln. Um auch komplexere Szenen auswerten zu können verwendet man eine zeitliche Modulation des projizierten Musters. Hierfür eignet sich zum Beispiel ein binärer Kode wie der Gray-Kode (Abschnitt 4.1). Mit seiner Hilfe kann für jeden Bild-Punkt der Kamera die zugehörige  $\zeta$ -Koordinate des Projektors bestimmt werden. Behandelt man den Projektor wie eine inverse Kamera und sind die äußeren und inneren Orientierungen von Kamera und Projektor bekannt, so werden durch das Koordinatentripel  $(u, v, \zeta)$  eine Ebene und eine Gerade definiert, die sich im gesuchten Objektpunkt  $P$  schneiden. Dieses Verfahren bezeichnet man in der Photogrammetrie als räumlichen *Vorwärtsschnitt* (Luhmann 2000, Kap. 4.4.2.2.3).

Bei einem Aufbau mit mehreren Kameras verwendet man die strukturierte Beleuchtung zur Lösung des Korrespondenz-Problems: Bildbereiche von verschiedenen Ansichten müssen dem

jeweiligen Objektpunkt eindeutig zugeordnet werden. In der Stereometrie wird das durch die so genannte Epipolargeometrie (Luhmann 2000, Kap. 4.2.4.2) gelöst. Dabei spannen die beiden Abbildungsstrahlen zusammen mit der Stereobasis eine Ebene auf, die den Objektpunkt enthält. Diese Ebene schneidet die Bildebenen der beiden Kameras jeweils in einer Geraden. Das Korrespondenz-Problem vereinfacht sich somit auf die Suche eines gemeinsamen Bildpunktes entlang einer Geraden in einem der beiden Bilder. Die entsprechenden Sehstrahlen der beteiligten Kameras können zur Ermittlung der Objektkoordinate miteinander geschnitten werden. Das Problem ist geometrisch überbestimmt, darum schneiden sich die beiden Strahlen im Allgemeinen nicht exakt.

## 1.5 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Der wissenschaftliche Teil dieser Arbeit erstreckt sich über die drei folgenden Kapitel. Im nächsten Kapitel werden zunächst die physikalisch bedingten Genauigkeitsgrenzen eines Streifenprojektionssystems abgesteckt und eine Formel zur Abschätzung der erreichbaren Messgenauigkeit hergeleitet. In Kapitel 3 wird die Kalibrierung des Systems, nach radiometrischem und geometrischem Anteil getrennt, beschrieben. Das neue radiometrische Kalibrierverfahren erlaubt eine umfassendere Korrektur von System-spezifischen Phänomenen und ist gleichzeitig in der Praxis einfacher umzusetzen.

Für die geometrische Kalibrierung werden zunächst die notwendigen photogrammetrischen Grundlagen erläutert. Anschließend folgt die Beschreibung der Kamera- und System-Kalibrierung, die sich durch große Robustheit und hohe Genauigkeit auszeichnet. Durch Einsatz eines virtuellen Kalibrierkörpers wird eine Präzisions-Kalibrierung auch außerhalb des Labors möglich.

Kapitel 4 gliedert sich in zwei Teile: Im ersten werden neue Methoden zur Erhöhung der Robustheit von Dekoder-Algorithmen für die Streifenprojektion vorgestellt. Im zweiten Teil wird eine Methode beschrieben, mit der der systematische Messfehler eines Streifenprojektionssystems hochauflösend gemessen und schließlich durch Anwendung einer Umkehrfunktion korrigiert werden können.

In Kapitel 5 werden schließlich die Implementierung der vorgestellten Verfahren im *Ganymed* System so wie einige ausgewählte Anwendungen beschrieben. Das letzte Kapitel beschließt die Arbeit mit einem Resümee.

Als Lese-Hilfe sind wichtige Begriffe im Text durch ein farbig unterlegtes Link gekennzeichnet. Folgt man dem Link gelangt man ins Glossar in Anh. A.

# Kapitel 2

## Genauigkeitsgrenzen

Es gibt in der Literatur verschiedene Ansätze zur Abschätzung der Grenzen von optischen Messsystemen nach dem Prinzip der aktiven Triangulation. Der wahrscheinlich bekannteste stammt von Häusler (1999), befasst sich aber leider nur mit den Einschränkungen Laser-gestützter Systeme, die hauptsächlich durch die große Kohärenzlänge des Laserlichts verursacht werden. Hier soll dagegen speziell auf die Begrenzungen von mit inkohärentem Weiß-Licht arbeitenden Systemen eingegangen werden.

Die 3D-Koordinate eines Messpunktes  $\mathbf{P}$  ist bei der aktiven Triangulation eine Funktion  $f$  seiner Bild-Koordinaten  $(u, v)$  in der Kamera, seiner virtuellen Projektor-Bildkoordinate  $\zeta$ , sowie der Kalibrierung  $C$ , die die Anordnung von Kamera und Projektor, sowie deren Abbildungs-Eigenschaften beschreibt:

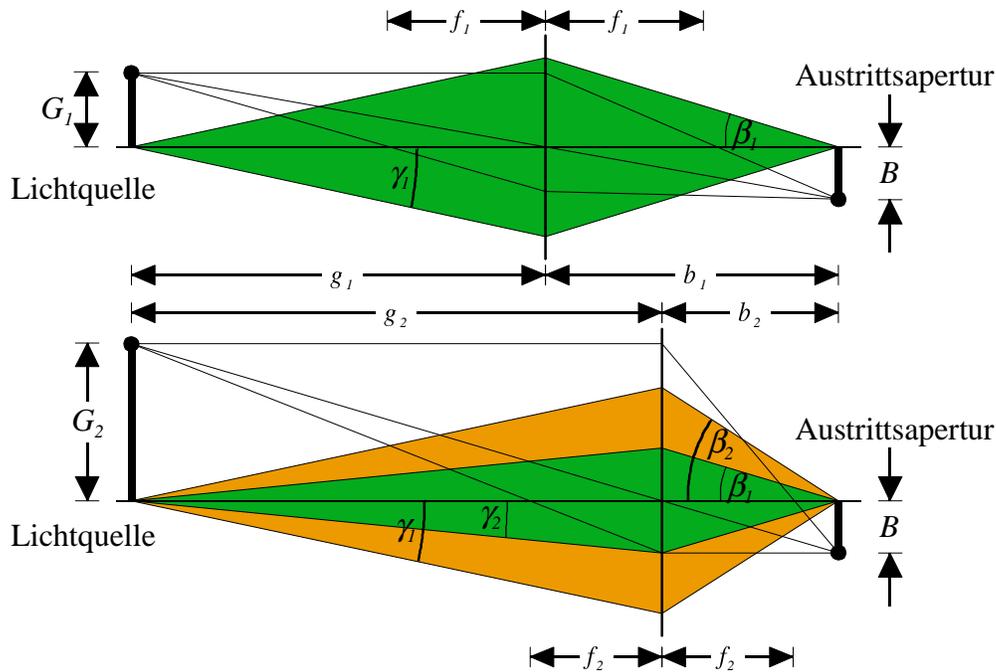
$$\mathbf{P} = f(u, v, \zeta, C) \quad (2.1)$$

Die Kalibrierung  $C$  ist eine Systemkonstante und trägt somit nur zum systematischen Fehler bei. Da  $u$  und  $v$  über das sehr gleichmäßige und zeitlich stabile Raster der Kamera bestimmt werden, dominieren bei ihnen die systematischen Beschränkungen durch die Ortsauflösung der Abbildungs-Optik und durch die räumliche Diskretisierung. Im Gegensatz dazu, wird  $\zeta$  aus Intensitäts-Messungen der Kamera berechnet und weist daher sowohl statistische als auch systematische Fehler auf.

Die statistischen Fehler bei einem aktiven Triangulationssystem rühren also von den Unsicherheiten der Intensitätsmessung her, die systematischen Begrenzungen dagegen von der Ortsauflösung von Projektor und Kamera. Die systematischen Effekte beschränken die Auflösung des Sensors, die statistischen die Messunsicherheit. Da die in einem Messsystem zur Verfügung stehende Lichtmenge wesentlich über seine Messunsicherheit entscheidet, folgt zunächst ein Exkurs über die Leistungsgrenzen einer Lichtquelle.

### 2.1 Leuchtdichteerhaltung in Lichtquellen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten den Lichtstrom einer inkohärenten Lichtquelle zu maximieren. Man kann die Energieflussdichte  $E$  und damit die Leuchtdichte  $L$  der Quelle erhöhen. Das geschieht bei thermischen Quellen durch Erhöhung der Temperatur. Der gesamte Energiefluss  $\Phi$  eines schwarzen Strahlers ist nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (Gerthsen u. a. 1989,



**Abbildung 2.1:** Die prinzipielle Beschränkung der Lichtleistung wird durch den Zusammenhang von Lichtquellenradius  $G$ , Abbildungsmaßstab  $B/G$  und den beiden Aperturwinkeln  $\beta$  und  $\gamma$  festgelegt. Oben ist die Abbildung einer Lichtquelle mit dem Radius  $G_1$  auf eine Aperturblende mit der Größe  $B$  dargestellt. Unten sind die beiden möglichen Varianten der verkleinerten Abbildung einer größeren Lichtquelle mit dem Radius  $G_2$  dargestellt. Entweder behält man die Eingangsapertur  $\gamma_1$  bei und nimmt dafür eine größere Ausgangsapertur  $\beta_2$  in Kauf oder man belässt die Ausgangsapertur  $\beta_1$  und verringert somit die Eingangsapertur auf  $\gamma_2$ .

Kap. 11.2.5) gegeben durch:

$$\Phi(T, A) = A \cdot \frac{4\pi^5}{15} \cdot \frac{k^4 T^4}{c^2 h^3} \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot T^4 \quad (2.2)$$

Dabei ist  $T$  die absolute Temperatur und  $A$  die Oberfläche der Quelle. Wie man sieht, ist das wegen  $\Phi \propto T^4$  eine sehr effektive Methode, die jedoch durch die Temperaturbeständigkeit der eingesetzten Materialien Grenzen gesetzt sind. Bei glühenden Festkörpern liegt diese unterhalb von 3680 K, das ist der Schmelzpunkt von Wolfram, bei Gasen zwischen 5600 K und 7000 K, das ist die Temperatur, die sich mit einem Lichtbogen erreichen lässt.

Die andere Möglichkeit ist, die Quelle zu vergrößern. Das bringt immerhin noch einen quadratischen Gewinn an Leistung, da die Oberfläche quadratisch zum Durchmesser der Quelle wächst. Leider greift an dieser Stelle die so genannte *Leuchtdichteerhaltung*, die laut [Bergmann, Schäfer und Niedrig \(1978\)](#) Kap. I.13 besagt:

*„Kein optisches Instrument kann die Helligkeit über die natürliche Helligkeit  $H_0$  steigern; die Leuchtdichte kann bei gleicher Brechzahl nicht erhöht werden.“*

Das verdeutlicht [Abbildung 2.1](#). Vergrößert man die Lichtquelle vom Radius  $G_1$  auf  $G_2$ , muss man einen anderen Abbildungsmaßstab wählen, um die ganze Quelle in die Austrittsapertur

zur abzubilden. Die Austrittsapertur ist entweder ein Lichtleiter oder die Aperturblende einer nachfolgenden Optik. Behält man die Eingangsapertur  $\gamma_1$  bei, nimmt man dafür eine größere Ausgangsapertur  $\beta_2$  in Kauf. Der maximal nutzbare Aperturwinkel ist jedoch durch die nachfolgende Optik festgelegt und lässt sich nicht beliebig vergrößern. Alternativ kann man die Austrittsapertur auf  $\beta_1$  belassen. Man verringert dadurch aber die Eintrittsapertur auf  $\gamma_2$  und erfasst somit nur noch einen kleineren Raumwinkel, wodurch der Nutzen der größeren Quelle wieder zunichte gemacht wird. In der Summe führen diese Effekte zur oben genannten Leuchtdichteerhaltung.

Mit dieser Information lässt sich nun eine obere Grenze für die Lichtleistung einer Lichtquelle angeben. Die Leuchtdichte  $L$  einer kugelförmigen Lichtquelle mit Radius  $r$  ist nach (2.2):

$$E = \frac{\Phi(T, 4\pi r^2)}{4\pi \cdot 4\pi r^2} \cdot 1 \text{ sr} = \frac{\pi^4}{15} \cdot \frac{k^4 T^4}{c^2 h^3} \quad (2.3)$$

Die Leuchtdichte hängt also nur von der Temperatur ab.

Um die maximale Leistung zu berechnen, die man an der Austrittsapertur der Lichtquelle auskoppeln kann, nimmt man eine kugelförmige Lichtquelle mit Radius  $G$  und der Oberfläche  $A = 4\pi G^2$  an. Deren Gesamtfluss ist somit:

$$\Phi_{\text{tot}} = A \cdot E = 4\pi G^2 \cdot E \quad (2.4)$$

Dieser Fluss wird über einen Raumwinkel von  $\Omega = 4\pi \text{ sr}$  abgestrahlt. Die Strahlungsstärke  $I$ , also der Energiefluss pro Raumwinkel, ist somit:

$$I = \frac{A \cdot E}{\Omega} = G^2 \cdot E \quad (2.5)$$

Für die weitere Berechnung genügt die Vorstellung, dass diese Strahlungsstärke von einer Punkt-förmigen Lichtquelle ausgeht. Der Anteil der Strahlung, der von der Apertur der Optik mit dem Aperturwinkel  $\gamma$  aufgenommen wird, ergibt sich durch Integration von (2.5) über den entsprechenden Raumwinkel. Für eine kreisförmige Apertur ist das:

$$\Phi_{\text{app}} = \int I d\Omega = I \int_0^\gamma \int_0^{2\pi} 1 d\theta d\varphi = 2\pi \cdot \gamma \cdot I \quad (2.6)$$

Jetzt muss man nur noch berücksichtigen, welcher spektrale Anteil  $p_{\text{vis}}(T)$  des Lichts im nutzbaren Bereich liegt und welchen Absorptionsgrad  $p_{\text{abs}}$  der leuchtende Schwarzkörper hat. Damit ist der gesamte Fluss, der am Ausgang des Systems zur Verfügung steht gegeben durch:

$$\Phi_{\text{tot}} = p_{\text{vis}}(T) \cdot p_{\text{abs}} \cdot \Phi_{\text{app}} = 2\pi \gamma \cdot p_{\text{vis}}(T) \cdot p_{\text{abs}} \cdot G^2 \cdot E \quad (2.7)$$

Dieser Ausdruck scheint die Erhöhung der Ausgangsleistung durch eine Vergrößerung des Lichtquellenradius  $G$  zuzulassen. Dabei muss man aber berücksichtigen, dass der maximale Wert von  $G$  durch den Durchmesser der Austrittsapertur  $B$  gegeben ist.

Der Fluss soll nun exemplarisch für eine Halogen-Lampe und eine Xenon Bogenlampe (XBO) berechnet werden. Dabei fließen folgende Größen in die Berechnung ein:

	Halogen-Lampe	Xenon-Bogenlampe
$T$	3400 K	5800 K
$p_{\text{vis}}$	0,191	0,467

Der Absorptionsfaktor ist für beide Quellen etwa  $p_{\text{abs}} = 0,45$ . Der Aperturgrenzwinkel und das maximale  $G$  sind durch die Eigenschaften des angeschlossenen Lichtleiters definiert: Somit ist  $\gamma = 35^\circ$  und der Radius  $r = 3\text{mm}$  (Schott Glas, Bereich Faseroptik 1999). Daraus ergeben sich ein  $\Phi_{\text{tot}}$  von 110 Watt für eine Halogen-Lampe und eines von 930 Watt für eine Bogenlampe. Diese Grenzen werden in der technischen Realisierung noch lange nicht erreicht. Für Halogen-Lampen liegt sie derzeit bei etwa 20 Watt, für XBO-Lampen bei etwa 120 Watt. Es ist auch zu bedenken, dass die eingesetzte Primärleistung etwa das Zehnfache der Ausgangsleistung beträgt!

## 2.2 Statistische Grenzen der Messgenauigkeit

Die Grenze der Messunsicherheit ist durch die Lichtmenge festgelegt, die am Sensor ankommt. Wegen der in diesem Falle hervortretenden Quantennatur des Lichts liefert dieser Messprozess Poisson verteilte Ergebnisse. Der relative Messfehler  $\sigma$  der Intensität ist somit gegeben durch:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.8)$$

Wobei  $N$  die Anzahl der registrierten Photonen ist. Es ist daher wünschenswert, eine möglichst große Anzahl Photonen mit dem Detektor zu registrieren. Um das zu erreichen, kann man sowohl die Integrationszeit, als auch die Beleuchtungsintensität erhöhen. Um die physikalischen Grenzen zu bestimmen, ist es notwendig zu wissen wie viel Licht bei einem typischen Messsystem noch auf dem Detektor ankommt. Alle kameraspezifischen Angaben für diese Berechnung wurden dem Datenblatt des KAI1010-CCD-Sensors (Eastman Kodak Company 1999) entnommen.

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, liefern die stärksten Lichtquellen im sichtbaren Spektrum einen maximalen permanenten Energiefluss  $\Phi_{\text{max}}$  von etwa 120 Watt. Das entspricht einer Photonenrate von:

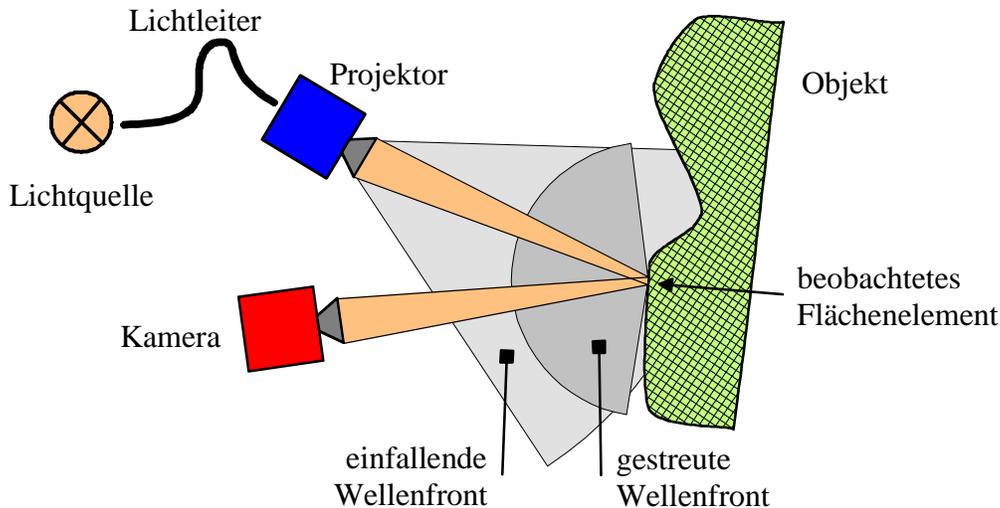
$$\nu = \frac{\lambda \cdot \Phi_{\text{max}}}{hc} \approx 3,32 \cdot 10^{20} \text{s}^{-1}. \quad (2.9)$$

Die vom Messsystem beleuchtete Fläche  $A$  beträgt üblicherweise etwa  $0,25\text{m}^2$ . Die Energiedichte  $E_O$  beträgt somit auf der Objektoberfläche:

$$E_O = \frac{\Phi_{\text{max}}}{A}. \quad (2.10)$$

Die Projektionsfläche  $A_p$  eines Kamerabildelements auf dem Objekt beträgt bei einem  $1000 \times 1000$  Bildpunkte großen Sensor etwa  $0,25\text{mm}^2$ . Von dieser Fläche wird der einfallende Strahlungsfluss im Idealfall diffus gestreut. Der Energiefluss  $\Phi_O$ , der von dieser Fläche ausgeht ist:

$$\Phi_O = A_p \cdot E_O = \frac{A_p}{A} \cdot \Phi_{\text{max}} \quad (2.11)$$



**Abbildung 2.2:** Auf dem Weg von der Lichtquelle bis zum CCD-Sensor der Kamera geht der größte Teil des Lichts durch Absorption, Beugung, Streuung oder durch geometrische Effekte verloren.

Für die Berechnung des Raumwinkels, unter dem die Fläche in die Kamera abgebildet wird, benötigt man den effektiven Durchmesser der Eintrittspupille der Kamera  $D$ :

$$D = \frac{f}{k} \quad (2.12)$$

Mit der Brennweite  $f$  und der Blendenzahl  $k$ . Aus dem Abstand  $l$  zwischen Objekt und Kamera kann man den Raumwinkel, unter dem das Flächenelement die Kamerapupille sieht, berechnen:

$$\Omega = \pi \cdot \left(\frac{D}{2l}\right)^2 \cdot 1 \text{ sr} = \pi \cdot \left(\frac{f}{2kl}\right)^2 \cdot 1 \text{ sr} \quad (2.13)$$

Handelt es sich bei der Objektoberfläche um einen Lambert'schen Strahler, so ist der Energiefluss pro Raumwinkel in alle Richtungen gleich groß. Der Energiefluss  $\Phi_p$ , der in die Kamerapupille eintritt und auf das Bildelement projiziert wird, ergibt sich als Verhältnis aus  $\Omega$  und dem Halbraumwinkel  $2\pi$  sr, in den das Oberflächenelement abstrahlt:

$$\Phi_p = \Phi_O \cdot \frac{\Omega}{2\pi \text{ sr}} = \frac{\Phi_O}{2} \cdot \left(\frac{f}{2kl}\right)^2 = \frac{\Phi_{\max}}{2} \cdot \frac{A_p}{A} \cdot \left(\frac{f}{2kl}\right)^2 \quad (2.14)$$

Zusätzlich muss man noch die Transmissionsverluste im Signalpfad berücksichtigen. Das Licht aus der Lichtquelle wird üblicherweise durch einen Lichtleiter zum Projektor geführt. Die Transmission des Lichtleiters beträgt etwa  $d_L = 0,3$ . Im Projektor wird ein weiterer Teil des Lichts durch die Projektionsapertur ausgeblendet. Diesen Faktor kann man mit  $d_P = 0,3$  ansetzen. Das Objekt streut das Licht nicht verlustfrei, sondern absorbiert einen Teil davon. Bei einer kooperativen<sup>1</sup> grauen Oberfläche beträgt der Reflexionsgrad etwa  $d_O = 0,5$ . Weiterhin ist nicht die ganze Fläche eines Bildpunktes der Kamera lichtempfindlich, sondern nur der vom

<sup>1</sup>z.B. ein Lambert'scher Strahler

so genannten Füllfaktor festgelegte Bruchteil  $d_F = 0,55$ . Schließlich hat das lichtempfindliche Element der Kamera nur eine gewisse Quantenausbeute, die bei Kameras mit elektronischem Verschluss bei etwa  $q = 0,3$  liegt. Daraus ergibt sich nun der totale Energiefluss, der vom Lichtempfindlichen Element registriert wird:

$$\Phi_t = \Phi_p \cdot d_L \cdot d_P \cdot d_O \cdot d_F \cdot q = 0,007425 \cdot \Phi_p \quad (2.15)$$

Analog zu (2.9) kann man auch hier die Anzahl der Elektronen pro Zeiteinheit  $\nu_e$ , die vom Detektor durch Strahlungsumwandlung erzeugt werden, berechnen:

$$\nu_e = \Phi_t \cdot \frac{\lambda}{hc} \quad (2.16)$$

Mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , sowie der Wellenlänge  $\lambda$ . Für eine mittlere Wellenlänge von 550 nm ergibt sich damit eine Elektronenrate von:

$$\nu_e \approx 2,892 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \quad (2.17)$$

Aus dieser Rate und der Kapazität eines Bildpunktes von  $C_{\max} \approx 13700$  Elektronen (Englisch: *full well capacity*) (Eastman Kodak Company 1999) ergibt sich dann die maximale Belichtungszeit:

$$t_{\max} = \frac{C_{\max}}{\nu_e} \approx 4,7 \text{ ms} \quad (2.18)$$

Das Poisson-Rauschen hat somit nach (2.8) eine Größe von mindestens

$$\sigma_p = \frac{1}{\sqrt{C_{\max}}} \approx 0,86\% . \quad (2.19)$$

Möchte man  $\sigma_p \leq 1\%$  beschränken, so liegt die minimale Belichtungszeit bei den angenommenen Beleuchtungsbedingungen bei:

$$t_{\min} = \frac{1}{\sigma_p^2 \cdot \nu_e} \approx 3,5 \text{ ms} \quad (2.20)$$

Diese Zeiten gelten für kooperative Oberflächen, wie grauem Karton und können sich um viele Größenordnungen verlängern, wenn das Objekt einen geringeren Reflexionsgrad oder eine andere Streucharakteristik aufweist.

Damit ist die untere Grenze für die Messzeit definiert. Mit einer zeitlich modulierten Beleuchtung, die eine Periodenlänge etwa 12 Bildern aufweist, liegt die reine Integrationszeit bei mindestens 42 ms. Dadurch wird der Einsatz dieser Messtechnik auf ruhende Objekte beschränkt.

Der Messfehler der Kamera und die Messzeit lassen sich nur verringern, indem man die Kapazität der Bildpunkte  $C_{\max}$  vergrößert. Dafür gibt es bei CCD-Kameras zwei Möglichkeiten: Entweder die aktive Fläche der Bildelemente zu vergrößern oder das Potential, das die Elektronen speichert, tiefer zu machen. Die Erste Variante führt zu größeren Sensoren, was die benötigte Optik aufwändiger macht und die Schärfentiefe für Nahbereichsanwendungen reduziert. Die Zweite verringert die Quantenausbeute, da nur noch kurzweilige Photonen genügend Energie besitzen, um ein Elektron über diese Potenzialbarriere zu heben.

## 2.3 Systematische Grenzen der Messgenauigkeit

Die systematischen Grenzen des Verfahrens werden sowohl durch die optische Auflösung von Kamera und Projektor als auch durch die räumliche Diskretisierung von Kamera und Projektor festgelegt.

### 2.3.1 Kamera

Die optische Auflösung der Kamera ist durch die Bildpunkt-Größe und die Beugung begrenzt. Im Idealfall sollten beide gleich groß sein. Die Abbildungsoptik muss daher auf die Bildpunkt-Größe abgestimmt sein. Nach [Naumann und Schröder \(1987, Kap. 1\)](#) ist die Auflösungsgrenze im Bildraum  $\delta_{\min}$  gegeben durch:

$$\delta_{\min} = 2,44 \cdot k \cdot \lambda \quad (2.21)$$

mit der Blendenzahl  $k$  und der Wellenlänge  $\lambda$ . Diese Formel ist für inkohärentes Weiß-Licht nur begrenzt gültig, reicht aber zur Abschätzung aus. Der Durchmesser des Bildes, das sich bei der Abbildung eines unendlich entfernten leuchtenden Punktes auf dem Sensor ergibt, ist  $\delta_{\min}$ . Dieses Bild sollte nicht wesentlich größer sein als die lichtempfindlichen Elemente des CCD-Sensors. Bei einer gegebenen Diagonale  $d$  der Bildelemente ist die größte Blendenzahl  $k_{\max}$  gegeben durch:

$$k_{\max} = \frac{d}{2,44 \cdot \lambda} \quad (2.22)$$

Bei einer mittleren Wellenlänge von  $\lambda = 550nm$  und einer Kantenlänge der Bildelemente von  $9\mu m$  ist  $d \approx 12,73\mu m$ . Daraus resultiert eine maximale Blendenzahl von  $k_{\max} \approx 9,5$ , die ein optimales Verhältnis von Schärfentiefe zu lateraler Bildschärfe ermöglicht. Die Auflösungsgrenze im Objektraum ergibt sich, wenn man das Beugungsscheibchen, respektive das Bildelement, auf das Objekt projiziert.

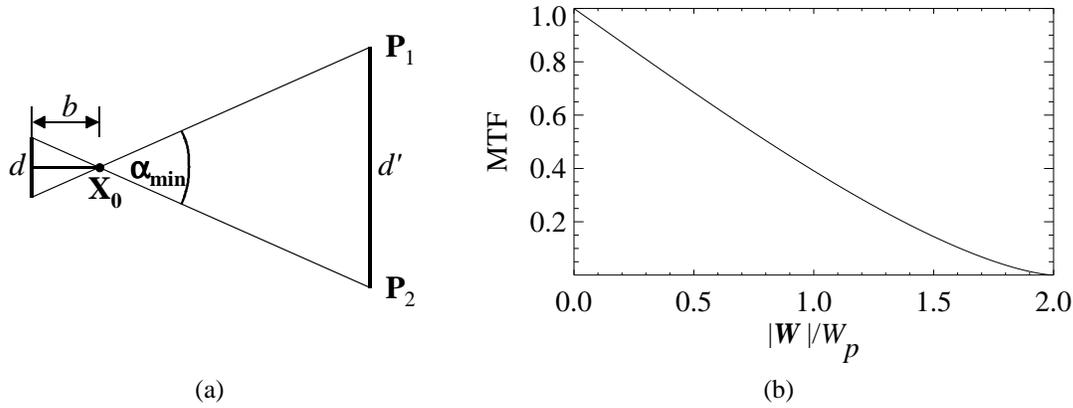
Eine von Abbildungsmaßstab unabhängige Größe für die Auflösung ist der Sehwinkel  $\alpha_{\min}^{(k)}$  zwischen zwei gerade noch unterscheidbaren Objektpunkten  $P_1$  und  $P_2$  (Abb. 2.3(a)):

$$\alpha_{\min}^{(k)} = \sin^{-1} \frac{d}{2b} \quad (2.23)$$

Dabei ist  $b$  die Bildweite. Dieser Ausdruck ist nur für die Bildmitte gültig.

### 2.3.2 Projektor

Die Auflösungsgrenze des Projektors muss grundsätzlich anders bestimmt werden als die einer Kamera. Sie ist auch vom verwendeten Streifenmuster und der zeitlichen Kodierung der Streifennummer abhängig. Es genügt aber hier, den *Binärkode* und das *Phasenschieben* zu betrachten. Bei beiden ist die Auflösungsgrenze davon abhängig, wie viele Graustufen die Kamera unterscheiden kann. Für diese Betrachtung geht man davon aus, dass das räumlich modulierte Helligkeitssignal des Streifenmusters den gesamten Empfindlichkeitsbereich der Kamera ausnutzt. Damit kann man die Grauwert-Empfindlichkeit der Kamera in Bruchteilen der



**Abbildung 2.3:** a) Definition der Winkel-Auflösung von Kamera und Projektor. b) Die Modulationstransferfunktion eines Photoobjektives über der reduzierten Wellenzahl  $\tilde{W}$  aufgetragen. Die Grenzfrequenz beträgt  $2W_p$ .  $W_p$  ist die kohärente Grenzfrequenz des Objektivs.

Signalmodulation angeben. Die Empfindlichkeit der Kamera wird je nach Gesamtzahl der Photonen pro Bildpunkt und Aufnahme entweder von der Anzahl der Quantisierungsstufen  $n_q$  oder vom Poisson-Rauschen dominiert. Für die in (Eastman Kodak Company 1999) beschriebene Kamera überwiegt das Poissonrauschen. Die kleinste Modulation, die von der Kamera noch unterschieden werden kann, ist daher:

$$m_{\min} = \frac{1}{n_q} \quad (2.24)$$

### 2.3.2.1 Binärkode

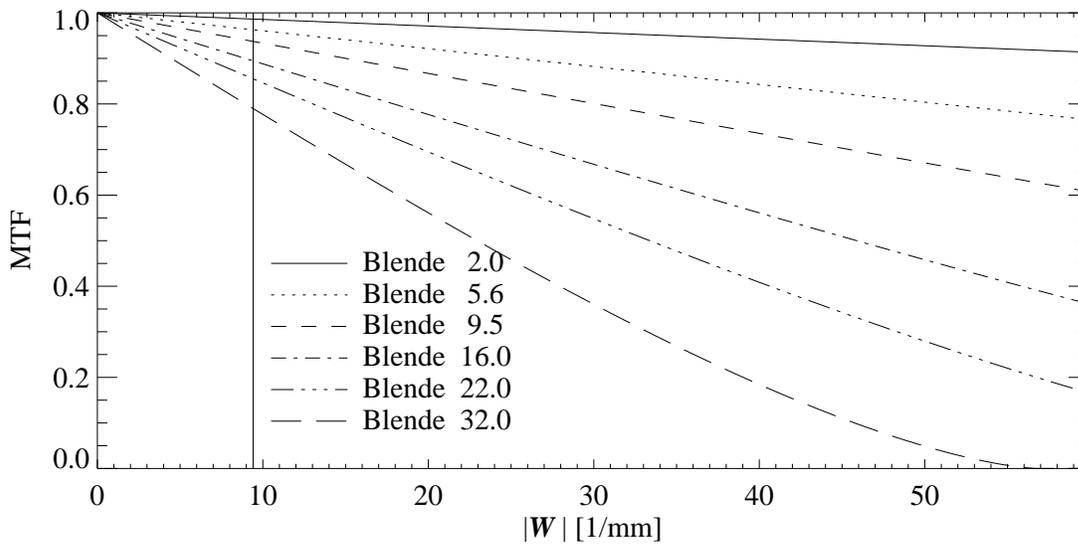
Für einen Binärkode erhält man eine Abschätzung für die Auflösungsgrenze, wenn man das feinste Streifenmuster projiziert, dessen Modulation noch über  $m_{\min}$  liegt. Die genaue räumliche Modulationsform der Streifen, ob binär oder Sinus-förmig, spielt in dem betrachteten Grenzfall keine Rolle, da hauptsächlich die Sinus-förmige Grundwelle übertragen wird. Eventuell vorhandene Oberwellen werden stark gedämpft. Die Größe der Kamera-Bildpunkte soll für diese Betrachtung keine Rolle spielen. Zur geometrischen Anordnung sei nochmals auf Abb. 1.3 verwiesen.

Die Auflösungsgrenze lässt sich mit Hilfe der Modulationstransferfunktion (MTF) berechnen. Für inkohärentes Licht lautet die MTF eines Photoobjektives (Paul 1999):

$$\text{MTF}(\tilde{W}) = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ 2 \cos^{-1} \left( \frac{\tilde{W}}{2} \right) - \tilde{W} \cdot \sqrt{1 - \frac{\tilde{W}^2}{4}} \right\} \quad (2.25)$$

Ihr Verlauf ist in Abb. 2.3(b) dargestellt. Die reduzierte Koordinate  $\tilde{W}$  ist der Betrag des reduzierten Wellenzahl-Vektors:

$$\tilde{W} = \frac{|\mathbf{W}|}{W_p} \quad (2.26)$$



**Abbildung 2.4:** Die inkohärente Modulationstransferfunktion (MTF) des Projektors für verschiedene Blendenzahlen und eine Abbildung ins Unendliche mit  $g = f$ . Bei einer Raumfrequenz des Dias von  $|W| \approx 9,4$  Perioden pro Millimeter beträgt der Modulationsverlust bei Blende 5,6 lediglich 3,7%.

Die kohärente Grenzfrequenz der Übertragungsfunktion ist  $W_p$ :

$$W_P = \frac{2A}{\lambda} = \frac{2 \cdot n}{\lambda \cdot \sqrt{4k^2 + 1}} \quad (2.27)$$

Hierbei ist  $A$  die numerische Apertur des Objektivs,  $n$  die Brechzahl im Objekt- und Bildraum,  $k$  die Blendenzahl und  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts. Abbildung 2.4 zeigt den Verlauf der MTF eines Photoobjektivs für verschiedene Blendenzahlen über dem Betrag des Ortsfrequenzvektors  $W$  des Gitters.

Die maximale Raumfrequenz  $W_{\max}$  des Projektors, die die Kamera Intensitäts-mäßig noch auflösen kann, ergibt sich, wenn die Modulation auf den Wert  $m_{\min}$  abgesunken ist:

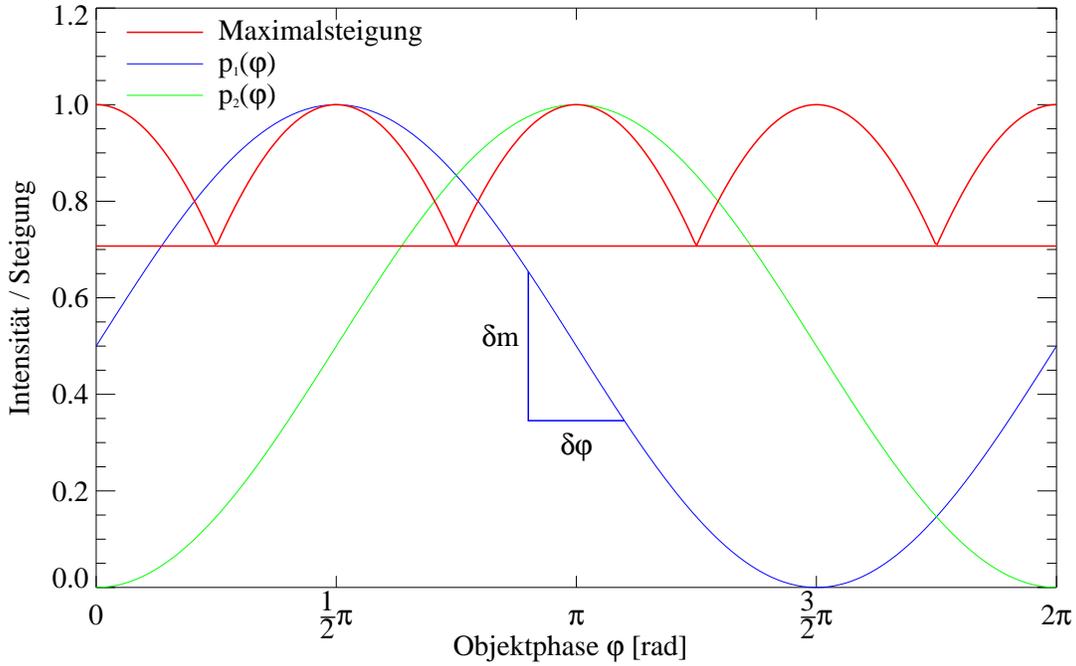
$$\text{MTF}(W_{\max}) \stackrel{!}{=} m_{\min} \quad (2.28)$$

Für diese Gleichung existiert leider keine geschlossene Lösung. Aus  $W_{\max}$  und der Brennweite  $f$  lässt sich die Winkel-Auflösung  $\alpha_{\min}^{(p)}$  des Projektors in der Bildmitte für eine Abbildung ins Unendliche bestimmen:

$$\alpha_{\min}^{(p)} = 2 \cdot \tan^{-1} \frac{1}{2 \cdot f \cdot W_{\max}} \quad (2.29)$$

### 2.3.2.2 Phasenschieben

Um die Auflösungsgrenze des Phasenschiebeverfahrens zu bestimmen, muss man sich zunächst klar machen, wie die Grauwert-Auflösung  $m_{\min}$  der Kamera in das Phasenschiebeverfahren ein- geht. Es gibt zwar viele Variationen des Phasenschiebeverfahrens, aber da sich daraus kein prin- zipieller Unterschied für die folgenden Berechnungen ergibt, soll der einfache Fall betrachtet



**Abbildung 2.5:** Zum Prinzip der Berechnung der Phasenschieberauflösung in Abhängigkeit von der Kamera-Sensitivität.

werden, in dem vier Sinus-förmig modulierte Streifenmuster mit jeweils  $90^\circ$  Phasenverschiebung projiziert werden. Abbildung 2.5 zeigt den Intensitätsverlauf der ersten zwei Muster. Die Gleichung für die Intensitäten  $p_i(x)$  lautet:

$$p_i(x) = O + M \cdot \sin \left( \left( 2Wx + \frac{i-1}{2} \right) \cdot \pi \right) \cdot \text{MTF} \left( \frac{W}{W_p} \right) \quad \text{für } i \in [1..4] \quad (2.30)$$

Mit dem Offset  $O$ , der Amplitude  $M$  und der Wellenzahl  $W$ . Die Amplitude reduziert sich um einen Faktor, der durch die MTF definiert ist. Es ist nun die Strecke  $\delta\phi = 2\pi W \cdot \delta x$  gesucht, für die sich wenigstens eine der  $p_i$  um mindestens  $\delta m = m_{\min}$  ändert. Zur Vereinfachung rechnet man nicht mit der Maximal-Steigung, die durch

$$p'(x) = \begin{cases} |p'_1(x)| & \text{für } |p'_1(x)| > |p'_2(x)| \\ |p'_2(x)| & \text{für } |p'_2(x)| > |p'_1(x)| \end{cases} \quad (2.31)$$

definiert ist, sondern mit ihrem Minimum:

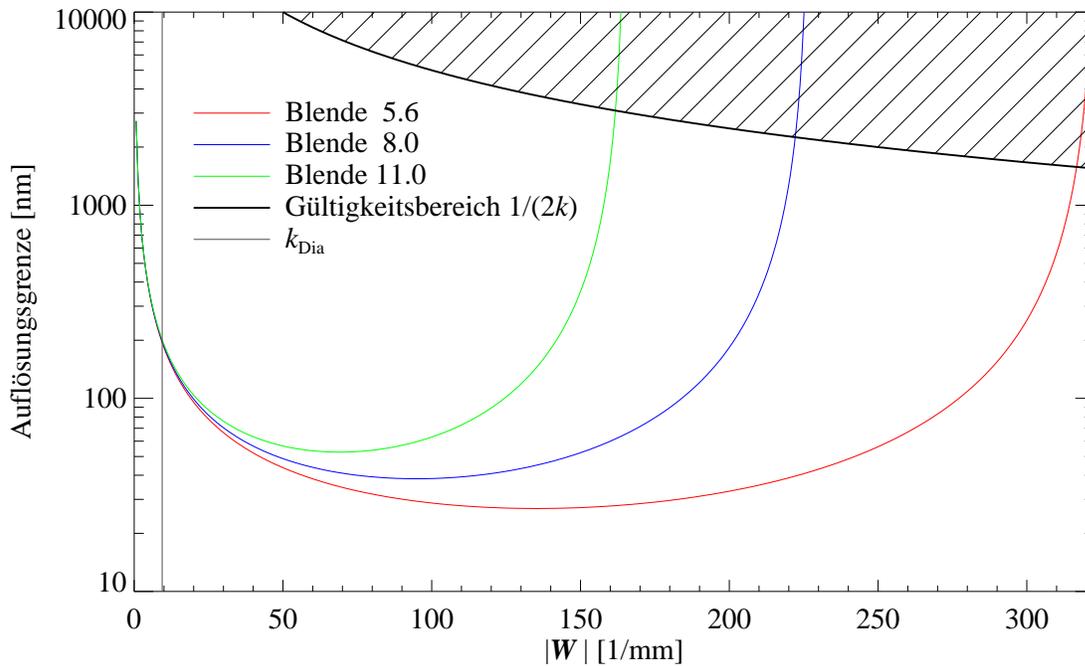
$$p'_{\min} = W \cdot \pi \sqrt{2} \cdot \text{MTF} \left( \frac{W}{W_p} \right) \quad (2.32)$$

Die erreichbare Auflösung des Phasenschiebers ergibt sich nach Abb. 2.5 aus:

$$\delta x \cdot p'_{\min} \geq m_{\min} \quad (2.33)$$

Die Auflösungsgrenze  $\delta x$  liegt also bei:

$$\delta x \geq \frac{m_{\min}}{W \cdot \pi \sqrt{2} \cdot \text{MTF} \left( \frac{W}{W_p} \right)} \quad (2.34)$$



**Abbildung 2.6:** Der Verlauf der bestmöglichen Auflösung eines Phasenschiebers in Abhängigkeit von der Wellenzahl des Dias. Im schraffierten Bereich (Auflösung  $> 1/(2|W|)$ ) ist die Auflösung schlechter als eine halbe Wellenlänge des Sinusmusters. Die Gleichung ist dort nicht mehr gültig.

Setzt man  $W_p$  aus (2.27) und die MTF aus (2.25) ein, so ergibt sich:

$$\delta x \geq \frac{m_{\min} \cdot \sqrt{2}}{W \cdot \left( 4 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{\lambda W}{2A} \right) - \frac{\lambda W}{A} \cdot \sqrt{4 - \left( \frac{\lambda W}{A} \right)^2} \right)} \quad (2.35)$$

Der Definitionsbereich entspricht dem der MTF:

$$W \in \left\{ W \mid 0 < W < \frac{2A}{\lambda} \right\} \quad (2.36)$$

Abbildung 2.6 zeigt den Verlauf der Auflösungsgrenze für eine mittlere Wellenlänge von  $\lambda = 550\text{nm}$  und  $m_{\min} = 1/128$ , was einer effektiven Grauwert-Auflösung von 7 Bit entspricht.

Das Optimum von (2.35) liegt bei

$$W_{\text{opt}} \approx 0,8374 \cdot W_p \quad (2.37)$$



# Kapitel 3

## Kalibrierung

Die präzise geometrische und radiometrische Kalibrierung eines optischen Messsystems ist eine Grundvoraussetzung für hohe Messgenauigkeit. Bei der Kalibrierung werden alle freien Parameter des Messsystems bestimmt. Beim *Ganymed* System gliedert sich die Kalibrierung in drei Stufen:

1. Radiometrische Kalibrierung der Kamera
2. Geometrische Kamera-Kalibrierung
3. Geometrische System-Kalibrierung

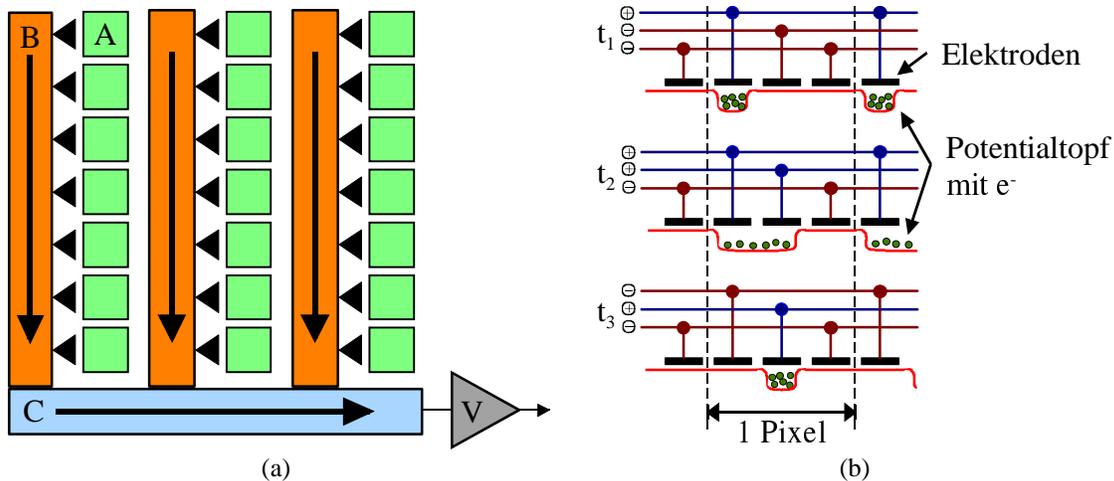
Diese Stufen werden auch in dieser Reihenfolge durchlaufen. Die radiometrische Kalibrierung bestimmt die Eigenschaften der Kamera, die für die Umwandlung des Lichtstromes in digitale elektrische Signal maßgeblich sind. Die geometrische Kalibrierung basiert auf den Grundlagen der Photogrammetrie. Der photogrammetrische Messprozess liefert die zur Kalibrierung einer Kamera notwendigen Parameter ihres Abbildungsmodells sowie die Information über ihre Lage im Raum.

### 3.1 Radiometrische Kalibrierung

Bei der radiometrischen Kalibrierung wird die Übertragungscharakteristik der CCD-Kamera bestimmt. Die radiometrische Kalibrierung des *Ganymed* Systems basiert in Teilen auf (Healey und Kondepudy 1994).

Das in das Kameraobjektiv einfallende Licht wird über die Abbildungsoptik auf die lichtempfindlichen Elemente des CCDs projiziert. Auf dem CCD mobilisieren die detektierten Photonen Ladungsträger, die in Kapazitäten integriert werden. Anschließend werden die integrierten Ladungen, wie in Abb. 3.1 dargestellt, abtransportiert, in Spannungen umgewandelt, verstärkt und schließlich digitalisiert. Auf diesem Signalpfad können verschiedene Beeinflussungen auftreten, die im wesentlichen zwei Auswirkungen haben:

- Der Grauwert-Nullpunkt eines Bildpunktes ändert sich.
- Die Empfindlichkeit eines Bildpunktes ändert sich.



**Abbildung 3.1:** a) zeigt den Aufbau eines Interline-Transfer CCD-Sensors nach Seitz (1999). A kennzeichnet eine lichtempfindliche Zelle, B ist ein Interline Schieberegister, C ist das Ausleseregister und V der Ausleseverstärker. Da die B-Register vor Lichteinfall geschützt sind, kann mit ihnen ein elektronischer Verschluss realisiert werden. In b) ist das Prinzip des Ladungstransports im CCD dargestellt. In drei Takt-Zyklen (von oben nach unten) wird die Ladung um ein Drittel Bildelement verschoben.

Im Folgenden sollen zum grundlegenden Verständnis zunächst die entsprechenden Störfaktoren dargelegt werden.

### 3.1.1 Störungen der radiometrischen Eigenschaften

Die erste Störquelle befindet sich zwischen Objektiv und lichtempfindlichen Elementen. Eigentlich sollte dort nur leerer Raum sein. Aber da die meisten Kameras nicht unter Reinraumbedingungen zusammgebaut werden, befindet sich auf der Glasabdeckung des CCDs häufig Schmutz. Auf dem CCD selbst ist zwar kein Staub, da er noch im Reinraum versiegelt wurde, aber von der Halbleiter-Produktion können Reste von Spülflüssigkeiten und Ätzmitteln auf der Oberfläche zurückgeblieben sein. Beides führt zu Schattenwurf auf dem CCD. Zu beachten ist, dass die Schattenform von der Projektionsapertur abhängig ist. Das heißt, dass die Form des Schattens unter den Abbildungsbedingungen gemessen werden muss, unter denen das System anschließend eingesetzt werden soll.

Auf dem CCD selbst treten mehrere Effekte auf. Die Umwandlung eines einfallenden Photonstroms  $B(u, v, \lambda)$  in eine Ladungsmenge  $I$  lässt sich mit folgendem Modell nach Healey und Kondepudy (1994) beschreiben:

$$I = T \int_{\lambda} \int_u \int_v B(u, v, \lambda) \cdot q(u, v, \lambda) du dv d\lambda \quad (3.1)$$

Dabei sind  $u$  und  $v$  die Bildkoordinaten des CCD,  $0 \leq q(\lambda) \leq 1$  ist die lokale Quanteneffizienz, also die Elektronenausbeute pro einfallendem Photon in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung und  $T$  die Integrationszeit. Die Quanteneffizienz kann durch produktionsbedingte Faktoren lokale Variationen aufweisen.

Ein weiterer Effekt ist der so genannte Dunkelstrom. D.h. für  $B = 0$  ist  $I > 0$ . Der Dunkelstrom entsteht durch eine thermische Mobilisierung von  $N_D$  Ladungsträgern und kann entsprechend durch Kühlung des CCDs verringert werden. Der Dunkelstrom wird, genauso wie ein durch Photoneneinfall erzeugter Strom, über die Zeit integriert und ist somit linear von  $T$  abhängig.

Nach der Integration werden die Ladungsträger über so genannte Eimerketten aus dem Feld abtransportiert und verstärkt. Abgesehen von dem dabei auftretenden Verlust und der Verschiebung in benachbarte Ladungspakete haben die Ausleseverstärker charakteristische Kennlinien. Das tritt vor allem in Erscheinung, wenn die Ladungspakete über verschiedene Ausleseverstärker laufen.

Schließlich wird das analoge Intensitätssignal noch in ein digitales Signal umgewandelt, wodurch das so genannte Quantisierungsrauschen hinzukommt. Das Quantisierungsrauschen ist im Intervall  $[-\frac{q}{2}, +\frac{q}{2}]$  gleich verteilt und hat somit eine Standardabweichung von:

$$\sigma_q^2 = \int_0^1 (qx - \frac{q}{2})^2 dx = \frac{q^2}{12}. \quad (3.2)$$

Dabei ist  $q$  die Größe einer Quantisierungsstufe.

### 3.1.2 Das radiometrische Kameramodell

Die radiometrischen Eigenschaften der Kamera lassen sich mit dem Wissen über die Fehlerquellen durch ein vereinfachtes Modell ausdrücken. Die Variation der Quanteneffizienz der einzelnen Bildelemente wird durch einen Faktor  $K$  ausgedrückt, so dass die Anzahl der Ladungsträger in einer Zelle gleich  $KI$  ist. Hierzu addieren sich der Dunkelstrom  $N_D$  und das Poisson-verteilte Schrot-Rauschen (Englisch: „Shot-Noise“)  $N_S$  mit einem Mittelwert von Null. Die Anzahl der Ladungsträger, die in einer Zelle gesammelt werden, ist somit:

$$KI + N_D + N_S \quad (3.3)$$

Anschließend wird durch den Ausleseverstärker ein Intensitäts-unabhängiges Ausleserauschen  $N_R$  mit Mittelwert Null hinzugefügt und das resultierende Signal um den Faktor  $A$  verstärkt, so dass das am Analog-Digital-Wandler anliegende Videosignal die Amplitude

$$V = (KI + N_D + N_S + N_R)A \quad (3.4)$$

hat.

Bei der Wandlung in ein Digitalsignal kommt schließlich noch das Quantisierungsrauschen  $N_Q$  hinzu:

$$D = (KI + N_D + N_S + N_R)A + N_Q \quad (3.5)$$

Mit diesem Modell kann nun die eigentliche radiometrische Kalibrierung durchgeführt werden.

### 3.1.3 Messung der radiometrischen Eigenschaften

Die Messung der radiometrischen Eigenschaften der Kamera erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird der Dunkelstrom  $N_D$  bestimmt, anschließend das Produkt aus  $K$  und dem Verstärkungsfaktor  $A$ , also die Empfindlichkeit. Diese beiden Kenngrößen müssen für jeden Bildpunkt bestimmt werden. Da der Fehler, der bei der Abbildung einer gegebenen Szene durch diese beiden Faktoren erzeugt wird, zeitlich konstant ist, bezeichnet man ihn auch als *statisches Rauschen* (Englisch: „fixed-pattern-noise“).

#### 3.1.3.1 Dunkelstrommessung

Das in (3.5) angegebene Kameramodell vereinfacht sich bei fehlendem Lichteinfall zu:

$$D_D = (N_D + N_S + N_R)A + N_Q \quad (3.6)$$

Mittelt man  $s$  Messungen von  $D_D$ , die zu den Zeitpunkten  $t_i$  aufgenommen wurden, so ist der Erwartungswert

$$E_D(u, v) = \frac{1}{s} \cdot \sum_{i=1}^s D_D(u, v, t_i) = \frac{1}{s} \cdot \sum_{i=1}^s N_D(u, v) \cdot A \quad (3.7)$$

mit einer Standardabweichung von  $\sigma_D \propto \sqrt{s}$ . Das liegt daran, dass die Erwartungswerte von  $N_R$  und  $N_S$  Null sind.

Zur Bestimmung des Dunkelstromes müssen also nach Erreichen der Betriebstemperatur lediglich  $s$  Bilder mit abgedunkelter Kamera aufgenommen und punktweise gemittelt werden. Die Anzahl der Bilder ist entsprechend der Größe der Standardabweichung und der gewünschten Genauigkeit zu wählen und liegt üblicherweise zwischen 100 und 1000 Bildern.

#### 3.1.3.2 Empfindlichkeitsmessung

Verfügt man über ein perfekt homogen ausgeleuchtetes Objekt, das von einer idealen Optik mit der gleichen Homogenität auf die Sensor-Anordnung projiziert wird, kann man die Empfindlichkeit  $K(u, v)$  der einzelnen Bildpunkte direkt aus (3.5) bestimmen. Dazu ist es notwendig den Erwartungswert  $E$  von  $D$  durch Mittelung von  $s$  Bildern zu bestimmen:

$$E(u, v) = \frac{1}{s} \cdot \sum_{i=1}^s D(u, v, t_i) = K(u, v) \cdot I \cdot A + E_D(u, v) \quad (3.8)$$

Leider ist eine über die Fläche konstante Intensität  $I$  in der Praxis nicht zu realisieren. Zum Einen besitzt ein reales Objekt nie eine völlig homogene Reflektivität, zum Anderen gibt es weder eine Lichtquelle, noch eine Kamera Optik, die eine vignettierungsfreie Beleuchtung bzw. Abbildung ermöglicht.

Die einzige Lichtquelle, die eine entsprechend homogen leuchtende Fläche erzeugen kann ist die Ulbricht-Kugel. Sie wird deshalb oft zur radiometrischen Kalibrierung eingesetzt. Allerdings beleuchtet man dabei immer den „nackten“ CCD-Sensor, ohne vorgesezte Optik. Viele Phänomene, die die Empfindlichkeit einzelner Bildelemente beeinflussen entstehen aber entweder erst durch die Abbildungsoptik oder werden zumindest maßgeblich von ihr beeinflusst.

Daraus folgt die schon oben angeführte Forderung, dass die radiometrische Kalibrierung immer in der endgültigen optischen Konfiguration stattfinden sollte! Das bedeutet aber auch, dass entweder eine Ulbricht-Kugel mit einer Öffnung von der Größe des später genutzten Bildfeldes benötigt wird.

Wesentlich weniger aufwändig ist es daher ein nicht perfektes Test-Objekt mit einer einigermäßen gleichmäßigen Oberfläche so gut wie möglich auszuleuchten und die daraus resultierende Helligkeitsverteilung zu modellieren. Daher lautet (3.8) für ein reales System:

$$E(u, v) = K(u, v) \cdot I(u, v) \cdot A + E_D(u, v) \quad (3.9)$$

Um  $K(u, v) \cdot A$  zu bestimmen, muss  $I(u, v)$  bekannt sein. Eine gute Schätzung von  $I(u, v)$  erhält man, wenn man annimmt, dass  $I(u, v)$  nur niederfrequente räumliche Variationen aufweist. Das lässt sich gewährleisten, wenn die Oberfläche des Referenz-Objekts weitgehend homogen ist.

Eine Möglichkeit, die **Healey und Kondepudy** zur Bestimmung der mittleren Intensität  $\bar{I}(u, v)$  vorschlagen, ist die Mittelung über einen kleinen Bereich:

$$\bar{I}'(u, v) = \bar{I}(u, v) \cdot A \approx \mathcal{B}_b * (E - E_D) \quad (3.10)$$

Dabei ist  $\mathcal{B}_b$  ein Glättungsoperator der Kantenlänge  $2b + 1$ . Der Bereich muss mindestens so groß gewählt werden, dass

$$\mathcal{B}_b * K(u, v) \approx 1 \quad (3.11)$$

mit hinreichender Genauigkeit erfüllt ist. Er darf aber nicht so groß werden, dass die Bedingung  $I(u, v) \approx \text{const.}$  verletzt wird. **Healey und Kondepudy** verwenden  $b = 4$ .

Wie man aber an den Messergebnissen sehen wird, ist (3.11) nicht einmal näherungsweise erfüllt. Darum wird hier von dem Verfahren von **Healey und Kondepudy** abgewichen. Für die Modellierung der Objekt-Intensität  $\bar{I}(u, v)$  bietet sich ein zweidimensionales Polynom niederen Grades an:

$$\bar{I}'(u, v) = \sum_{i=0}^r \sum_{j=0}^r a_{j,i} \cdot u^i \cdot v^j \quad (3.12)$$

Die Koeffizienten  $a_{j,i}$  passt man so an, dass der mittlere quadratische Fehler

$$\sum_u \sum_v (\bar{I}'(u, v) - E(u, v) + E_D(u, v))^2 \quad (3.13)$$

minimal wird. Hierfür existieren geeignete Verfahren.

Durch Einsetzen von (3.12) in (3.9) sowie Auflösen nach  $K$  erhält man schließlich:

$$K(u, v) = \frac{E(u, v) - E_D(u, v)}{\bar{I}'(u, v)} \quad (3.14)$$

Um Fehler bei der Schätzung von  $\bar{I}'(u, v)$  zu vermeiden, ist die Wahl von mehreren Aufnahme-Konfigurationen mit geänderten Positionen von Referenz-Körper und Lichtquelle sinnvoll. Die Fehler, die von kleinen Störungen auf der Oberfläche des Referenz-Körpers verursacht werden, mitteln sich dadurch heraus.

**Algorithmus 1: DUNKELSTROMMESSUNG**

<b>Input:</b> $s_d$	Anzahl der Bilder je Dunkelstrommessung
<b>Input:</b> $n_t$	Anzahl der Belichtungszeiten je Dunkelstrommessung
1: <b>for</b> $i \leftarrow 1$ <b>to</b> $n_t$ <b>do</b>	für alle Belichtungszeiten
2:   setze Belichtungszeit $\tau(i)$	
3: <b>for</b> $j \leftarrow 1$ <b>to</b> $s_d$ <b>do</b>	für alle Bilder
4:     Bild $D_D$ aufnehmen	bei abgedunkeltem Sensor
5: $E_D(i) \leftarrow E_D(i) + D_D$	Grauwerte für Erwartungswert summieren
6: <b>end for</b>	
7: $E_D(i) \leftarrow E_D(i)/s_d$	Erwartungswert berechnen
8: <b>end for</b>	
9: $a_D \leftarrow$ Steigung( $E_D(i)$ über $\tau(i)$ )	Geradensteigung bestimmen
10: $b_D \leftarrow$ Abschnitt( $E_D(i)$ über $\tau(i)$ )	Achsenabschnitt bestimmen
<b>Output:</b> $a_D, b_D$	

**Algorithmus 2: EMPFINDLICHKEITSMESSUNG**

<b>Input:</b> $s_h$	Anzahl der Bilder je Position
<b>Input:</b> $n_p$	Anzahl der Positionen
<b>Input:</b> $\tau$	Belichtungszeit
1: <b>for</b> $i \leftarrow 1$ <b>to</b> $n_p$ <b>do</b>	für alle Positionen
2:   Positioniere Test-Objekt	neue Position
3: <b>for</b> $j \leftarrow 1$ <b>to</b> $s_h$ <b>do</b>	für alle Bilder
4:     Bild $D_H$ aufnehmen	mit Beleuchtung
5: $E(i) \leftarrow E(i) + D_H$	Grauwerte für Erwartungswert summieren
6: <b>end for</b>	
7: $E(i) \leftarrow E(i)/s_h$	Erwartungswert berechnen
8: $E(i) \leftarrow E(i) - \tau \cdot a_D - b_D$	Dunkelstrom-Korrektur
9: $k_{m,l}$ aus $E(i)$	Polynom-Koeffizienten bestimmen
10: $\bar{I}' \leftarrow \sum_m \sum_l k_{m,l} \cdot u^l \cdot v^m$	Intensitäts-Modell berechnen
11: $K(i) \leftarrow E(i)/\bar{I}'$	Empfindlichkeit berechnen
12: $K \leftarrow K + K(i)$	über alle Positionen summieren
13: <b>end for</b>	
14: $K \leftarrow K/n_p$	Mittelwert über alle Positionen
<b>Output:</b> $K$	

### 3.1.3.3 Algorithmen

Für die Messung des Dunkelstroms wird Alg. 1 benutzt. Für  $n_t$  verschiedene Integrationszeiten  $\tau$  werden jeweils  $s_d$  Bilder gemittelt. Anschließend bestimmt man durch Auftragen des gemittelten Dunkelstromes über der jeweiligen Belichtungszeit die Steigung  $a_D$  und den Achsenabschnitt  $b_D$  der Ausgleichsgerade. Mit diesen Parametern kann dann die Dunkelstrom-Korrektur für jede Integrationszeit bestimmt werden.

Die Anzahl der Bilder pro Belichtungszeit  $s_d$  sollte mindestens 100 betragen und es sollten wenigstens fünf verschiedene Integrationszeiten gewählt werden.

Zur Bestimmung der Empfindlichkeit wurde Alg. 2 verwendet. Bei  $n_p$  verschiedenen Positionen des weißen Kalibrierkörpers werden jeweils  $s_h$  Bilder mit konstanter Beleuchtung gemittelt. Von den gemittelten Bildern wird der für die Belichtungszeit  $\tau$  berechnete Dunkelstrom abgezogen und aus dem Ergebnis werden die Koeffizienten  $k_{m,l}$  des Intensitätsmodelles bestimmt. Aus der gemittelten Intensität und dem Intensitätsmodell ergibt sich schließlich für jede Position eine relative Empfindlichkeit  $K(i)$ . Durch die Mittelung der Empfindlichkeit über viele Positionen entfernt man den Einfluss von kleinen Inhomogenitäten des Kalibrierkörpers und erhält schließlich die gesuchte Empfindlichkeit. Der Wert von  $n_p$  sollte dabei über 10 liegen, der von  $s_h$  über 100.

Die tatsächliche Intensität eines Bildpunktes kann man durch Auflösen von (3.14) nach  $I$  bei jeder Messung  $D(u, v)$  berechnen:

$$I(u, v) = \frac{D(u, v) - \tau \cdot a_D(u, v) - b_D(u, v)}{K(u, v)} \quad (3.15)$$

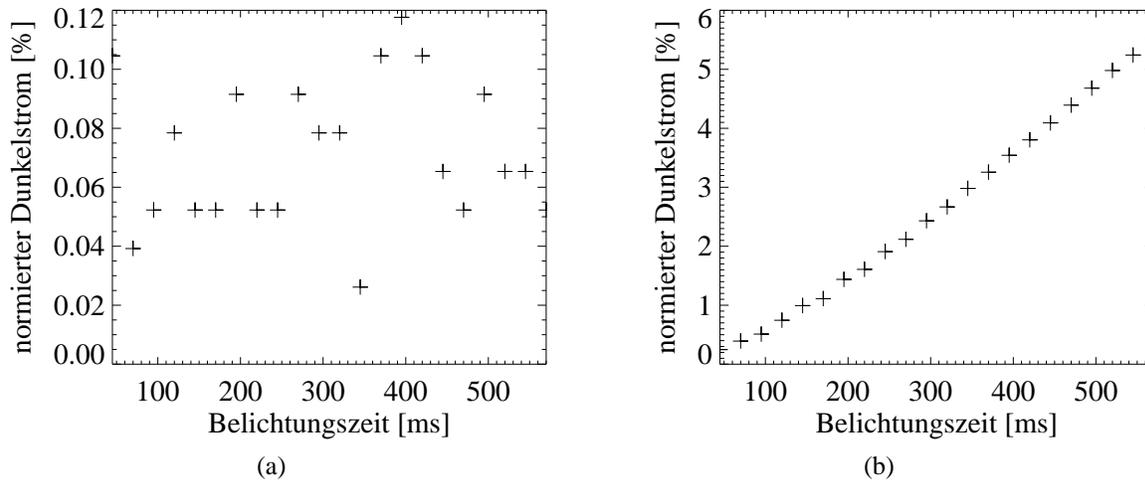
## 3.1.4 Ergebnisse

Die Messungen von Dunkelstrom und Empfindlichkeit wurden mit der Kodak-Kamera des *Ganymed* Sensors durchgeführt. Die Kamera ist mit dem KAI-1010 Sensor von Kodak bestückt (s. Anh. C).

### 3.1.4.1 Dunkelstrom

Für die Dunkelstrommessung wurden bei geschlossenem Objektivdeckel in einem verdunkelten Raum bei verschiedenen Belichtungszeiten jeweils 30 Bilder aufgenommen. Für jedes Bildelement kann man somit bei jeder Belichtungszeit einen mittleren Dunkelstrom und eine Varianz angeben. Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse für zwei Bildelemente mit unterschiedlicher Charakteristik. Die Kurve in 3.2(a) zeigt den typischen Verlauf für diese Kamera. Es ist offensichtlich, dass kein Zusammenhang zwischen Belichtungszeit und Dunkelstrom besteht. Es handelt sich also nicht um einen Dunkelstrom im eigentlichen Sinne, der die Kapazität eines Bildelementes während der Integrationszeit stetig auffüllt, sondern um einen Effekt, der erst nach der Integration z. B. durch einen Gleichspannungs-Offset erzeugt wird.

In Abb. 3.2(b) ist dagegen der Verlauf für ein Bildelement mit sehr großem Dunkelstrom dargestellt. Man bezeichnet sie auch als *heiße* Bild-Punkte (Englisch: „Hot Pixels“). Hier zeigt sich der erwartete Anstieg mit der Integrationszeit deutlich. Allerdings tritt dieser Effekt nur bei etwa 50 von 1 000 000 Bildelementen auf.



**Abbildung 3.2:** a) zeigt das Ergebnis der Dunkelstrommessung für ein Bildelement mit normaler Charakteristik, b) eines mit einem großen Dunkelstrom. Nur etwa 50 von 1 000 000 Elementen haben einen erhöhten Dunkelstrom. Der Dunkelstrom ist als Bruchteil der Vollaussteuerung des Ausgangs-Verstärkers angegeben.

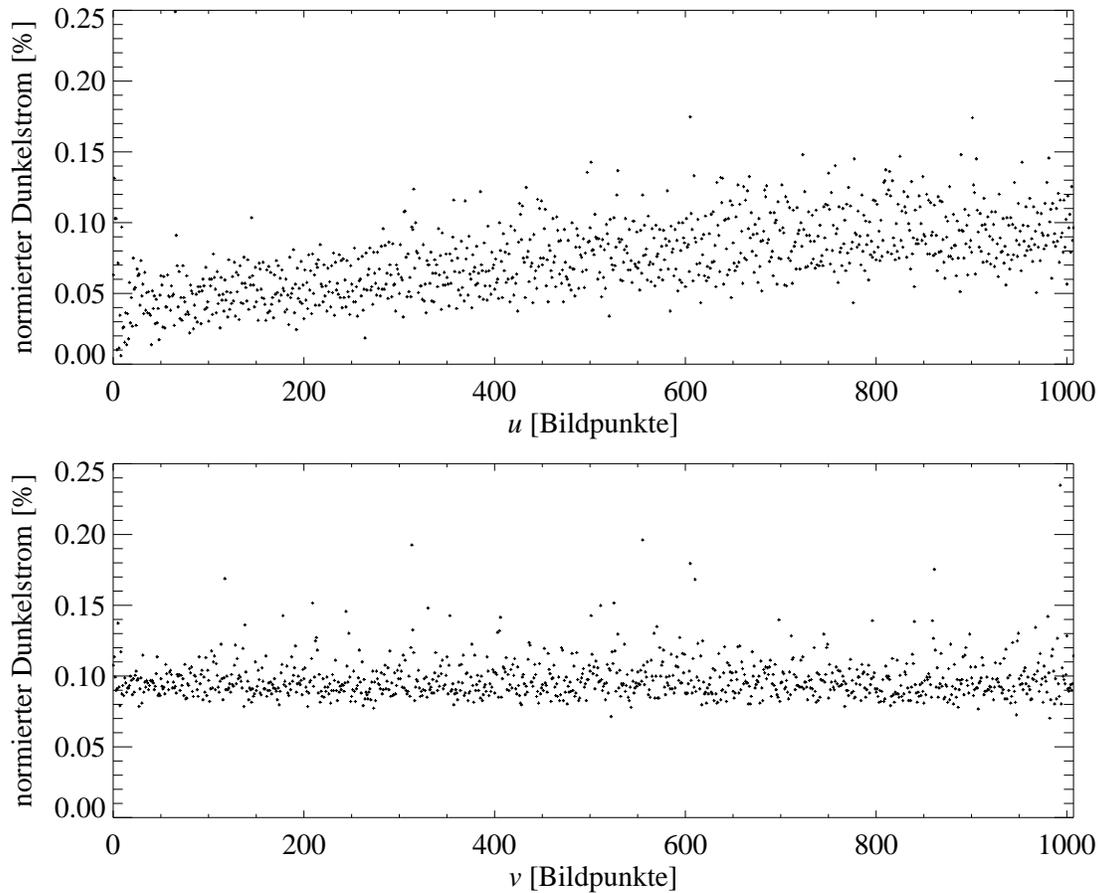
Nimmt man erheblich mehr Bilder bei einer konstanten Belichtungszeit auf ( $> 500$ ), kann man räumlich ausgedehnte Inhomogenitäten auf dem Sensor sichtbar machen. Betrachtet man den Verlauf des Dunkelstromes in Abb. 3.3, so zeigt sich, dass er entlang einer Spalte erheblich gleichmäßiger ist als entlang einer Zeile. In einer flächenhaften Darstellung zeigt sich ein schwaches spaltenförmiges Muster, das sich leider kaum wiedergeben lässt. Verursacht wird dieser Effekt vermutlich vom Ausleseverstärker.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Korrektur des Dunkelstroms nur auf den wenigen „defekten“ Bildelementen überhaupt sinnvoll ist, da der Einfluss des Dunkelstroms deutlich unter dem Effekt des Quantisierungsrauschens liegt.

### 3.1.4.2 Empfindlichkeit

Für die Empfindlichkeitsmessung wurden in 22 verschiedenen Positionen von Lichtquelle und Kalibrierkörper jeweils 50 Bilder aufgenommen. Um zu demonstrieren, dass das Verfahren auch mit fehlerbehafteten Kalibrierkörpern funktioniert, diente eine mit weißem Resopal beschichtete Spanplatte als Kalibrierkörper. Die Ergebnisse der Empfindlichkeitsmessung sind in Abb. 3.4 dargestellt. Die minimale relative Empfindlichkeit eines Bildelementes auf dem Sensor betrug  $-7,2\%$ , die maximale  $+3,3\%$ . Die mittlere absolute Abweichung aller Bildelemente von 0 betrug  $0,3\%$ . Die meisten Bildelemente haben somit eine Korrektur, die unterhalb der Größe des Quantisierungsrauschens von  $0,4\%$  liegt. Der Effekt der radiometrischen Kalibrierung ist daher für die Photogrammetrie vernachlässigbar klein.

Sehr interessant sind jedoch die Erkenntnisse über die Effekte, die bei der radiometrischen Kalibrierung mit Abbildungsoptik zu Tage treten. Abbildung 3.5 zeigt einen Ausschnitt aus der obigen Messung. Dort ist auf einer runden Fläche von etwa 80 Bildpunkten Durchmesser die Empfindlichkeit der Kamera um etwa  $1\%$  reduziert.



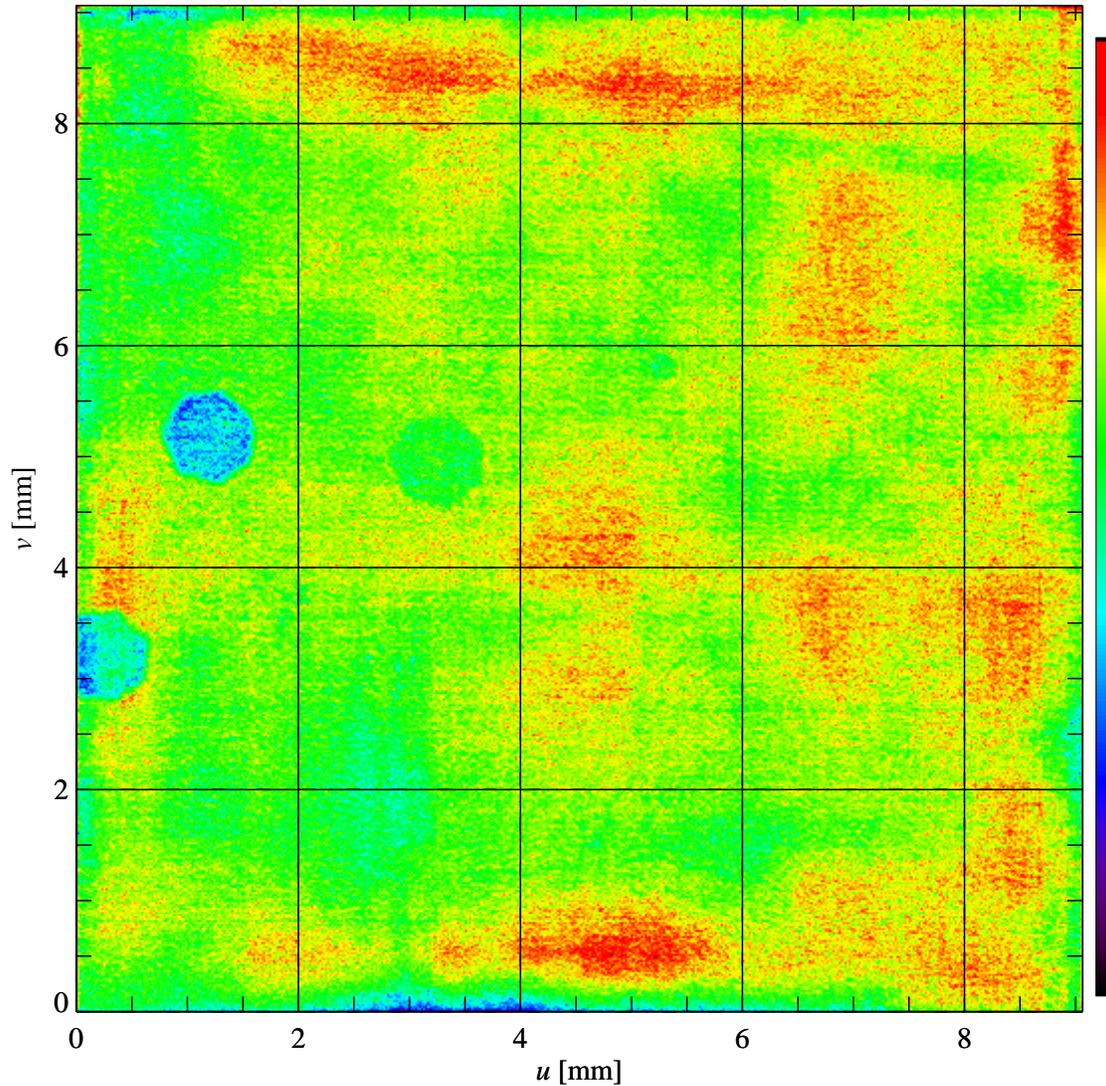
**Abbildung 3.3:** Räumlicher Verlauf des Dunkelstromes. Oben: Verlauf entlang einer Zeile in der Bildmitte. Unten: Verlauf entlang einer Spalte in der Bildmitte.

## 3.2 Photogrammetrische Grundlagen

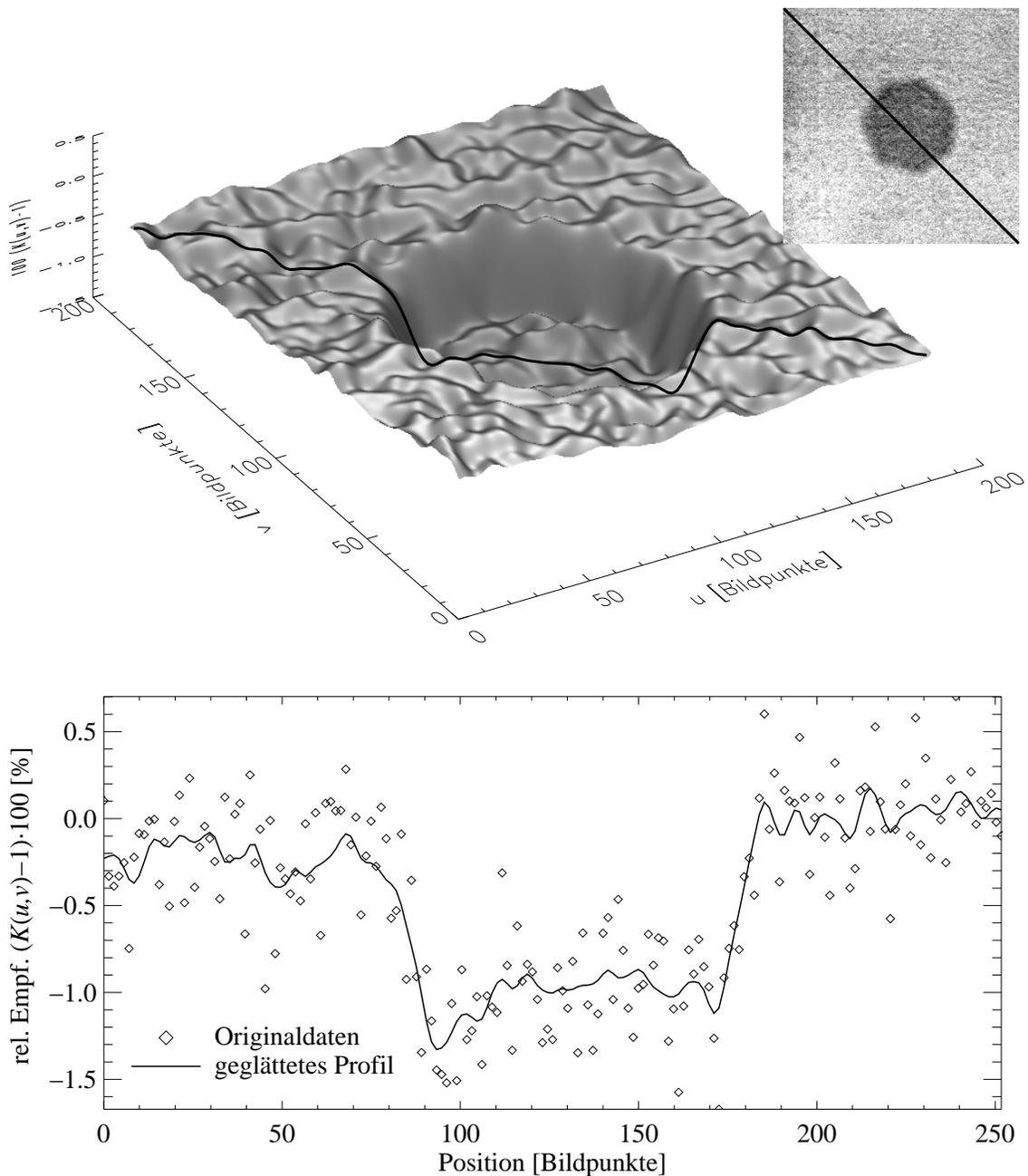
Der Begriff Photogrammetrie bezeichnet die Methode des Messens mit Hilfe fotografischer Aufnahmen. Hier steht der Begriff immer als Synonym für die *digitale Nahbereichsphotogrammetrie*, die das Gegenstück zur Luftbildphotogrammetrie und der analogen Photogrammetrie mit herkömmlichen Filmen darstellt.

Im Allgemeinen werden mehrere Aufnahmen des zu vermessenden Objektes gemacht und die Positionen der zu vermessenden Punkte in allen Aufnahmen markiert. Das Schema in Abb. 3.6 zeigt die Daten, die dabei als Beobachtung oder als Ergebnis anfallen:

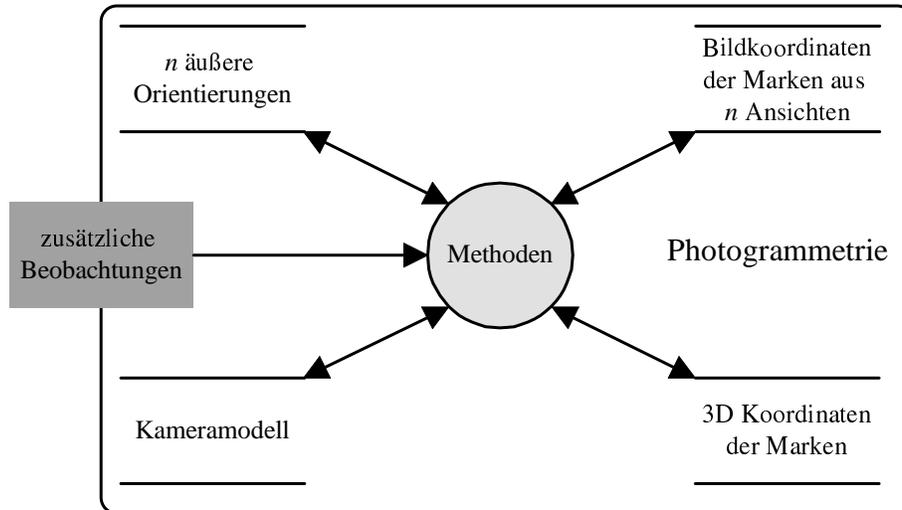
- Die Bildkoordinaten der Marken.
- Die Modell-Parameter der Kamera(s), auch innere Orientierung genannt.
- Die äußere(n) Orientierung(en) der Kamera(s) an dem/den Aufnahme-Standort(en).
- Die 3D-Koordinaten der Marken.



**Abbildung 3.4:** Die Empfindlichkeitsverteilung des Kodak CCD-Sensors KAI-1010M. Sie wurde mit einem 20 mm Objektiv bei Blende 8 bestimmt. Abszisse und Ordinate geben die Position auf dem Sensor an. Ein Bildelement des Sensors ist  $9 \mu\text{m}$  groß. Die Farbskala deckt einen Wertebereich der relativen Empfindlichkeit von  $-2,1\%$  bis  $+1,0\%$  ab. Die mittlere absolute Abweichung von 0 beträgt  $0,30\%$ .



**Abbildung 3.5:** Die obere Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der Empfindlichkeitsmessung aus Abb. 3.4. Unten ist ein Profilschnitt entlang der schwarzen Linie aufgetragen. Beide stellen die prozentuale relative Empfindlichkeit  $(K(u,v) - 1) \cdot 100$  über den Bildkoordinaten dar. Die flächenhafte Darstellung wurde zur Verdeutlichung des Phänomens stark geglättet. Der Einsatz oben rechts zeigt die ungeglätteten Originaldaten als Grau-Bild. Man erkennt eine kreisförmige Einbuchtung mit etwa 80 Bildpunkten Durchmesser, das entspricht  $720 \mu\text{m}$ . Die Empfindlichkeitsminderung an dieser Stelle wird vermutlich nicht durch den CCD-Sensor, sondern durch ein optisches Phänomen verursacht. Die Empfindlichkeit des Sensors ist an der gestörten Stelle um 1% reduziert.



**Abbildung 3.6:** Der Datenfluss in der Photogrammetrie: Ist eines der vier möglichen Ergebnisse unbekannt, so lässt es sich aus den anderen dreien berechnen. Für jede mögliche Konstellation existiert ein photogrammetrisches Verfahren. Ist mehr als eine Größe unbekannt oder nur näherungsweise bekannt, benötigt man ein komplexeres Verfahren zur Lösung der resultierenden Gleichungen: den Bündelblockausgleich.

Daneben gibt es noch so genannte zusätzliche Beobachtungen, das sind z.B. Distanzen, die zur Definition eines Maßstabes dienen, ein vorgegebenes Koordinatensystem oder 3D-Koordinaten, die mit einem anderen Messverfahren bestimmt wurden.

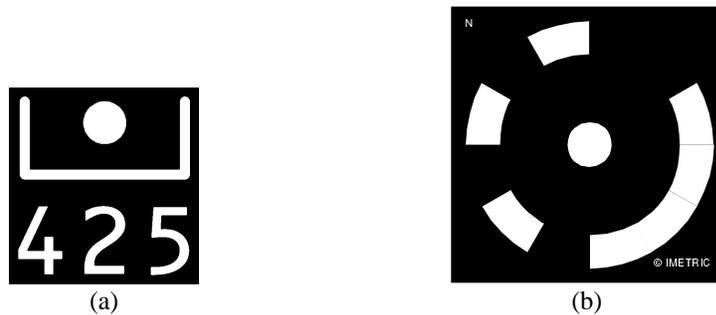
Die Photogrammetrie ist im Prinzip die Gesamtheit der Verfahren, die bei fehlender oder teilweiser Kenntnis einer oder mehrerer dieser Datengruppen die Berechnung aus den bekannten Daten ermöglicht. Für einige der Probleme existieren explizite Lösungen, andere sind nur implizit anzugeben und müssen daher mit aufwändigen numerischen Verfahren gelöst werden. Das wichtigste davon ist die so genannte *Bündelblockausgleichung* oder kurz *Bündelausgleich*. Die vier wichtigsten Methoden sind:

**Vorwärtsschnitt:** Berechnung von 3D-Koordinaten der Passmarken aus der äußeren und inneren Orientierung, sowie den Bildkoordinaten. Es existiert eine direkte Lösung.

**Rückwärtsschnitt:** Berechnung der äußeren Orientierung der Kamera bei bekannter innerer Orientierung und bekannten 3D- und Bildkoordinaten. Ab sechs Punkten gibt es eine direkte Lösung: Die Direkte Lineare Transformation (DLT) (Luhmann 2000, Kap. 4.2.3) (Abdel-Aziz und Karara 1971).

**Einbild-Kalibrierung:** Bestimmung der inneren Orientierung aus den bekannten 3D- und Bildkoordinaten mit und ohne Kenntnis der äußeren Orientierung aus einer einzigen Aufnahme (Kraus 1996).

**Rückprojektion:** Berechnung der Bildkoordinaten aus bekannten Objektkoordinaten, innerer- und äußerer Orientierung. Die explizite Lösung ist in (3.16) und (3.17) 36Bündelausgleich equation.187 angegeben.



**Abbildung 3.7:** Zwei Beispiele für mögliche Kodierungen photogrammetrischer Passmarken: (a) Textcode Marken der DaimlerChrysler AG, (b) Ringkodes von Imetric/SA, Porrentruy, Schweiz. In beiden Fällen markiert der runde Punkt den zu messenden Ort. Die abgebildete Größe entspricht der Originalgröße beim Einsatz in der Nahbereichsphotogrammetrie.

Für die Kalibrierung des *Ganymed* Systems sind die wesentlichen Methoden die präzise Messung der Bildkoordinaten, der Rückwärtsschnitt sowie die Bündelausgleichung zur Bestimmung der inneren Orientierung der Kamera und eine abgewandelte Einbild-Kalibrierung zur Berechnung der inneren und äußeren Orientierung des Projektors. Diese Verfahren sollen zunächst kurz erläutert werden.

### 3.2.1 Bildmessung und Identifizierung

Um die Markierung der zu messenden Objektpunkte in den einzelnen Aufnahmen zu erleichtern, verwendet man in der *digitalen Nahbereichsphotogrammetrie* mit einem speziellen Kode versehene retroreflektierende, selbstklebende (Pass-)Marken zur Signalisierung dieser Punkte. Abbildung 3.7 zeigt zwei Beispiele für mögliche Kodierungen. Sehr verbreitet ist die Ringkodierung die sich durch einfache Dekodierung und hohe Robustheit auszeichnet. Der Vorteil des von [Caesar und Michaelis \(1997\)](#) eingeführten „Textkodes“ liegt in der Lesbarkeit durch den Anwender und erleichtert die Handhabung einer großen Anzahl von Kodes deutlich ([Michaelis 2000](#)). Wegen des guten Kontrastes des retroreflektierenden Materials kann die Segmentierung der Marken über einen einfachen, meist global konstanten, Schwellwert erfolgen. Das Anmessen der Kreise wird von einem Ellipsen-Finder erledigt, der die Mittelpunktskoordinate der Kreise z.B. mit Least-Squares-Template-Matching (LSM) oder durch gewichtete Schwerpunktbildung (Englisch: „Weighted center of gravity“) subpixelgenau bestimmt.

Die Identifizierung der Marken erfolgt über einen geeigneten Mustererkennungsalgorithmus. Um die Oberfläche des Messobjektes nicht zu sehr zu verdecken benutzt man auch unkodierte Marken in Kombination mit kodierten. Sie bestehen lediglich aus einem runden Punkt. Die Identifizierung dieser Marken erfolgt entweder über ihre aus einer vorangegangenen Messung ungefähr bekannten Position oder über ihre relativen Abstände zu den kodierten Marken. Manche Systeme kommen sogar ganz ohne Kodierung aus und verwenden nur die relativen Abstände der Marken zu ihrer Identifizierung (GOM, Steinbichler).

### 3.2.2 Bündelausgleich

Aus den bekannten Bildkoordinaten der photogrammetrischen Passmarken  $x_c$  und  $y_c$  und ihren gesuchten Objektkoordinaten  $x, y, z$ , kann man über die Abbildungsgleichung für die Zentralprojektion ein überbestimmtes Gleichungssystem aufstellen. Bei einem einfachen Lochkameramodell ist es linear. Wegen der bei realen Kameras unvermeidlichen Abbildungsfehler sind jedoch noch die Korrekturterme  $\Delta x(x_c, y_c)$  und  $\Delta y(x_c, y_c)$  notwendig, die das Gleichungssystem nichtlinear machen. Die Abbildungsgleichung für die Zentralprojektion lautet damit (Luhmann 2000):

$$x_c^{(i,j)} = s_x \cdot c \cdot \frac{r_{11}^{(i)} \cdot (x^{(j)} - x_0^{(i)}) + r_{12}^{(i)} \cdot (y^{(j)} - y_0^{(i)}) + r_{13}^{(i)} \cdot (z^{(j)} - z_0^{(i)})}{r_{31}^{(i)} \cdot (x^{(j)} - x_0^{(i)}) + r_{32}^{(i)} \cdot (y^{(j)} - y_0^{(i)}) + r_{33}^{(i)} \cdot (z^{(j)} - z_0^{(i)})} + h_x + \Delta x(x_c^{(i,j)}, y_c^{(i,j)}) \quad (3.16)$$

$$y_c^{(i,j)} = s_y \cdot c \cdot \frac{r_{21}^{(i)} \cdot (x^{(j)} - x_0^{(i)}) + r_{22}^{(i)} \cdot (y^{(j)} - y_0^{(i)}) + r_{23}^{(i)} \cdot (z^{(j)} - z_0^{(i)})}{r_{31}^{(i)} \cdot (x^{(j)} - x_0^{(i)}) + r_{32}^{(i)} \cdot (y^{(j)} - y_0^{(i)}) + r_{33}^{(i)} \cdot (z^{(j)} - z_0^{(i)})} + h_y + \Delta y(x_c^{(i,j)}, y_c^{(i,j)}) \quad (3.17)$$

Diese Gleichungen nennt man auch die *Kollinearitätsgleichungen* der Photogrammetrie. Der Index  $i$  bezeichnet jeweils die Bild-Nummer und der Index  $j$  die Nummer eines Objektpunktes respektive einer Passmarke. Variablen ohne Index sind somit nur durch die Kamera-Eigenschaften festgelegt, Variablen mit Index  $i$  variieren von Aufnahme zu Aufnahme und Variablen mit Index  $j$  sind für alle Aufnahmen konstant. Die Symbole werden in Tab. 3.1 erläutert.

Da das so entstehende Gleichungssystem nicht linear ist, benötigt man zu seiner Lösung geeignete Algorithmen und sinnvolle Startwerte. Allerdings erhält man auf diese Weise gleichzeitig mit den gesuchten Messwerten, den 3D-Koordinaten der Passmarken, auch die Kalibrierinformation des Messgerätes. Das stellt die Konsistenz von Kalibrierung und Messwerten sicher, da der Messprozess nicht vom Kalibrierprozess getrennt ist. Man bezeichnet diesen Vorgang daher als Simultankalibrierung.

### 3.2.3 Kameramodell

Die Parameter, die das Kameramodell beschreiben, werden gemäß der Konvention nach *inneren* und *äußeren* Parametern unterschieden. Man spricht auch von *innerer Orientierung* und *äußerer Orientierung*.

#### 3.2.3.1 Äußere Orientierung

Zur äußeren Orientierung zählen alle Parameter, die von der jeweiligen Aufnahme-Position abhängig sind, also alle, die in (3.16) und (3.17) mit dem Index  $i$  gekennzeichnet sind. Das sind die Hauptpunktlage  $\mathbf{X}_0^{(i)}$  und die Drehmatrix  $\mathcal{M}_i$ . Es ist zu beachten, dass  $\mathcal{M}$  nur die drei Freiheitsgrade  $\omega, \phi$  und  $\kappa$  besitzt. Für die äußere Orientierung sind also pro Bild lediglich sechs Parameter zu bestimmen. Aus praktischen Gründen kann man die äußere Orientierung auch als

---

$\mathbf{X}_0^{(i)} = \begin{pmatrix} x_0^{(i)} \\ y_0^{(i)} \\ z_0^{(i)} \end{pmatrix}$	Ortsvektor des Projektionszentrums in Aufnahme $i$ .
$\mathcal{M}_i = \begin{pmatrix} r_{11}^{(i)} & r_{12}^{(i)} & r_{13}^{(i)} \\ r_{21}^{(i)} & r_{22}^{(i)} & r_{23}^{(i)} \\ r_{31}^{(i)} & r_{32}^{(i)} & r_{33}^{(i)} \end{pmatrix}$	Drehmatrix mit Blickrichtung der Kamera in Aufnahme $i$ . Enthält die Drehwinkel $\omega^{(i)}$ , $\phi^{(i)}$ und $\kappa^{(i)}$ .
$\mathbf{x}_c^{(i,j)} = \begin{pmatrix} x_c^{(i,j)} \\ y_c^{(i,j)} \end{pmatrix}$	Bildkoordinate der Marke $j$ in Aufnahme $i$ .
$\mathbf{X}^{(j)} = \begin{pmatrix} x^{(j)} \\ y^{(j)} \\ z^{(j)} \end{pmatrix}$	Objektkoordinate der Passmarke $j$ .
$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_x \\ h_y \end{pmatrix}$	Lage des Bildhauptpunktes auf dem CCD-Chip relativ zur Mitte.
$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix}$	Pixelgröße des CCD-Chips.
$c$	Kammerkonstante der Kamera.
$\Delta \mathbf{x} \left( \mathbf{x}_c^{(i,j)} \right) = \begin{pmatrix} \Delta x \left( \mathbf{x}_c^{(i,j)} \right) \\ \Delta y \left( \mathbf{x}_c^{(i,j)} \right) \end{pmatrix}$	Terme für die Verzeichnungskorrektur.

---

**Tabelle 3.1:** Bedeutungen der Symbole in den Kollinearitätsgleichungen (3.16) und (3.17).

$4 \times 4$  Matrix  $\mathcal{S}_i$  schreiben:

$$\mathcal{S}_i = \begin{pmatrix} r_{11}^{(i)} & r_{12}^{(i)} & r_{13}^{(i)} & x_0^{(i)} \\ r_{21}^{(i)} & r_{22}^{(i)} & r_{23}^{(i)} & y_0^{(i)} \\ r_{31}^{(i)} & r_{32}^{(i)} & r_{33}^{(i)} & z_0^{(i)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Diese Matrix bezeichnet man auch als „Stationsmatrix“.

### 3.2.3.2 Innere Orientierung

Zur inneren Orientierung gehören die Parameter, die für alle Aufnahmen und Objektpunkte konstant sind, also keinen Index  $i$  oder  $j$  tragen. Das sind in erster Linie die Kammerkonstante

Parameter	$\Delta x$	$\Delta y$	Bezeichnung
$a_1$	$y$	$x$	Scherung
$k_1$	$r^2 \cdot x$	$r^2 \cdot y$	radialsymmetrische Verzeichnung ( $r$ )
$k_2$	$r^4 \cdot x$	$r^4 \cdot y$	radialsymmetrische Verzeichnung ( $r^2$ )
$k_3$	$r^6 \cdot x$	$r^6 \cdot y$	radialsymmetrische Verzeichnung ( $r^3$ )
$p_1$	$(3x^2 + y^2)$	$(2x + y)$	dezentrierte asymmetrische Verzeichnung
$p_2$	$(2x + y)$	$(3y^2 + x^2)$	dezentrierte asymmetrische Verzeichnung

**Tabelle 3.2:** Die Tabelle zeigt die Parameter der physikalisch motivierten Verzeichnungspolynome nach (Breuckmann 1993, Kap. 7). Dabei ist  $r^2 = x^2 + y^2$ .

$c$ , die in etwa der Brennweite des realen Objektivs entspricht, die Pixelgröße  $s_x$  und  $s_y$ , sowie die Hauptpunktlage  $h_x$  und  $h_y$ . Ferner kommen noch die in Tab. 3.2 aufgeführten Parameter der Verzeichnungskorrekturpolynome hinzu. Es gibt verschiedene Ansätze zur Korrektur der Linsenverzeichnung. Der hier verwendete ist physikalisch motiviert und simuliert die als Scherung, Kissen- und Tonnenverzeichnung bekannten Phänomene. Abraham und Förstner (1997) zeigten, dass rein mathematisch konstruierte Polynome n-ten Grades vergleichbare Ergebnisse liefern.

In manchen Modellen werden nicht nur optische, sondern auch elektronische Phänomene modelliert. Diese entstehen auf dem analogen Signalpfad zwischen dem lichtempfindlichen Element bis zum Analog-Digital-Wandler. Das wird vor allem dann wichtig, wenn preiswerte Geräte mit schlechterer Bildqualität eingesetzt werden sollen.

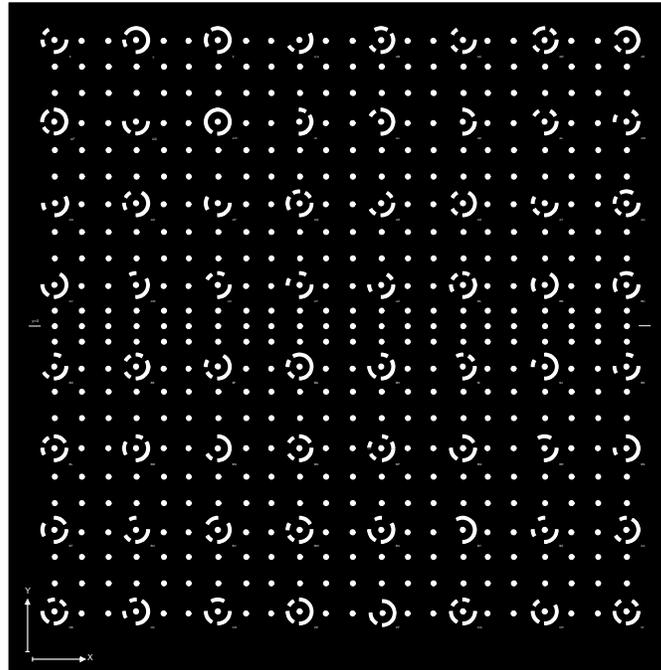
### 3.2.4 Projektormodell

Der Projektor wird photogrammetrisch wie eine Kamera behandelt. Obwohl man nicht durch ihn „hindurchsehen“ kann wie durch eine Kamera, ist er vom Prinzip her sehr ähnlich aufgebaut. Die Bildkoordinaten des Projektors werden allerdings nicht direkt vom Projektor bestimmt, sondern aus den Beobachtungen der Kamera hergeleitet (s. Kap. 4).

Die Parameter der äußeren Orientierung sind identisch mit denen einer normalen Kamera, aber bei der inneren Orientierung gibt es signifikante Unterschiede. Der entscheidende Unterschied zwischen einer Kamera und dem Projektor ist das Fehlen *einer* Bildkoordinate. Für den Vorwärtsschnitt zur Bestimmung der 3D-Koordinaten nach der eigentlichen Messung stellt das kein Problem dar, da dieser bei zwei Kameras überbestimmt ist. Durch das Weglassen *einer* Bildkoordinate in *einer* Kamera wird die Lösung eindeutig. Geometrisch betrachtet ist der Zwei-Kamera-Fall der Schnitt von zwei Geraden. Bei Kamera und Projektor handelt es sich um den Schnitt einer Gerade, die durch den Sehstrahl eines Bildelementes der Kamera und einer Ebene die durch einen Projektorstreifen definiert ist.

Durch den Wegfall einer Koordinate können das Aspektverhältnis der Bildelemente und die Hauptpunktlage  $h_{x|y}$  entlang dieser Koordinate beliebig festgelegt werden. Das reduziert das Kameramodell insgesamt um zwei Parameter.

Für den *Rückwärtsschnitt* und für die Einbild-Kalibrierung ist die Kenntnis der zweiten Koordinate jedoch wesentlich. Um sich nicht allzu weit vom Standardmodell der Kamera zu entfernen kann man die fehlende Bildkoordinate als schwach bekannt annehmen und eine sehr



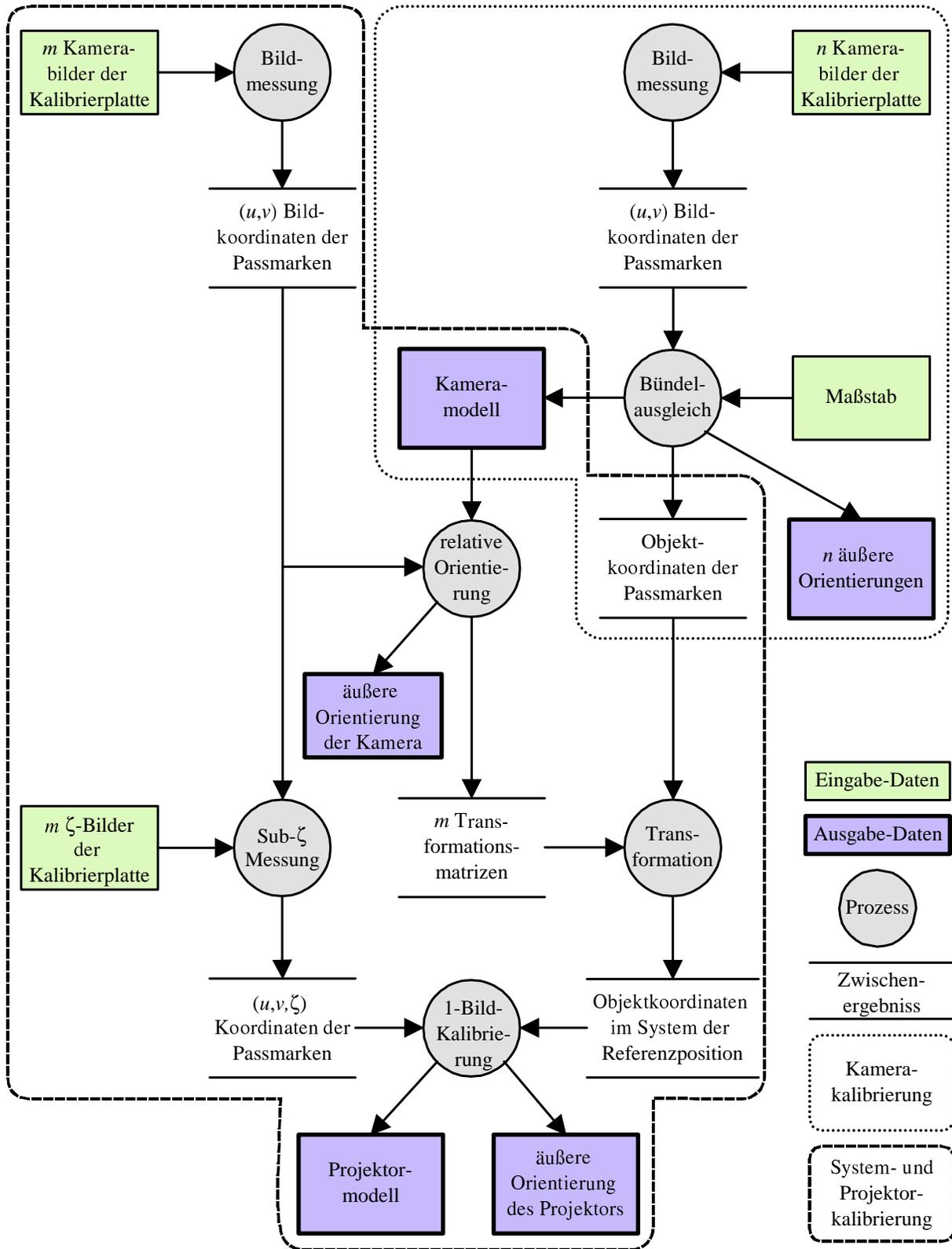
**Abbildung 3.8:** Der Kalibrierkörper des *Ganymed* Systems. Das Markenfeld wird mit einem Laserdrucker auf eine selbstklebende Folie aufgebracht und auf einen leichten, langzeitstabilen Körper aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) aufgezogen. Die Koordinaten der Passmarken werden dann durch eine Photogrammetrische Messung mit einer Hochauflösenden Kamera (Kodak DCS660) auf etwa  $10 \mu\text{m}$  genau bestimmt und behalten ihre Gültigkeit über mindestens ein Jahr.

ungenauere Schätzung dafür einsetzen. Dies entspricht einer Kamera mit einem sehr großen Aspektverhältnis der Bildelemente, d.h. sehr langen und schmalen Bildpunkten.

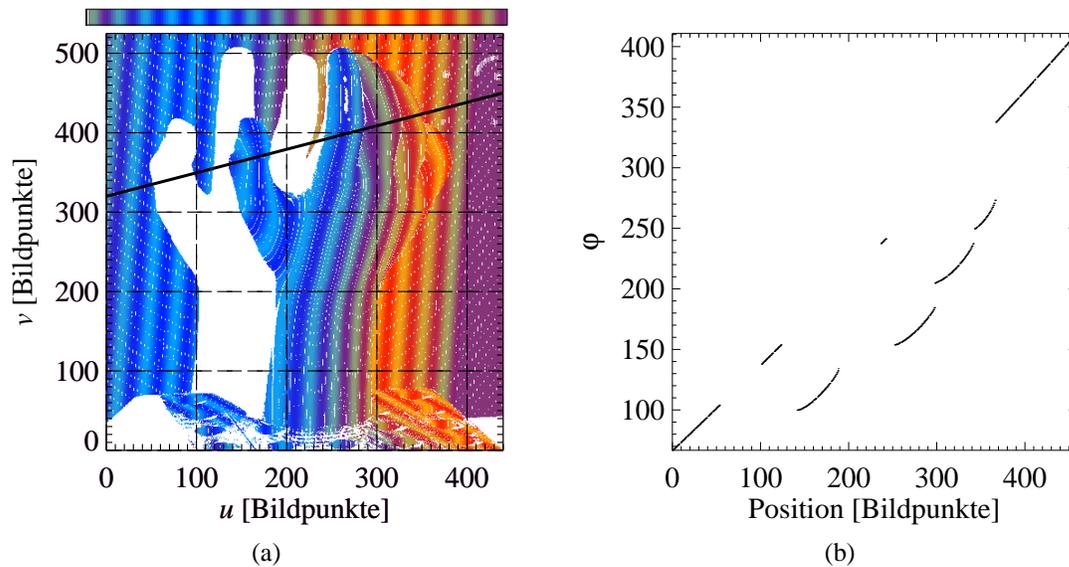
### 3.3 Kamerakalibrierung

Die geometrische Kalibrierung einer Kamera mit photogrammetrischen Methoden ist im Prinzip Stand der Technik. Beim *Ganymed* System benutzt man hierzu einen Kalibrierkörper wie er in Abb. 3.8 gezeigt ist. Die Koordinaten der Marken auf dem Kalibrierkörper sind durch eine photogrammetrische Messung mit hoher Genauigkeit bekannt ( $3\sigma \leq 10 \mu\text{m}$ ). Der Kalibrierkörper stellt somit das Längennormal und ein bekanntes Koordinatensystem für die Kalibrierung zur Verfügung.

In Abb. 3.9 ist das Prozess-Diagramm der gesamten Kalibrierung dargestellt. Für die Kamerakalibrierung wird ein Satz Aufnahmen vom Kalibrierkörper in verschiedenen Positionen und Lagen angefertigt. Die Bildkoordinaten werden ausgemessen und die Passmarken durch ihre Codes identifiziert. Im anschließenden Bündelausgleich werden nun die äußeren Orientierungen der Kamera im Koordinatensystem der Kalibrierplatte, die gesuchte innere Orientierung der Kamera und die 3D-Koordinaten der Kalibrierplatte bestimmt. Die äußeren Orientierungen werden nicht weiter verwendet. Die Neuberechnung der Passmarkenkoordinaten ist zwar



**Abbildung 3.9:** Das Prozess-Diagramm der Kalibrierung. Oben rechts befindet sich die Kamerakalibrierung, links und unten die System- und Projektorkalibrierung.



**Abbildung 3.10:** In a) ist das  $\zeta$ -Bild einer Puppen-Hand vor einer ebenen Platte dargestellt. Die Lücken in den Daten entstehen durch die Abschattung des projizierten Lichts. b) zeigt den Verlauf der Objektphase  $\varphi$  entlang der in a) eingezeichneten Profillinie. Der Zusammenhang zwischen  $\varphi$  und  $\zeta$  ist in (3.19) gegeben.

im Prinzip nicht notwendig, führt aber zu einer größeren Toleranz der Bündelausgleichung gegenüber Messfehlern in den Bildkoordinaten. Die innere Orientierung wird schließlich an die Systemkalibrierung weitergegeben.

## 3.4 Systemkalibrierung

Als Systemkalibrierung bezeichnet man die Bestimmung der äußeren Orientierung von Kamera und Streifenprojektor sowie der inneren Orientierung des Projektors (Luhmann 2000, Kap. 7.2.1.6). Die Systemkalibrierung setzt eine bereits kalibrierte Kamera voraus. Wie bereits von Malz (1995) und Valkenburg und McIvor (1998) gezeigt wurde, kann ein Projektor kalibriert werden, indem er als inverse Kamera aufgefasst wird. Dabei bringt man zusätzlich zu den Bildkoordinaten die in diesem Fall bekannten zugehörigen Objektkoordinaten in den Bündelausgleich ein. Das Verfahren zur Bestimmung der Objektkoordinaten eines räumlich ausgedehnten Kalibrierkörpers ist entscheidend für die praktische Durchführbarkeit der Kalibrierung.

Da die Bildkoordinaten des Projektors nur indirekt bestimmt werden, spricht man auch von den *virtuellen* Projektorkoordinaten  $\zeta$  und  $\xi$ . Für die Konvergenz der Verfahren ist es wichtig für  $\xi$  eine brauchbare Schätzung zu haben.

### 3.4.1 Virtuelle Projektorkoordinaten

Über die Dekodierung der zeitlich modulierten Beleuchtungssequenz lässt sich jedem Bildpunkt der Kamera eine „Streifennummer“ des Projektors zuordnen. Diese Streifennummer bezeichnet man als  $\zeta$ -Koordinate. Bei der Hybrid-Kodierung liefert der Gray-Kode den diskreten, das Phasenschieben den kontinuierlichen Anteil von  $\zeta$ . Da man zu jedem Bildelement der Kamera

einen  $\zeta$ -Wert erhält, legt man die  $\zeta$ -Werte am günstigsten in einer zum Kamerabild analogen Matrixstruktur  $\zeta(u, v)$  ab. Das  $\zeta$ -Bild einer ebenen Platte hat von links nach rechts nahezu linear ansteigende  $\zeta$ -Werte, da die Streifenzählung im Kamerabild ebenfalls von links nach rechts läuft. Abbildung 3.10 zeigt das  $\zeta$ -Bild das bei der Vermessung einer Puppen-Hand entsteht.

Eine alternative Darstellungsform von  $\zeta$  ist die so genannte *Objektphase*  $\varphi$ . Während  $\zeta$  eine willkürliche Skalierung hat, durchläuft  $\varphi$  einen Bereich von  $2\pi$  über einer Periode des Phasenschiebemusters. Für den *Ganymed* Sensor lautet der Zusammenhang:

$$\varphi = \frac{\zeta}{512} \cdot 2\pi \quad (3.19)$$

Um für die Kalibrierung geeignete hoch-genaue  $\zeta$ -Koordinaten zu erhalten, bestimmt man, ähnlich wie bei der Messung der Bildkoordinaten der photogrammetrischen Marken, eine sub-pixelgenaue Sub- $\zeta$ -Koordinate zu jeder photogrammetrischen Passmarke im Kamera-Bild. Da die räumliche Anordnung der Marken im Koordinatensystem des Kalibrierkörpers bekannt ist, hat man so für eine Messung die Zuordnung zwischen  $\zeta$ -Koordinate und Objektpunkt.

### 3.4.2 Innere und äußere Projektor-Orientierung

Die Terme für die Abbildungskorrekturen sind nicht nur von  $\zeta$ , sondern auch von der unbekanntem Projektorkoordinate  $\xi$  abhängig. Es gab Ansätze  $\xi$  mit speziellen Projektoren zu bestimmen, die gekreuzte Streifenmuster projizieren können (Strutz 1993). Aber zum Einen ist dies nicht mit jeder Projektionstechnologie möglich – man denke an LCD-Streifen-Projektoren oder Projektoren mit Zylinderoptik – zum Anderen ist diese Information auch nicht für das Messen mit dem kalibrierten System notwendig. Das legt den Schluss nahe, dass sich die gesuchten Systemparameter auch mit nur sehr geringem Wissen über  $\xi$  bestimmen lassen sollten (Wiora 2000).

Dies wird anschaulich, wenn man sich einen Projektor mit einer perfekten Zylinder-Optik vorstellt: Bei einer Rotation<sup>1</sup> des Projektors um die  $\hat{u}$ -Achse oder einer Translation entlang  $\hat{v}$  verändert sich das projizierte Muster in keiner Weise. In der Realität existiert natürlich keine solche Optik. Darum müssen die Parameter für die Verzeichnungskorrekturen bestimmt werden. Hier hilft es, die Beobachtungen in der Bündelausgleichung entsprechend ihres Informationsgehaltes bzw. ihrer Zuverlässigkeit zu gewichten. Setzt man die Gewichtung für  $\zeta$  deutlich höher als für  $\xi$ , kann man  $\xi$  durch sehr ungefähre Schätzwerte approximieren.

Veranschaulicht man sich das an der Analogie zwischen Kamera und Projektor, entspricht das einer Kamera mit sehr schmalen, langen Bildelementen, die nur in eine Richtung genaue Lageinformation liefern kann. In den Bündelausgleich fließt somit über die geschätzte  $\xi$ -Koordinate nur die Information über „Oben“ und „Unten“ ein. Für ein stabiles Konvergenzverhalten des Gleichungssystems ist das völlig ausreichend. Dieses Vorgehen führt zwar zu relativ großen Residuen für die äußeren Orientierungsparameter  $\phi^{(p)}$ ,  $\kappa^{(p)}$  und  $y_c^{(p)}$  des Projektors, das hat aber nicht unbedingt einen Einfluss auf die resultierende Messgenauigkeit, da das gesamte Modell Überbestimmungen aufweist.

<sup>1</sup>Für die weiteren Erläuterungen wird davon ausgegangen, dass Kamera und Projektor so montiert sind, dass ihre  $\hat{v}$ -Vektoren nahezu parallel sind und die Projektorstreifen parallel zu  $\hat{v}$  verlaufen.  $\zeta$  läuft also entlang  $\hat{u}$  und  $\xi$  entlang  $\hat{v}$ .

Die in Tab. 3.2 aufgeführten Parameter für die innere Orientierung, die bei der Kamera eingesetzt wurden sind nicht alle für den Projektor brauchbar. Einige Parameter wie das Aspektverhältnis der virtuellen Bildelemente des Projektors und die Hauptpunktlage in  $\xi$  entfallen, da sie für den Projektor keine Bedeutung haben. Bei den Verzeichnungskorrekturen ist dieser Zusammenhang jedoch nicht so offensichtlich. Darum werden die notwendigen Parameter in Abschnitt 3.4.5 empirisch bestimmt.

### 3.4.3 Virtueller Kalibrierkörper

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, wie sich der Zusammenhang zwischen Objektkoordinaten und virtuellen Projektorkoordinaten für *eine* Messung herstellen lässt. Verfügte man über einen 3-dimensionalen Kalibrierkörper, der das gesamte Messvolumen mit photogrammetrischen Marken ausfüllt, so würde das für die Systemkalibrierung ausreichen.

#### 3.4.3.1 Motivation

Ein echter 3-dimensionaler Kalibrierkörper ist, abgesehen von den Herstellungskosten, nur schwer so zu konstruieren, dass er befriedigende Ergebnisse liefert: Entweder wäre das Messvolumen nur ungenügend mit Marken ausgefüllt oder die Marken würden sich gegenseitig verdecken.

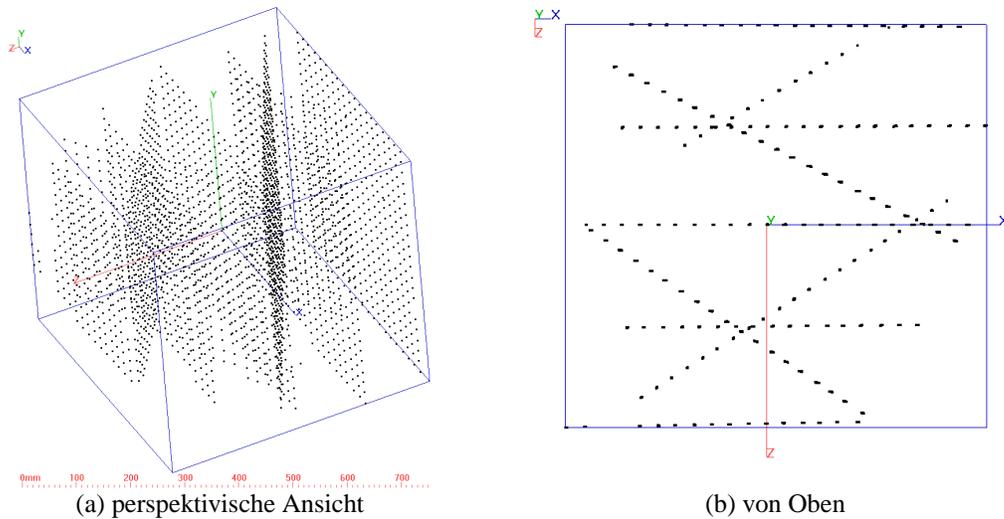
Dieses Problem kann man durch die Verwendung eines *virtuellen Kalibrierkörpers* umgehen: Aus mehreren Einzelmessungen eines einfachen (flachen) Kalibrierkörpers wird ein räumlicher Kalibrierkörper zusammengesetzt. Dazu benötigt man die relative räumliche Orientierung des Kalibrierkörpers in den einzelnen Messungen. Es gab Ansätze, dieses Wissen über eine präzise mechanische Verfahrereinheit zu gewinnen (Breuckmann, Klaas und Halbauer 1996). Dadurch verliert man aber wieder den Vorteil des einfachen mechanischen Aufbaus. Außerdem sind solche Verfahrereinheiten wegen ihrer stabilen Konstruktion im Gegensatz zum Messsystem nur schwer transportierbar, was eine Vor-Ort-Kalibrierung unmöglich macht. Die Philosophie eines *freifliegenden* Sensors würde so konterkariert.

#### 3.4.3.2 Relative Orientierung

Die Information über die relative Orientierung der Einzelmessungen lässt sich mit Hilfe der bereits kalibrierten Kamera gewinnen. Dazu nimmt man korrespondierend zu jeder Streifenprojektionsmessung des Kalibrierkörpers ein Grau-Bild mit der Kamera auf und berechnet aus den Kalibrierparametern der Kamera und den bekannten 3D-Koordinaten der Marken einen photogrammetrischen *Rückwärtsschnitt*. Als Ergebnis erhält man für jede Positionsnummer  $i$  der Kalibrierplatte die Stationsmatrix  $\mathcal{S}_i$  der Kamera im Koordinatensystem der Kalibrierplatte.

Das Ziel ist, die 3D-Koordinaten der Marken aus dem Koordinatensystem der Station  $\mathcal{S}_i$  in das Koordinatensystem einer willkürlich definierten Referenz-Station  $\mathcal{S}_0$  zu transformieren. Mit der Abkürzung

$$\mathcal{R}_i = \mathcal{M}_i^{-1} \cdot \mathcal{M}_0 \quad (3.20)$$



**Abbildung 3.11:** Der virtuelle Kalibrierkörper: Jeder Punkt entspricht einer photogrammetrischen Passmarke. Die Z-Achse weist zum Projektor. (a) Zeigt eine perspektivische Ansicht. In (b) ist die Anordnung des flachen Kalibrierkörpers in den neun Einzelmessungen deutlich zu erkennen.

lautet die Transformation, die einen Punkt  $\mathbf{P}$  in das Referenz-Koordinatensystem transformiert:

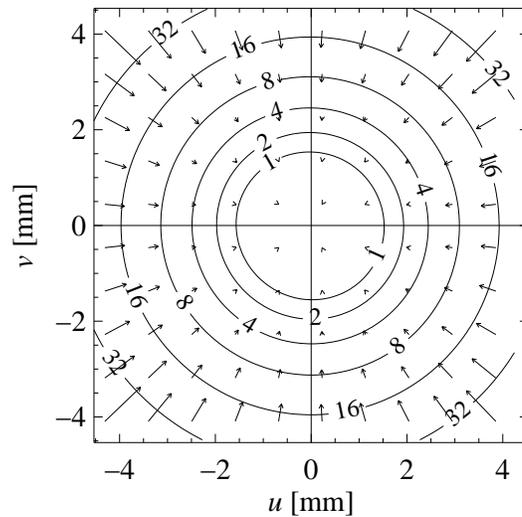
$$\mathbf{P}' = \mathcal{R}_i \cdot \mathbf{P} - \mathcal{R}_i \cdot \left( \mathcal{R}_i \cdot \mathbf{X}_0^{(i)} \right) + 2 \cdot \left( \mathcal{M}_i^{-1} \cdot \mathbf{X}_0^{(0)} + \mathbf{X}_0^{(i)} \right) \quad (3.21)$$

### 3.4.4 Ablauf der Systemkalibrierung

Der virtuelle Kalibrierkörper muss nun aus mehreren Ansichten zusammengesetzt werden. Dazu wird zunächst die Referenz-Position festgelegt. Das sollte mit einer gewissen Sorgfalt erfolgen, da dadurch das Sensorkoordinatensystem definiert wird. Beim *Ganymed* System befindet sich der Ursprung des Koordinatensystems in der Mitte der Kalibrierplatte (s. Abb. 3.8). Die Kalibrierplatte wird in der Referenz-Position so aufgestellt, dass die  $z$ -Achse, die senkrecht auf der Platte steht, „genau“ auf den Projektor zeigt und die Entfernung zum Objektiv dem mittleren Messabstand entspricht. „Genau“ bedeutet allerdings nicht, dass man dafür eine Präzisionspositioniereinrichtung benötigt, sondern lediglich die manuell erzielbare Genauigkeit von wenigen Zentimetern. Der Ursprung des Sensorkoordinatensystems befindet sich bei dieser Aufstellung etwa in der Mitte des Messvolumens.

Nun fertigt man in der Referenz-Position und in fünf bis zehn weiteren Positionen  $\zeta$ -Bilder und Grau-Bilder der Kalibrierplatte an und bestimmt sowohl die Bildkoordinaten der Passmarken als auch die zugehörigen sub- $\zeta$ -Koordinaten. Auf den Passmarkenkoordinaten berechnet man dann den Rückwärtsschnitt, der schließlich für die Berechnung der relativen Orientierung benötigt wird. Die Station  $\mathcal{S}_0$  der Referenz-Position bestimmt die äußere Orientierung der Kamera im Sensorkoordinatensystem.

Für jede Position der Kalibrierplatte werden die 3D-Koordinaten der Passmarken in das Sensorkoordinatensystem transformiert. Da am Ende alle Koordinaten in einer Liste stehen sollen, müssen ihre Identifizierungen noch mit einem positionsspezifischen Präfix versehen werden.



**Abbildung 3.12:** Die Verzeichnungskorrektur des Kameramodells. Die Zahlen an den Isolinien geben den Betrag der Korrektur in Mikrometern an. Die Länge der Pfeile entspricht der fünfzehnfachen Länge der Korrektur.

Das gilt auch für die zugehörigen Sub- $\zeta$ -Koordinaten. Auf diese Art und Weise gewinnt man schließlich einen virtuellen Kalibrierkörper, der das ganze Messvolumen ausfüllt (Abb. 3.11).

Mit Hilfe der 1-Bild-Kalibrierung werden schließlich aus der Liste der 3D-Koordinaten im Sensorkoordinatensystem und den sub- $\zeta$ -Koordinaten die äußere und innere Orientierung des Projektors bestimmt. Durch dieses Vorgehen fließt ganz zwanglos die Nebenbedingung ein, dass Kamera und Projektor in einem starren Aufbau verbunden sind.

### 3.4.5 Ergebnisse der geometrischen Kalibrierung

Die Qualität der Kalibrierung wurde im Wesentlichen an zwei Kriterien überprüft: Zum Einen an den Residuen und Standardabweichungen der berechneten Modellparameter als Maß für die innere Konsistenz der Modelle und zum Anderen an den Ergebnissen der Vermessung eines Ebenheitsnormals.

Das Messsystem hatte einen mittleren Messabstand von 1000 mm und ein Messvolumen von  $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$ . Der Triangulationswinkel zwischen Kamera und Projektor lag bei  $22^\circ$ . Die Kamera war mit einem 20 mm Objektiv und der Projektor mit einem 24 mm Objektiv von Nikon bestückt.

#### 3.4.5.1 Kamerakalibrierung

Die Ergebnisse einer Kamerakalibrierung aus 24 Aufnahmen der Kalibrierplatte sind in Tab. 3.3 aufgeführt. Der Verzeichnungsparameter  $k_3$  wurde aus dem Modell eliminiert, da er nicht signifikant war. Den Effekt der Verzeichnungskorrekturen sieht man in Abb. 3.12. Es dominieren die radialsymmetrischen Anteile  $k_1$  und  $k_2$ , die Scherung  $a_1$  und die asymmetrischen Korrekturterme  $p_1$  und  $p_2$  fallen kaum ins Gewicht. Die maximale Korrektur in den Eckpunkten des

äußere Orientierung			innere Orientierung		
$x_0^{(k)}$	-396,4204 mm	$\pm 15,3\mu\text{m}$	$h_x^{(k)}$	258,212 $\mu\text{m}$	$\pm 0,254 \mu\text{m}$
$y_0^{(k)}$	4,3563 mm	$\pm 17,7\mu\text{m}$	$h_y^{(k)}$	21,971 $\mu\text{m}$	$\pm 0,192 \mu\text{m}$
$z_0^{(k)}$	987,1214 mm	$\pm 11,2\mu\text{m}$	$s_x^{(k)}$	8,998 $\mu\text{m}$	$\pm 1,633 \text{ nm}$
$\omega^{(k)}$	0,587325°	$\pm 0,001009^\circ$	$c^{(k)}$	20,6928 mm	$\pm 0,49 \mu\text{m}$
$\phi^{(k)}$	23,420657°	$\pm 0,000951^\circ$	$a_1^{(k)}$	$-1,153 \cdot 10^{-5}$	$\pm 4,863 \cdot 10^{-7}$
$\kappa^{(k)}$	0,214843°	$\pm 0,000031^\circ$	$k_1^{(k)}$	$-2,701 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,422 \cdot 10^{-7}$
			$k_2^{(k)}$	$6,575 \cdot 10^{-7}$	$\pm 5,502 \cdot 10^{-9}$
			$p_1^{(k)}$	$-5,843 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1,823 \cdot 10^{-7}$
			$p_2^{(k)}$	$-2,198 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1,635 \cdot 10^{-7}$

**Tabelle 3.3:** Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Kamerakalibrierung für die innere und äußere Orientierung mit Standardabweichungen. Die Bildpunkt-Residuen  $\Delta u$  und  $\Delta v$ , die nach der Bündelausgleichung aus der Differenz zwischen den Bildkoordinaten der *rückprojizierten* Objektkoordinaten und den *gemessenen* Bildkoordinaten berechnet werden, betragen jeweils 0,11  $\mu\text{m}$ . Das entspricht 1/81 Bildpunkt.

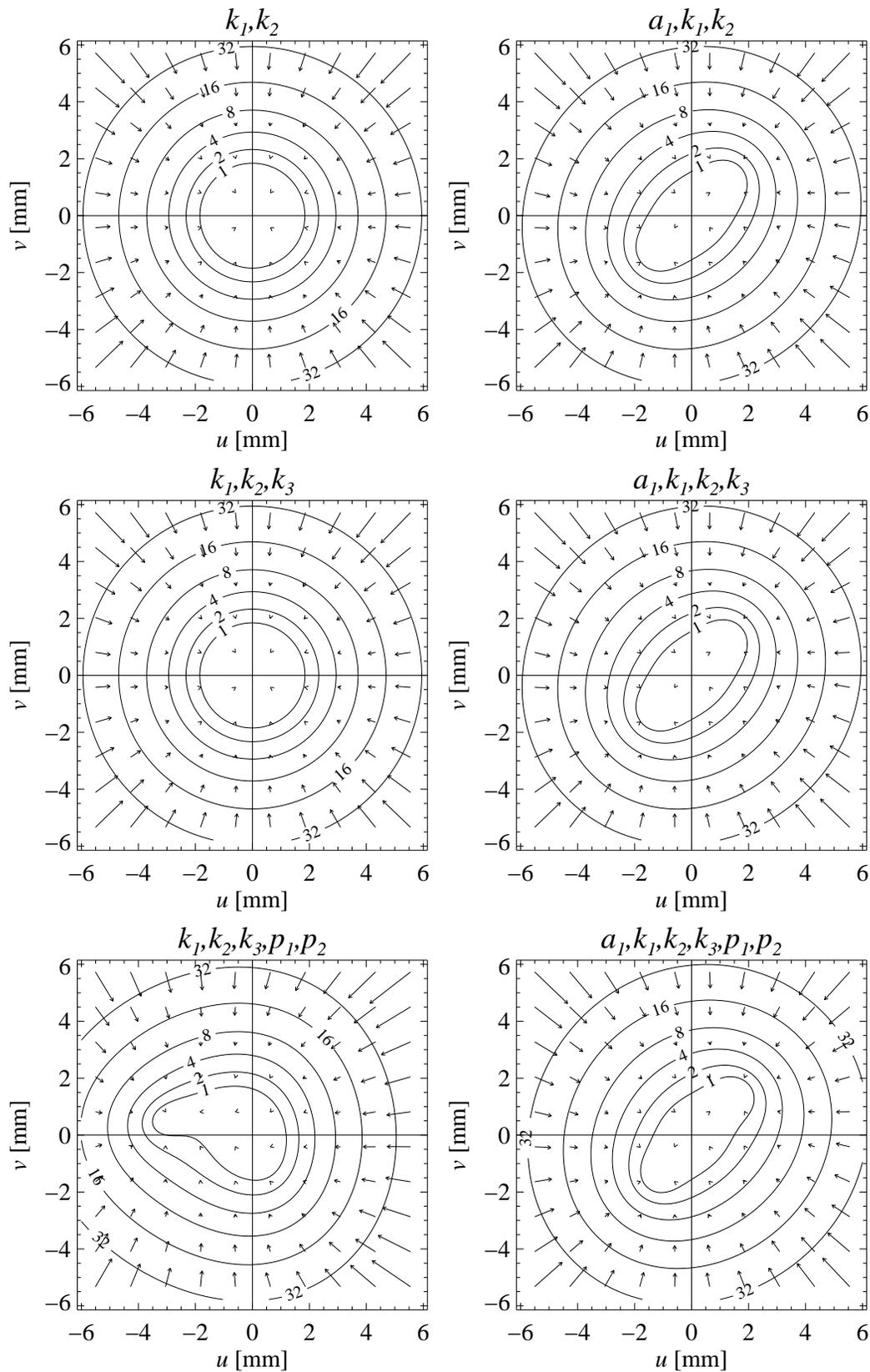
Bildes beträgt 5,72 Bildpunkte, das entspricht 51,5  $\mu\text{m}$ . Diese Ergebnisse liegen im Rahmen des technischen Standards ([Abraham und Förstner 1997](#)).

### 3.4.5.2 Systemkalibrierung

**Wahl des Projektormodells:** Wie bereits erwähnt, erfolgt die Auswahl des Projektormodells empirisch. Um die Qualität eines Modells beurteilen zu können, benötigt man ein geeignetes Testverfahren. Man wünscht sich eine möglichst isotrope Abbildung der Objektpunkte der realen Welt in das Koordinatensystem des Sensors. Da es sich um ein flächenhaft messendes Verfahren handelt, ist ein Test dieser Abbildungsfunktion immer nur auf der Schnittfläche von Testkörper und Messvolumen möglich. Das einfachste Verfahren stellt daher die Messung auf einem ebenen Testkörper dar. Legt man eine Ausgleichsebene durch die gemessenen 3D-Punkte des Testkörpers, so ist der euklidische Abstand der Punkte von der Ausgleichsebene ein Maß für die Qualität der Abbildung. Mit diesem Verfahren kann man zwar keinen isotropen Skalierungsfehler erkennen, aber ein solcher ist leicht durch Messung eines photogrammetrisch geeichten Längennormals zu bestimmen und trivial durch umskalieren des Sensorkoordinatensystems zu beseitigen.

**Ebenheitsmessung:** Um das am besten geeignete Kameramodell für den Streifenprojektor auszuwählen, wurde die Systemkalibrierung mit *einem* Satz Kalibrieraufnahmen für jedes der zu untersuchenden Projektormodelle bestimmt. Anschließend wurde eine 3D-Messung eines Ebenheitsnormals durchgeführt und bis zum  $\zeta$ -Bild ausgewertet. Aus dem  $\zeta$ -Bild wurde schließlich mit jeder Kalibrierung eine 3D-*Punktwolke* des Testkörpers berechnet.

Da die Systemkalibrierung nur räumlich niederfrequente Störungen erfasst, werden auch nur diese in den Messdaten untersucht. Dazu reduziert man die *Punktwolke* durch Mitteln von benachbarten Punkten. Das entspricht einer Tiefpassfilterung. In die reduzierte *Punktwolke*



**Abbildung 3.13:** Die Verzeichnungskorrekturen der untersuchten Kameramodelle des Projektors. Die Zahlen an den Isolinien geben den Betrag der Korrektur in Mikrometern an. Die Länge der Pfeile entspricht der fünfzehnfachen Länge der Korrektur.

legt man schließlich mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eine Ausgleichsebene. Danach kann man für jeden Punkt den euklidischen Abstand zur Ausgleichsebene bestimmen und diesen über seiner  $(u, v)$  Bildkoordinate auftragen.

Als Maß für die Eignung eines Modells dient schließlich die so genannte 95%-Breite  $\sigma_{95}$  der Häufigkeitsverteilung des Betrags der Abstände. Das ist die Umgebung der Ausgleichsebene, innerhalb der sich 95% der Messpunkte befinden<sup>2</sup>. Die Punkte, die sich weiter weg befinden, können mit diesem Ergebnis identifiziert und anhand ihrer Bildkoordinaten bei jeder Messung ausgeblendet werden.

**Das optimale Modell:** Die für den Streifenprojektor untersuchten Kameramodelle unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Verzeichnungskorrekturterme. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Kombinationen aufgeführt. In der letzten Spalte ist jeweils das Resultat der Ebenheitsmessung angegeben:

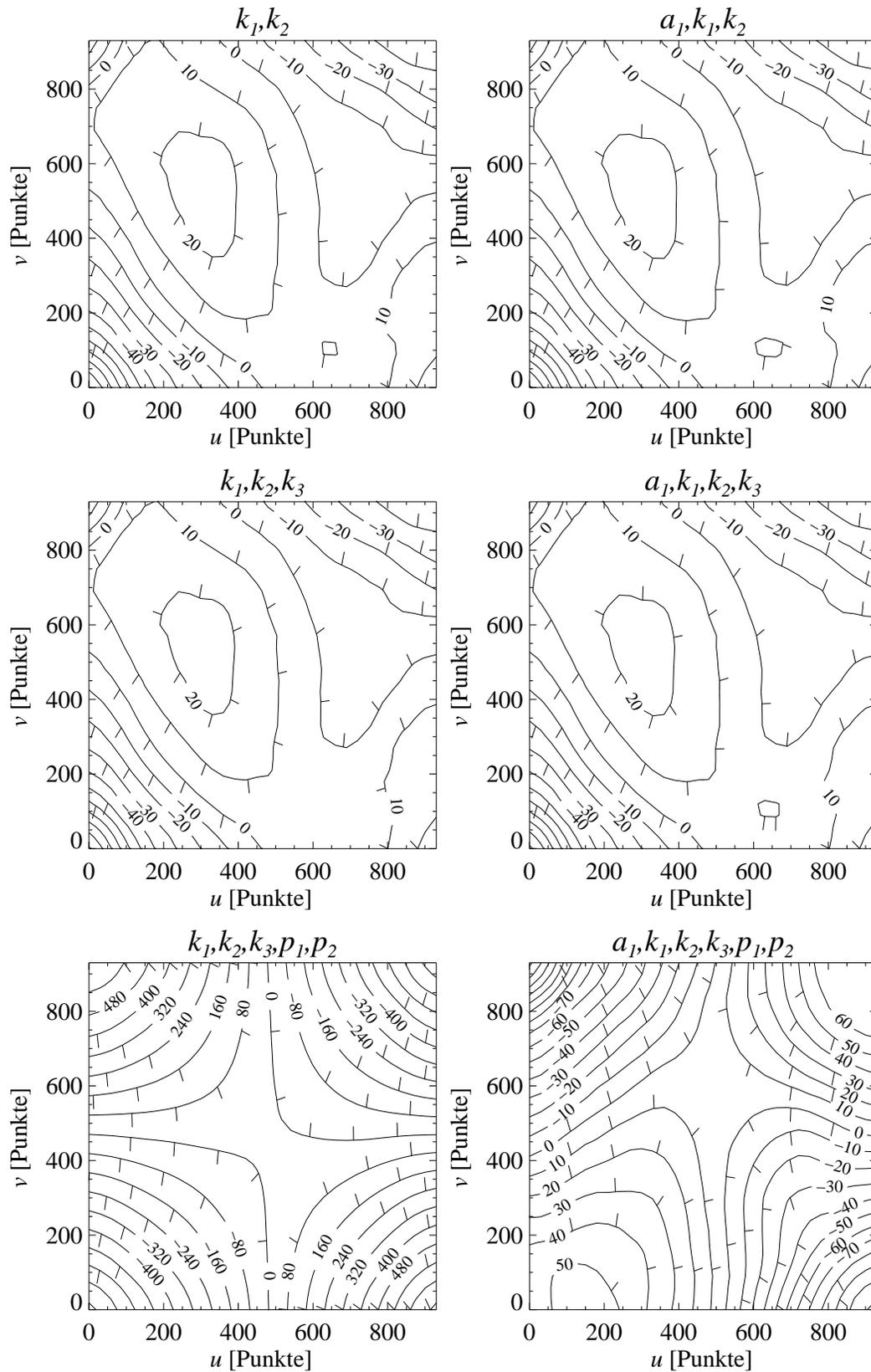
Modell- nummer	Parameter						95%-Breite $\sigma_{95}$
	$a_1$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$p_1$	$p_2$	
1		•	•				37,8 $\mu\text{m}$
2		•	•	•			37,5 $\mu\text{m}$
3		•	•	•	•	•	583,0 $\mu\text{m}$
4	•	•	•				37,7 $\mu\text{m}$
5	•	•	•	•			37,8 $\mu\text{m}$
6	•	•	•	•	•	•	82,2 $\mu\text{m}$

Die zugehörigen Verzeichnungskorrekturen sind in Abb. 3.13 dargestellt. Es fällt sofort auf, dass die Ergebnisse, trotz großer Unterschiede der Korrekturen, sehr nahe beieinander liegen. Lediglich die Modelle 3 und 6 weisen eine deutlich schlechtere Ebenheit als die restlichen Modelle auf. Die Ursache liegt in der Überbestimmung des photogrammetrischen Systemmodells. So kann zum Beispiel ein Fehler in der Scherungskorrektur, dessen physikalische Motivation eine Abweichung der optischen Achse vom Lot auf die Bildebene ist, zum Teil durch eine Anpassung der äußeren Orientierung korrigiert werden. Dieses Phänomen äußert sich auch darin, dass alle Systemkalibrierungen fast identische Residuen  $\Delta\zeta \approx 0,52 \mu\text{m}$  lieferten.

Als zusätzliches Entscheidungskriterium diene darum neben  $\sigma_{95}$  die Lage der Abweichungen. Da Messobjekte meist in der Mitte des Messvolumens positioniert werden, sollte die Qualität dort am besten sein. Ebenso sollten Punkte, die Aufgrund des  $\sigma_{95}$ -Kriteriums ausgeblendet werden möglichst in den Bildecken liegen. Der Verlauf der Ebenheitsabweichung über den Bildkoordinaten ist in Abb. 3.14 für alle Modelle dargestellt.

*Auf der Basis der genannten Kriterien wurde Modell 2, das nur die radialsymmetrischen Korrekturterme enthält, als optimales Modell für den Streifenprojektor des Ganymed Systems ausgewählt. Die Ebenheit  $\sigma_{95}$  betrug bei diesem Modell 37,5  $\mu\text{m}$ .*

<sup>2</sup>Der Standardabweichung vom Mittelwert entspräche  $\sigma_{66}$



**Abbildung 3.14:** Bestimmung der Ebenheitsabweichung des Sensors für alle Projektormodelle. Die Zahlen auf den Konturlinien geben den euklidischen Abstand der Messwerte zur Ausgleichsebene in Mikrometern an. Über den Bildern sind jeweils die benutzten Modellparameter angegeben.

äußere Orientierung			innere Orientierung		
$x_0^{(p)}$	29,9610 mm	$\pm 2,0 \mu\text{m}$	$h_\zeta^{(p)}$	213,7 $\mu\text{m}$	
$y_0^{(p)}$	11,0287 mm	$\pm 39,7 \mu\text{m}$	$c^{(p)}$	24,6312 mm	
$z_0^{(p)}$	1045,2776 mm	$\pm 18,3 \mu\text{m}$	$k_1^{(p)}$	$-1,588 \cdot 10^{-4}$	$\pm \approx 10^{-5}$
$\omega^{(p)}$	1,034902°	$\pm 0,001039^\circ$	$k_2^{(p)}$	$1,703 \cdot 10^{-7}$	$\pm \approx 10^{-8}$
$\phi^{(p)}$	1,474650°	$\pm 0,001217^\circ$	$k_3^{(p)}$	$4,552 \cdot 10^{-10}$	$\pm \approx 10^{-10}$
$\kappa^{(p)}$	90,289312°	$\pm 0,000123^\circ$			

**Tabelle 3.4:** Die Tabelle zeigt die Residuen und Standardabweichungen der Systemkalibrierung. Das Bildkoordinatenresiduum  $\Delta\zeta$ , das nach der Einbildkalibrierung aus der Differenz zwischen den Bildkoordinaten der *rückprojizierten* Objektkoordinaten und den *gemessenen* Bildkoordinaten berechnet wird, betrug  $\Delta\zeta = 0,52 \mu\text{m}$ . Das entspricht 1/184 Periode des projizierten Sinusmusters.

**Projektororientierung:** Schließlich sind in Tab. 3.4 die Resultate der Einbildkalibrierung für den Projektor dargestellt. Vergleicht man die äußere Orientierung mit der der Kamera aus Tab. 3.3, so zeigt sich, dass die Standardabweichungen in der gleichen Größenordnung liegen. Obwohl die Projektorparameter durch den virtuellen Kalibrierkörper alle an die Qualität der Kamerakalibrierung gekoppelt sind, äußert sich das nicht nachteilig im Ergebnis der Projektorkalibrierung.

# Kapitel 4

## Streifenprojektion

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine Methode zur geometrischen Kalibrierung eines Streifenprojektionssensors vorgestellt, die nicht die spezifischen Details der Streifenprojektion berücksichtigt, sondern nur räumlich niederfrequente Phänomene erfasst. In diesem Kapitel werden, nach der Erläuterung der notwendigen Grundlagen, Methoden dargestellt, die die robuste und präzise Messung der *Objektphase*  $\zeta$  sowie die Korrektur hochfrequenter systematischer Fehler erlauben.

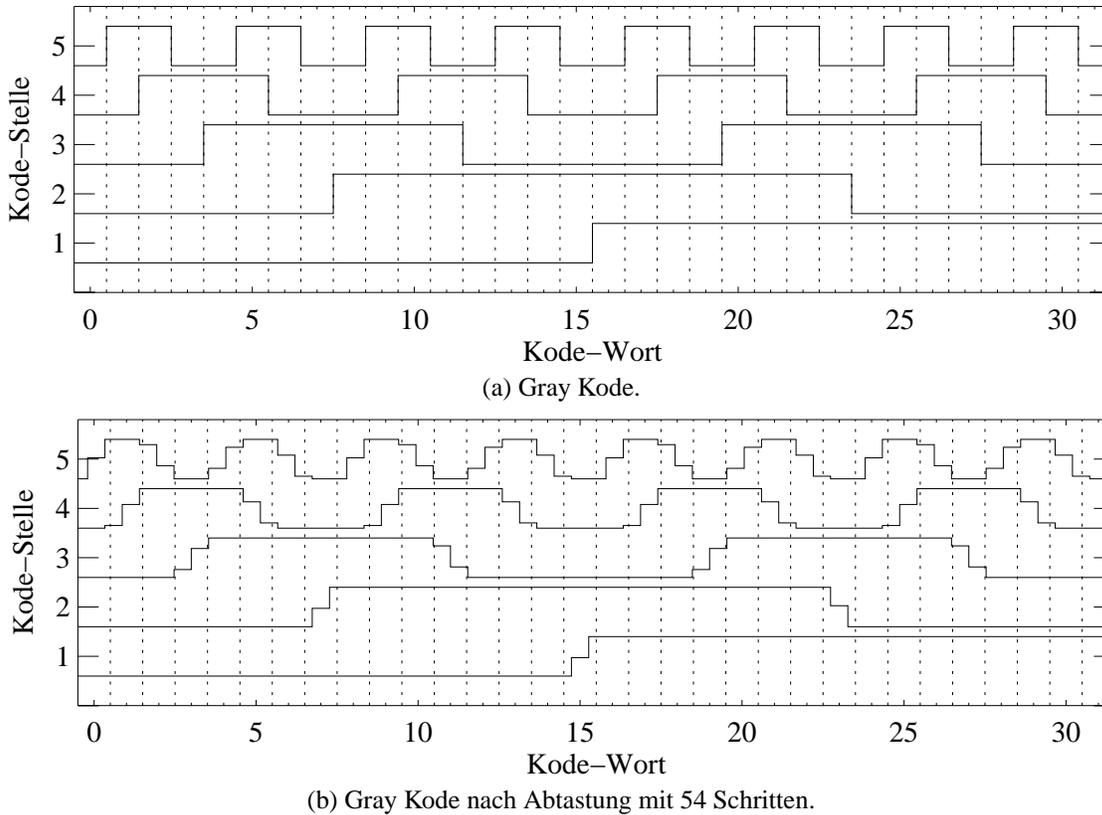
Die Erfassung von Oberflächenformen mit dem Streifenprojektionsverfahren basiert wie in Abschnitt 1.4.3 dargestellt auf der Triangulation einzelner Objektpunkte. Dafür muss zunächst das Korrespondenzproblem gelöst werden: Die mit zwei, wie auch immer gearteten, Sensoren gewonnenen Daten müssen bezüglich der Objektoberfläche korreliert sein. Bei Verwendung von zwei CCD-Kameras als Sensoren müssen zu einem bestimmten Objektpunkt diejenigen Pixel in beiden Kameras identifiziert werden, auf die dieser Punkt abgebildet wird. Bei Verwendung nur einer Kamera, wie im *Ganymed* System, muss zu jedem Bildpunkt der Kamera mit den Koordinaten  $(u, v)$ , die von diesem Punkt beobachtete Lichtschnittebene  $\zeta$  des Projektors identifiziert werden. Zur Lösung des Korrespondenzproblems gibt es verschiedene Verfahren.

### 4.1 Zeitliche Modulationsverfahren

Für die zeitliche Modulation der Beleuchtung zur Lösung des Korrespondenzproblems existieren verschiedene Möglichkeiten. Es gibt mehrere Freiheitsgrade für die Wahl der Kodierung: Bei einer durch die gewünschte Auflösung gegebenen Anzahl von Kodeworten kann die Anzahl der Kodestellen oder „Ziffern“, sowie die Wertigkeit der einzelnen Stellen oder das „Zahlensystem“ frei festgelegt werden. Hierbei gilt es Redundanzen zu vermeiden aber gleichzeitig eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen. [Malz \(1992\)](#) stellt eine ausführliche nachrichtentechnische Betrachtung zu diesem Thema an.

Jede zusätzliche Kodestelle bedeutet ein weiteres Bild in der zeitlichen Sequenz und somit eine entsprechend verlängerte Messzeit. Nach [Horn und Kiryati \(1997\)](#) hat eine größere Anzahl an möglichen Werten für eine Kodestelle zwar eine kürzere Kodelänge zur Folge, aber auch einen kleineren Signal-Rausch-Abstand und somit eine verringerte Robustheit gegenüber Störungen.

Die beiden Extreme sind ein binärer Kode mit nur zwei Zuständen je Kodestelle und ein



**Abbildung 4.1:** (a) Zeigt den Aufbau eines Gray-Kodes mit fünf Stellen und 32 Codewörtern. Die gestrichelten Linien markieren die Grenzen der einzelnen Codewörter. Auf jeder Grenze liegt nur eine Kante. Codewort 0 ist nicht von der Hintergrundbeleuchtung zu unterscheiden. Bei Wort 21 ist eine Normierung nicht möglich, da keine dunkle Stufe enthalten ist. Die Binarisierungsschwelle muss daher aus einer anderen Quelle bezogen werden. In (b) ist das Ergebnis einer simulierten Abtastung von (a) dargestellt: Wesentliche Differenzen zur Ursprungsfunktion treten bei einem Wort immer nur in einer Stelle auf.

analoger Kode mit unendlich vielen Zuständen. Der erste Fall liegt beim binären Gray-Kode, der zweite Fall beim Phasenschieben vor.

Einen guten Kompromiss zwischen Robustheit und Auflösungsvermögen erreicht man, wenn man binäre und analoge Kodierungen kombiniert. Wie bereits in (Malz 1992, Kap. A1) vorgeschlagen, wird im *Ganymed* System ein binärer Gray-Kode mit  $p = 8$  Stellen und ein vierfach Phasenschiebe-Kode mit 128 Perioden eingesetzt. In den beiden folgenden Abschnitten werden die Probleme und Grenzen dieser Verfahren im Detail erläutert.

## 4.2 Gray-Kode

Der Gray-Kode wurde bereits 1953 von Gray zum Patent angemeldet. Er erlaubt in seiner binären Form eine diskrete Identifizierung von  $n = 2^p$  Codewörtern. Sein großer Vorteil ist seine

inhärente Robustheit. Eine Fehlklassifizierung, die durch die diskrete Abtastung des Musters an den Übergangsstellen unvermeidlich ist, führt zu einer eindeutigen Zuordnung zu einem der beiden benachbarten Kodeworte. Der Grund dafür ist aus Abb. 4.1 leicht zu erkennen: Legt man alle Bilder der zeitlichen Sequenz aufeinander, so fallen nie zwei Flanken auf dieselbe Stelle. Jedes Kodewort wird von seinen Nachbarn, durch genau *eine* ansteigende oder abfallende Flanke unterschieden. Bei ausreichendem Signal-Rausch-Abstand ist eine Fehlklassifizierung nur an dieser einen Flanke im Gray-Kode möglich. Der Diskretisierungsfehler  $\Delta\zeta$  beim Gray-Kode ist also maximal eins.

### 4.2.1 Standard Dekoderalgorithmus

Die Dekodierung des Gray-Kodes  $\zeta_g$  eines Bildpunktes erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst werden die  $p$  Grauwerte  $g_i$  mit  $i \in [1..p]$  zeitgleich mit der Projektion des Muster der Stufe  $i$  mit der Kamera aufgenommen und digitalisiert. Daraus ergibt sich für jeden Bildpunkt ein Grauwert-Vektor  $\mathbf{g}$ :

$$\mathbf{g} = \{g_i | i \in [1..p]\} \quad (4.1)$$

Anschließend erfolgt die Binarisierung von  $\mathbf{g}$  mit der Schwelle  $s$ . Die Schwelle kann zwar prinzipiell aus

$$s = \frac{1}{2} \cdot (\max \mathbf{g} + \min \mathbf{g}) \quad (4.2)$$

berechnet werden, aber bei Kodewort  $k_{nn}$  des Gray-Kodes schlägt das fehl, da es keine dunkle Stufe enthält. Der Wert von  $k_{nn}$  ergibt sich aus:

$$k_{nn} = \sum_{i=1}^{(p+1)/2} 2^{p+1-2i} \quad (4.3)$$

Die Schwelle muss somit aus einer anderen Quelle entnommen werden. Hierfür bietet sich der Grauwert-Vektor  $\mathbf{p}$  der Phasenschiebe-Bilder an.

Bei der Binarisierung werden die Grauwerte von  $\mathbf{g}$  in zwei Klassen eingeteilt: Werte oberhalb der Schwelle  $s$  und Werte unterhalb von  $s$ :

$$\tilde{g}_i = \begin{cases} 1 & \text{für } g_i \geq s \\ 0 & \text{für } g_i < s \end{cases} \quad (4.4)$$

Auf  $\tilde{\mathbf{g}}$  kann schließlich der eigentliche Gray-Kode Dekoder Alg. 3 angewandt werden. Das Ergebnis ist die Nummer des Kodeworts  $k$ , also die Streifennummer.

### 4.2.2 Analyse der Fehler

Da binäre Codes und der Gray-Kode im Besonderen von sehr robuster Natur sind, sind Dekodierfehler zwar selten, aber nicht ganz auszuschließen. Die Fehler bei der Dekodierung werden durch eine falsche Klassifikation der Grauwerte  $\mathbf{g}$  bei der Binarisierung verursacht. Die Ursachen dafür können an verschiedenen Punkten im Signalpfad liegen und haben zur Folge, dass ein oder mehrere Elemente von  $\mathbf{g}$  vom richtigen Wert abweichen.

---

**Algorithmus 3:** GRAY-KODE DEKODER

<b>Input:</b> $\tilde{g}$	Grauwert-Vektor
<b>Input:</b> $p$	Anzahl der Kodestufen
1: $m \leftarrow 0$	Modul initialisieren
2: $k \leftarrow 0$	Streifennummer initialisieren
3: <b>for</b> $i \leftarrow 1$ <b>to</b> $p$ <b>do</b>	Wiederhole für alle Gray-Kode Stufen
4: $k \leftarrow 2k$	$k$ um eine Stelle nach links schieben
5: <b>if</b> $m = 0$ <b>then</b>	Falls Modul gleich 0
6: $k \leftarrow k + \tilde{g}_i$	Binärwert addieren
7: <b>else</b>	Falls Modul gleich 1
8: $k \leftarrow k + 1 - \tilde{g}_i$	Komplement des Binärwerts addieren
9: <b>end if</b>	
10: $m \leftarrow (m + \tilde{g}_i) \bmod 2$	Neues Modul berechnen
11: <b>end for</b>	
<b>Output:</b> $k$	Nummer des Kodeworts

---

Abbildung 4.2 zeigt den Signalpfad einer Gray-Kode Messung. An den Komponenten können verschiedene Störungen angreifen, die zeitlich oder räumlich veränderliche Ursachen haben. Im Einzelnen sind das:

**Lichtquelle:** Zeitliche Helligkeitsschwankungen modulieren das Signal zusätzlich zur Modulation durch den Projektor.

**Dia:** Schmutz oder Herstellungsfehler auf einzelnen Dias, unerwünschte Beugungserscheinungen an Streifenrastern und ungenaue Positionierung der Dias führen zu fehlerhaften Codes.

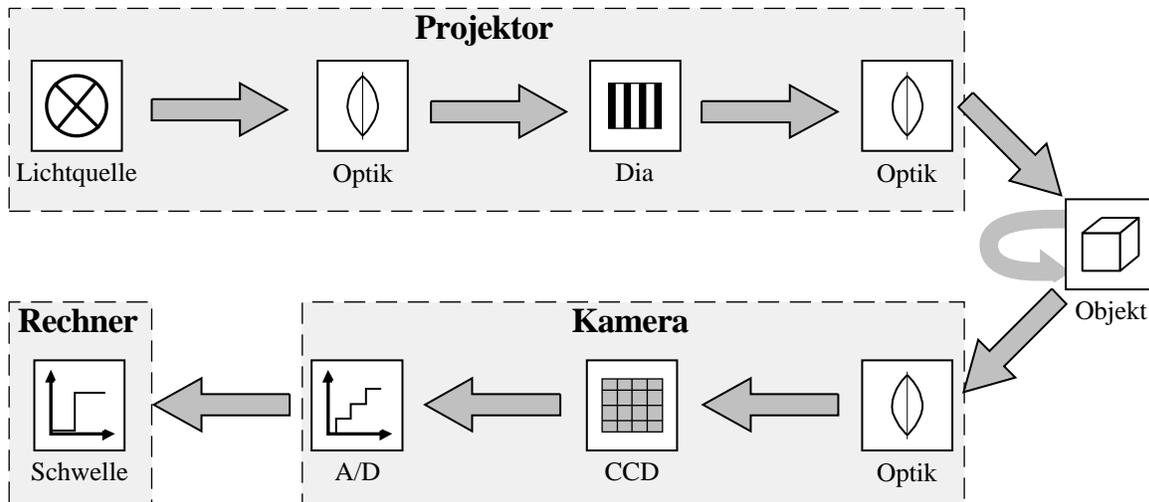
**Projektionsoptik:** Unschärfe und Apertur-bedingte Beugungsbegrenzungen reduzieren die Flankensteilheit des Gray-Kodes. Dadurch entstehen Klassifikationsfehler an den Übergängen zwischen den Codes.

**Objekt:** Mehrfachreflexionen auf dem Objekt führen zu Überlagerungen von Codes aus verschiedenen Bereichen des Dias. Oberflächennormalen die zu große Winkel zu den Sehstrahlen von Kamera und Projektor aufweisen führen dazu, dass mehrere benachbarte Codes auf einen Bildpunkt abgebildet werden.

**Kamera-Optik:** Siehe Projektionsoptik.

**CCD-Sensor:** Poissonrauschen, Ausleserauschen, Verstärkerauschen und Übersprechen zwischen benachbarten Bildpunkten bringen eine zufällige Modulation der Grauwerte ein.

**A/D-Wandler:** Das Quantisierungsrauschen verringert den Informationsgehalt des Signals. Vor allem bei kleinen Amplituden wird das Signal deutlich verschlechtert.



**Abbildung 4.2:** Der Signalpfad einer Gray-Kode-Messung. An allen Komponenten können zeitlich und räumlich veränderliche Störungen angreifen, die die Messung verfälschen.

**Binarisierung:** Ein ungünstiger Schwellwert führt zu Fehlklassifizierungen.

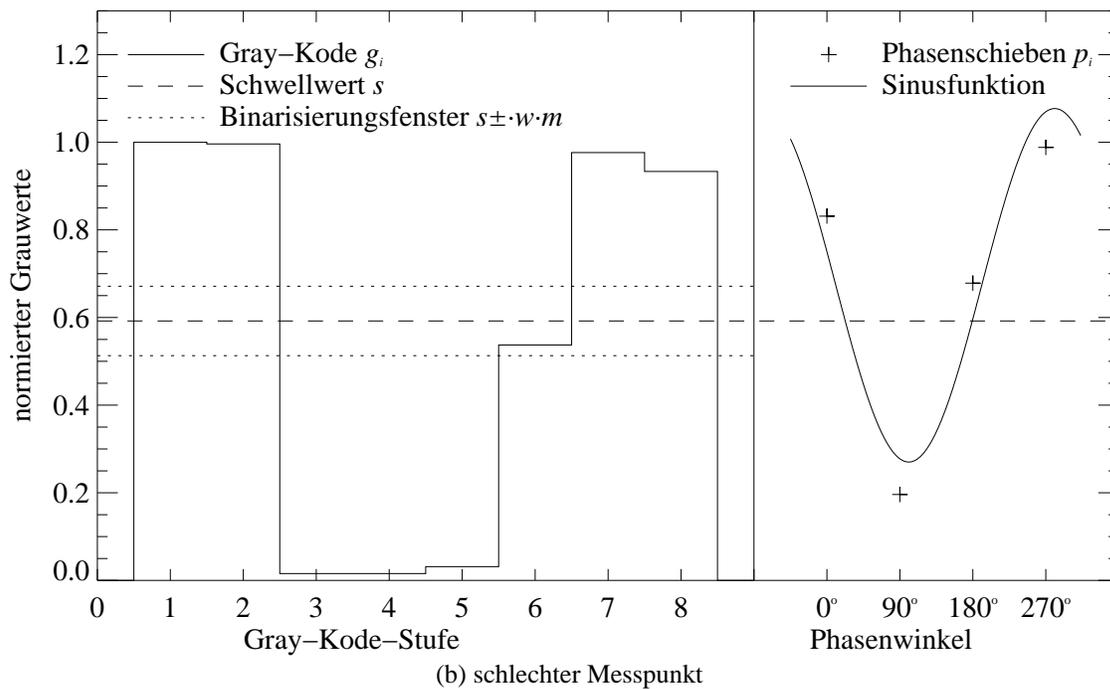
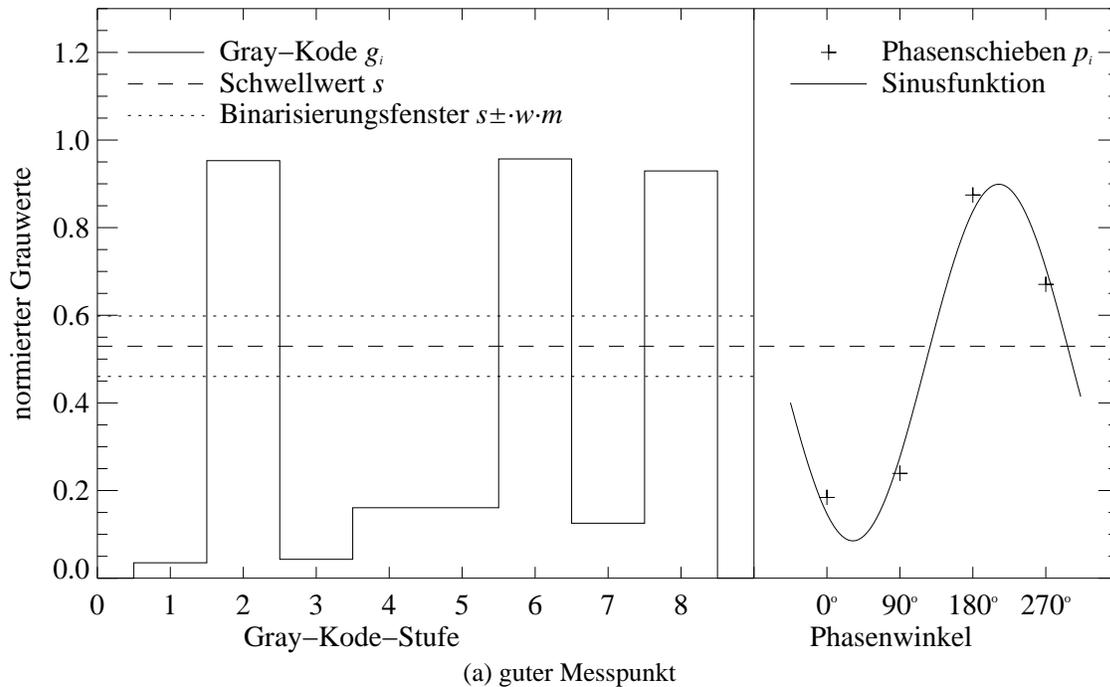
Wegen der lokalen Auswertung der Bilder kommen nur Effekte zum tragen, die eine zeitlich variierende Auswirkung auf einen Bildpunkt haben. Das *statische Rauschen* spielt daher keine Rolle. Eine radiometrische Kalibrierung ist somit für die Streifenprojektion überflüssig.

Wie sich die Effekte in der Summe auswirken zeigt das Beispiel von zwei qualitativ unterschiedlichen Grauwert-Vektoren in Abb. 4.3.

### 4.2.3 Korrekturmöglichkeiten

Generell liefern Streifenprojektionssysteme erheblich mehr Daten von einer Oberfläche, als die nachfolgenden Prozesse benötigen. Eine einzelne *Ansicht* kann rund eine Million Punkte oder mehr enthalten. Ein CAD-System, mit dem z.B. Flächen auf den gemessenen Punkten konstruiert werden sollen, kann aber nur mit wenigen hunderttausend Punkten arbeiten. Daher wendet man üblicherweise auf die 3D-*Punktwolke* geeignete Reduktionsverfahren, wie den von *Vogt (2000)* vorgestellten Multi-Resolutions-Ansatz an. Damit diese Methoden brauchbare Ergebnisse produzieren können empfiehlt sich eine Auswertestrategie, bei der alle Punkte, die *vermutlich falsch* oder *unsicher* sind, aus der Ergebnismenge entfernt werden. Dabei sollte jeder Ansatz gemieden werden, der weitergehende Annahmen über das Messobjekt, wie Ebenheit, Stetigkeit oder Anderes macht.

Der Gray-Kode besitzt selbst keinerlei Redundanz, wie z.B. ein Paritätsbit, die dazu verwendet werden könnte, einen Dekodierfehler aus der binären Information  $\tilde{g}$  oder aus dem Dekoder-Ergebnis  $k$  zu erkennen. Die Robustheit des Gray-Kodes lässt sich somit nur mit Information aus den Grauwerten  $g$  oder mit Hilfe zusätzlicher Codes erhöhen.



**Abbildung 4.3:** a) Die Grauwerte  $g_i$  und  $p_i$  von Gray-Kode und Phasenschieben für eine Messpunkt guter Qualität. Zusätzlich sind die Binarisierungsschwelle und die aus den Phasenwerten bestimmte Sinus-Funktion eingezeichnet. b) Die gleiche Darstellung für einen Messpunkt mit verzerrten Phasenschiebewerten und einem Klassifizierungsfehler im Gray-Kode.

### 4.2.3.1 Belichtungsdynamik

Der Gray-Kode ist gegen eine Überbelichtung relativ unempfindlich, so lange die Kamera eine hohe Übersteuerungsfestigkeit aufweist. Bei kleinen Signalamplituden wird die Klassifizierung der Grauwerte allerdings zunehmend unsicherer. Das durch die Analog-Digital-Wandlung verursachte Quantisierungsrauschen kann besonders bei den noch weit verbreiteten 8-Bit-Wandlern einen beträchtlichen Teil der Modulation betragen.

Der Messbereich der Kamera lässt sich trotzdem auf einfache Art und Weise erweitern. Nimmt man die Szene nicht nur bei einer Belichtungszeit  $T$ , sondern bei  $B$  verschiedenen Zeiten, die sich jeweils um einen Faktor  $\alpha < 1$  unterscheiden, auf, kann man anschließend für jeden Bildpunkt den optimalen Messbereich auswählen. Die Zeiten sind durch

$$T_b = \alpha^{b-1} \cdot T_1 \quad \text{mit } b \in [1..B] \quad (4.5)$$

gegeben. Die längste Belichtungszeit  $T_1$  legt die dunkelsten noch messbaren Bereiche fest. Der Faktor  $\alpha^{B-1}$  bestimmt, um wieviel heller die hellste messbare Stelle sein darf. Wählt man  $\alpha = 0,5$ , überlappen sich die Messwerte für einen Bildpunkt in 7 Bit. Eine Erhöhung von  $B$  um eins verdoppelt den Messbaren Intensitätsbereich.

Bei der Auswertung der Daten werden keine Grauwerte von verschiedenen Belichtungsstufen miteinander verglichen. Die Belichtungszeitsteuerung der Kamera muss also nicht sehr präzise sein.

#### Algorithmus 4: BELICHTUNGSSTUFENWAHL

<b>Input:</b> $g_{i,b}$	Grauwert-Vektoren aller Belichtungsstufen
<b>Input:</b> $g_o$	Maximal zulässiger Grauwert
<b>Input:</b> $B$	Anzahl der Belichtungsstufen
<b>Require:</b> $\alpha < 1$	Belichtungszeiten abnehmend
1: $b \leftarrow 0$	Index für Belichtungsstufe
2: <b>repeat</b>	Wiederhole für alle Belichtungsstufen
3: $b \leftarrow b + 1$	Index erhöhen
4: $g_{max} \leftarrow 0$	Maximalwert initialisieren
5: <b>for</b> $i \leftarrow 1$ <b>to</b> $p$ <b>do</b>	Wiederhole für all Gray-Kode Stufen
6: <b>if</b> $g_{i,b} > g_{max}$ <b>then</b>	Falls Grauwert größer Maximum
7: $g_{max} \leftarrow g_{i,b}$	Maximalwert aktualisieren
8: <b>end if</b>	
9: <b>end for</b>	
10: <b>until</b> $(b \geq B) \vee (g_{max} \leq g_o)$	Bis alle Stufen geprüft oder Maximum nicht übersteuert
<b>Output:</b> $b$	Index der optimalen Belichtungsstufe

Jetzt werden für jeden Bildpunkt nicht nur *ein* Vektor  $\mathbf{g}$  sondern  $B$  Vektoren  $\mathbf{g}_b$  mit den Elementen  $g_{i,b}$  gemessen. Für jeden Bildpunkt muss nun entschieden werden, welches  $\mathbf{g}_b$  für die Weiterverarbeitung verwendet wird. Der Algorithmus für diese Entscheidung lautet in Worten:

1. Suche in jedem  $g_b$  den maximalen Intensitätswert  $g_{max}$ .
2. Wähle die Belichtungsstufe mit dem größten  $g_{max}$  das nicht übersteuert ist.

Der vollständige Algorithmus ist in Alg. 4 dargestellt.

#### 4.2.3.2 Fensterdiskriminator

Bei der standardmäßigen Binarisierung aus (4.4) werden nur zwei Klassen von Grauwerten erkannt: hellere als  $s$  und dunklere als  $s$ . Dabei geht die Information über die Vertrauenswürdigkeit der Grauwerte verloren. Sinnvoller ist es, mehr als zwei Klassen zu bilden: Eine Klasse für übersteuerte (4) Werte, je eine Klasse für gültige helle (3) und dunkle (1) Werte und eine Klasse für unzuverlässige Werte (2), die zu nahe an der Schwelle  $s$  liegen.

$$\check{g}_i = \begin{cases} 4 : & \text{übersteuert} & \text{für } g_i > g_o \\ 3 : & \text{binär 1} & \text{für } g_i \geq s + \Delta s \wedge g_i \leq g_o \\ 2 : & \text{unzuverlässig} & \text{für } g_i > s - \Delta s \wedge g_i < s + \Delta s \\ 1 : & \text{binär 0} & \text{für } g_i \leq s - \Delta s \end{cases} \quad (4.6)$$

Die halbe Breite  $\Delta s$  von Klasse 2 wird zweckmäßigerweise in Abhängigkeit von der Modulation  $m$  dieses Wortes ausgedrückt.

$$\Delta s = w \cdot m \quad \text{mit } 0 \leq w < 1 \quad (4.7)$$

Geht die Breite  $w$  gegen Null, so erhält man die Standard-Binarisierung.

Der klassifizierte Grauwert-Vektor  $\check{g}$  wird nur der Gray-Dekodierung zugeführt, wenn er lediglich aus Elementen der Klassen 1 und 3 besteht, ansonsten wird er verworfen.

#### 4.2.3.3 Redundanz-Nutzung

Wird der Gray-Kode mit einem weiteren Kodierungsverfahren kombiniert, so bietet sich eine Überlappung der Wertebereiche an, da sie eine gegenseitige Überprüfung der Dekoder-Ergebnisse ermöglicht. Im *Ganymed* System ist ein 8-stufiger Gray-Kode mit einem 4-stufigen Phasenschiebe-Kode kombiniert. Die Periodenlänge des Phasenschiebemusters entspricht der Periodenlänge des feinsten Gray-Kode Musters. Die Auflösung des Gray-Kodes ist somit die halbe Periodenlänge des Phasenschiebemusters.

Ein Fehler bei der Gray-Dekodierung von einem Kodewort, führt zu einem Widerspruch zwischen dem Gray-Dekoderergebnis  $k$  und dem Ergebnis  $\phi$  des Phasenschiebens.

#### 4.2.3.4 Merkmale des Grauwert-Vektors

Die Fünffachklassifizierung der Grauwerte aus (4.6) nutzt zwar schon mehr Information aus den Grauwerten als die einfache Binarisierung (4.4), aber noch längst nicht die gesamte. Aus dem Grauwert-Vektor lassen sich verschiedene Merkmale ableiten, die zur Qualitätsbeurteilung des Messwertes benutzt werden können.

**Modulation:** Das wichtigste Qualitätskriterium ist die Modulation  $m$ . Die Modulation des Gray-Kodes ist die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Grauwert eines Kodewortes:

$$m = \max \mathbf{g} - \min \mathbf{g} \quad (4.8)$$

Leider ist dieser Ausdruck nicht für alle Kodeworte sinnvoll. Wie bereits in (4.3) gezeigt, existiert ein Kodewort  $k_{nn}$ , das nur aus hellen Stufen besteht.

Unter der Annahme, dass bereits eine sinnvolle Schwelle  $s$  für die Klassifizierung bekannt ist, stellt der maximale Betrag der Differenz von  $g_i$  und  $s$  eine der Modulation vergleichbare Größe  $m'$  dar:

$$m' = 2 \max |g_i - s| \quad \text{mit } i \in [1..p] \quad (4.9)$$

Das Kriterium für die Annahme einer Messung ist die Einhaltung eines Mindestwerts  $m'_{min}$  der Modulation. Für  $m' < m'_{min}$  wird der Messwert für diesen Bildpunkt verworfen.

**Welligkeit:** Ein weiterer Hinweis auf einen unzuverlässigen Messwert stellt eine große Welligkeit des gleichgerichteten Gray-Kodes dar. Der gleichgerichtete Gray-Kode ist definiert durch:

$$g_{i,abs} = |g_i - s| \quad \text{mit } i \in [1..p] \quad (4.10)$$

Bei einem perfekt modulierten Kode mit einer optimalen Schwelle  $s$  sind alle  $g_{i,abs}$  unabhängig vom Wert der jeweiligen Kodestelle identisch. Ist  $s$  ungünstig gewählt oder weisen einige  $g_i$  Abweichungen auf, zeigt sich das in einer gewissen Streuung der  $g_{i,abs}$ . Ein Maß für die Streuung ist die Standardabweichung vom Mittelwert  $\sigma_w$ :

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{i=1}^p g_{i,abs}^2 - \frac{1}{p^2} \cdot \left( \sum_{j=1}^p g_{j,abs} \right)^2} \quad (4.11)$$

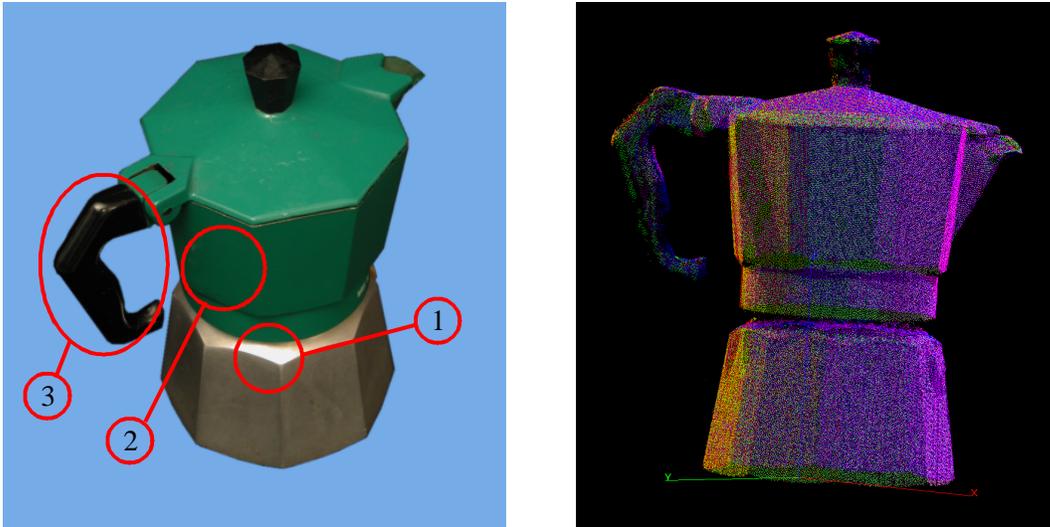
Als dimensionsloses Qualitätsmaß  $Q_w$  bietet sich das Verhältnis von Modulation zur Streuung an, da bei einer großen Modulation auch eine größere Streuung akzeptabel ist.

$$Q_w = \frac{\sigma_w}{m} \quad (4.12)$$

Überschreitet  $Q_w$  einen vorgegebenen Maximalwert  $Q_{w,max}$ , so wird der Messwert für diesen Bildpunkt verworfen.

#### 4.2.3.5 Topologische-Filter

Schließlich gibt es zur Fehlererkennung die Möglichkeit, topologische Filter auf das  $\zeta$ -Bild anzuwenden. Diese Filterklasse macht Annahmen über die Objekt-Topologie und verändert oder entfernt Messwerte. Bekanntestes Beispiel ist ein Glättungsfilter, der in vielen 3D-Messsystemen eingesetzt wird. Der gravierendste Nachteil ist die Veränderung *aller* Messdaten und nicht nur der mangelhaften.



**Abbildung 4.4:** Ein Beispiel für ein schwieriges Objekt: Es weist Glanzlichter (1) auf, das Oberteil ist glänzend lackiert (2) und der Griff ist schwarz *und* glänzend (3). Rechts ist die aus mehreren Einzelmessungen zusammengesetzte Punktwolke dargestellt. Jeder Messung ist eine Farbe zugeordnet. An den schwierigen Stellen wie am Griff und am Deckelknopf ist die Punktedichte geringer, aber es treten nur sehr wenige Ausreißer auf.

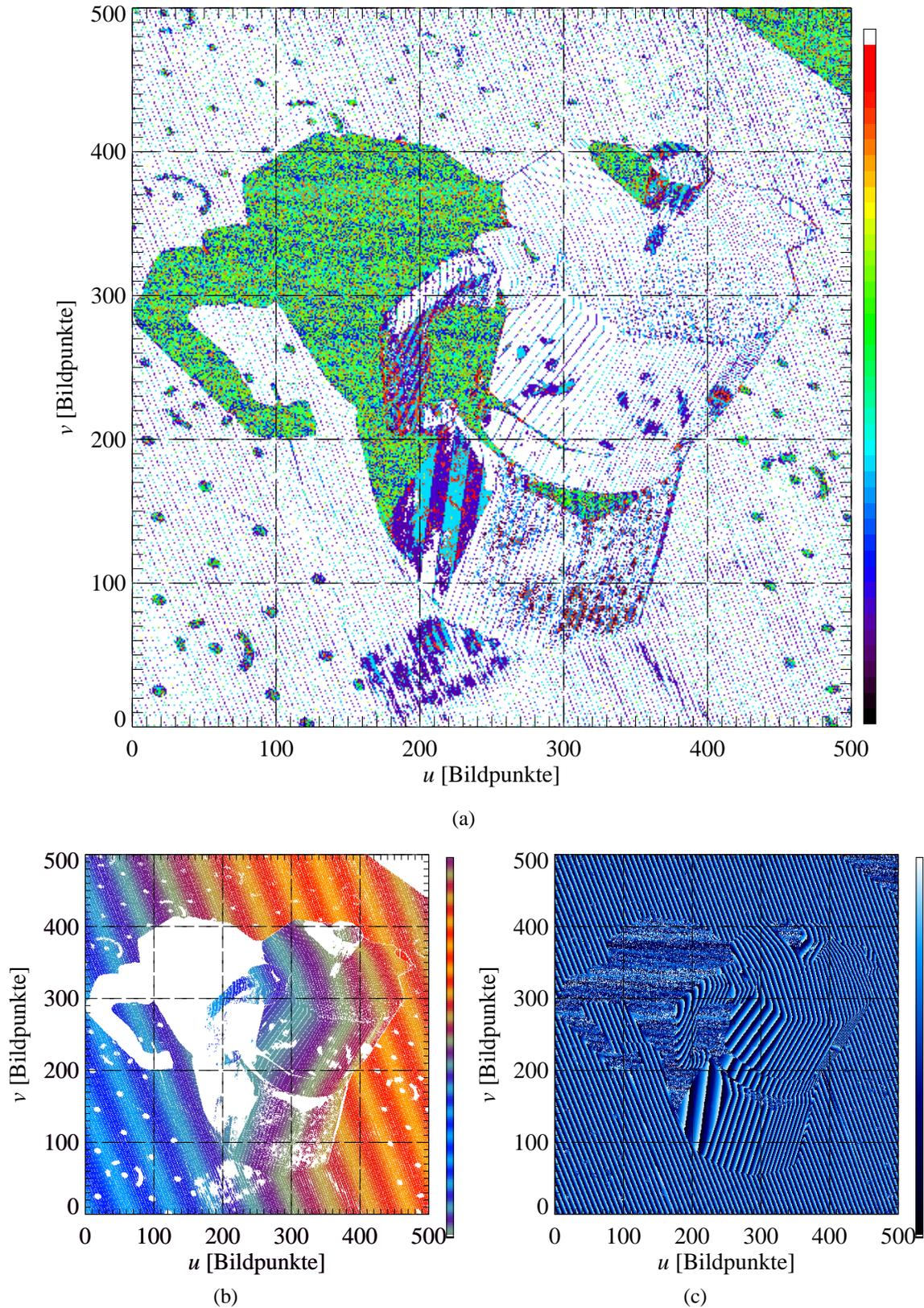
Darum kommt hier ein so genannter Median-Differenz-Filter zur Anwendung. Im Gegensatz zu Glättungs- und Median-Filtern verändert er keine Messwerte, sondern entfernt lediglich unzuverlässige erscheinende Punkte. Der Filter beruht auf folgender Bedingung:

$$|\zeta - \text{median}_{m \times m} \zeta(u, v)| > \zeta_{\min} \quad (4.13)$$

Es wird die Differenz zwischen dem original  $\zeta$ -Bild und dem mit einem  $m \times m$  Bildpunkte großen zweidimensionalen Medianfilter bearbeiteten  $\zeta$ -Bild berechnet. Ist ihr Betrag größer als ein vorgegebener Schwellwert, heißt das, dass sich der Punkt deutlich von seiner Umgebung abhebt. Das ist zwar keine hinreichende Bedingung für einen Ausreißer aber eine notwendige. Da sehr viele Messpunkte zur Verfügung stehen, stellt es aber kein Problem dar, wenn auch einige brauchbare Punkte verworfen werden. Wie alle Filter, die Annahmen über die Objektstruktur machen muss auch dieser bei entsprechenden Objekten abgeschaltet werden, da er sonst wesentliche Teile des Messergebnisses entfernt. In der Praxis besitzt jedoch die überwiegende Zahl von Messobjekten geschlossene und mehr oder weniger glatte Oberflächen, so dass er meist eingesetzt werden kann. Die Größe des Medianfilters sollte drei, fünf oder sieben Bildpunkte betragen, die Schwelle liegt üblicherweise bei wenigen Gray-Kode-Stufen.

#### 4.2.4 Verifikation

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit des Gray-Kode-Dekoders wurden an verschiedenen Objekten überprüft. Hier werden stellvertretend die Ergebnisse an einem schwierigen Objekt dargestellt. Bei dem Objekt handelt es sich um die Espresso-Maschine die in Abb. 4.4 dargestellt ist. Die Problembereiche liegen in den



**Abbildung 4.5:** Die Ergebnisse des Robusten Dekoders: a) Zeigt ein farbkodiertes Fehlerbild. Jede Farbe steht für eine bestimmte Kombination von Fehlern. Weiße Flächen stellen gültige Messwerte dar. b) zeigt die gültigen Werte des Gray-Kodes. In c) sind die Phasenwerte für alle Bildpunkte dargestellt.

Spiegelungen sowohl auf dem lackierten Oberteil, als auch auf der Basis. Besonders problematisch sind der schwarz-glänzende Griff und der Deckelknopf, da sie entweder nur sehr wenig Licht zur Kamera streuen oder helle Glanzlichter aufweisen.

Das Ergebnis der Auswertung dieser Szene mit dem robusten Dekoder zeigt Abb. 4.5. In 4.5(a) sind die gefundenen Dekoderfehler farbkodierte dargestellt. Die Fehler wurden für dieses Bild binär kodiert: Jedem Fehler wurde ein bestimmter Bitwert zugewiesen. Alle gefundenen Fehler wurden dann mit einem binären Oder zu einem einzigen Wert verknüpft. Dadurch entstehen die verschiedenen Farbstufen. Folgende Fehlerursachen sind in dem Bild kodiert:

1. Gray-Kode: Klasse 2 aus (4.6)
2. Überbelichtet: Klasse 4 aus (4.6)
3. Modulation zu klein:  $m' < m'_{min}$
4. Qualitätsmaß zu niedrig:  $Q_w < Q_{w,max}$
5. Redundanzkriterium verletzt
6. Median-Differenz-Filter

Eine gute Aussage über die Unabhängigkeit der Fehler und die Häufigkeit ihres Auftretens liefert eine Koinzidenz-Matrix. In ihr ist die Häufigkeit des gemeinsamen Auftretens aller Fehlerpaare aufgeführt:

Kriterium	1	2	3	4	5	6
1	17767					
2	385	5037				
3	0	0	37505			
4	17639	1317	33598	72667		
5	9640	2490	14772	26737	30793	
6	0	0	0	2009	762	3105

Die Diagonalelemente geben die gesamte Häufigkeit jedes Fehlers an. In Zeile 5 ist deutlich zu erkennen, dass das Redundanzkriterium immer dann anspricht, wenn auch eine der anderen Fehlerursachen vorliegt. Weiterhin deckt das Qualitätsmaß fast jedes Auftreten der Gray-Kode Klasse 2 ab.

Die resultierende Bereinigung der Messergebnisse von Ausreißern sieht man deutlich sowohl am bereinigten Gray-Kode Bild in Abb. 4.5(b), als auch an der Punktwolke in Abb. 4.4.

### 4.3 Phasenschieben

Das Phasenschiebeverfahren ist eine weitere Methode zur Lösung des Korrespondenzproblems. Dabei werden  $n_p$  um einen bestimmten Bruchteil einer Periodenlänge verschobener Sinusmuster auf das Objekt projiziert. Für jeden Bildpunkt erhält man die  $n_p$  Grauwerte  $p_i$ , aus denen man die Phasenlage  $\varphi$  für diesen Objektpunkt berechnen kann. Man bezeichnet  $\varphi$  deshalb auch als *Objektphase*.

Der Vorteil gegenüber einer diskreten Kodierung wie dem Gray-Kode, ist die kontinuierliche Ortsauflösung. Der Nachteil ist, dass eine eindeutige Lösung nur innerhalb einer Periode möglich ist. Er ist aber durch die Kombination mit einer Absolutkodierung, wie dem Gray-Kode, leicht zu beheben. Man spricht dann von *hybrider* Kodierung.

Die Ursprünge des Phasenschiebeverfahrens liegen in der Interferometrie. Mit Hilfe von Interferenzeffekten lassen sich sehr einfach Phasenschiebemuster mit fast perfekter Sinus-Form erzeugen. Eine frühe Erwähnung, möglicherweise die erste, findet sich bei Carré (1966).

In diesem Abschnitt werden zunächst die gängigen Phasenschiebeverfahren beschrieben und eine Methode zur präzisen Messung der Objektphasentransferfunktion (OPTF) eingeführt. Schließlich wird gezeigt wie mit Kenntnis der OPTF die systematischen Fehler der Objektphasenmessung deutlich reduziert werden können. Für das Verständnis der technischen Begrenzungen denen das Phasenschieben unterliegt, wird zuerst ein Überblick über die Projektortechnologie gegeben.

### 4.3.1 Projektionstechnik

Für das Phasenschieben benötigt man im Gegensatz zum diskreten Gray-Kode eine Projektionstechnik, die in der Lage ist, kontinuierliche Grauwert-Verläufe darzustellen. Soll der Projektor sowohl diskrete als auch kontinuierliche Muster darstellen können, stellt das eine nicht triviale Aufgabe dar.

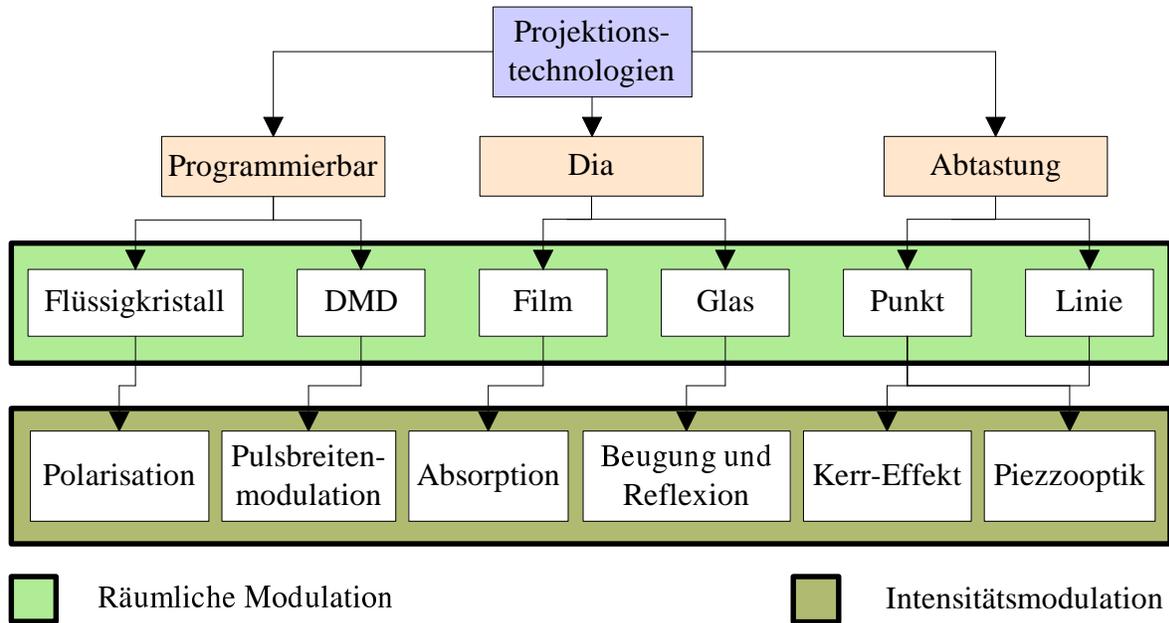
#### 4.3.1.1 Anforderungen

Die wünschenswerten Eigenschaften eines idealen Streifenprojektors sind:

- große Schärfentiefe
- hohe Leuchtdichte
- Projektion von kontinuierlichen *und* binären Mustern
- große Mustervielfalt
- schnelles Umschalten zwischen den Mustern
- exakte und reproduzierbare Positionierung der Muster

Eine große Schärfentiefe erreicht man nur durch Verwendung eines möglichst kleinen Dias und einer großen Blendenzahl  $k$ , da die Schärfentiefe nur vom Vergrößerungsfaktor  $M$  und der Blendenzahl abhängt. Die Vergrößerung ist das Verhältnis von Bild-Größe (Projektion) zu Objekt-Größe (Dia). Nach den Gesetzen der geometrischen Optik wird ein unendlich kleiner Punkt bei einer bildseitigen Fokusverschiebung  $\Delta z$  auf ein Kreisscheibchen mit dem Radius  $r$  abgebildet:

$$r = \Delta z \cdot \frac{M^2}{\sqrt{M^2 + 4k^2n^2 - 1}} \quad (4.14)$$



**Abbildung 4.6:** Übersicht über Projektionstechnologien, gegliedert nach den angewandten Methoden zur räumlichen Modulation und zur Intensitätsmodulation. DMD steht für „Digital Mirror Device“.

Dabei ist  $n$  die Brechzahl des umgebenden Mediums. Soll also eine Struktur auf dem Dia mit dem Durchmesser  $2r$  scharf auf das Objekt abgebildet werden, so darf die maximale Defokussierung im Bildraum höchstens  $\Delta z$  betragen. Bei einer minimalen Strukturgröße von  $2r$  beträgt der nutzbare scharfe Tiefenbereich  $z$ :

$$z = 2\Delta z = 2r \cdot \frac{\sqrt{M^2 + 4k^2n^2} - 1}{M^2} \quad (4.15)$$

Mit „Dia“ wird hier ein allgemeines räumlich modulierendes Element bezeichnet. Die Leuchtdichte wird in erster Linie von der maximal möglichen Energiedissipation im Dia begrenzt. Die Erzeugung kontinuierlicher Intensitätsverläufe erfordert sowohl eine hohe räumliche Auflösung des Dias als auch eine feine Abstufung der möglichen Intensitäten. Die größte Mustervielfalt sowie schnelles Umschalten zwischen ihnen bieten programmierbare Modulatoren.

#### 4.3.1.2 Technologien

Auf dem Markt finden sich verschiedene Technologien, die einen Teil der oben genannten Anforderungen abdecken. In Abb. 4.6 sind sie nach den Methoden zur räumlichen Modulation und zur Intensitätsmodulation gegliedert.

**Flüssig-Kristall:** Eine bewährte Technologie für programmierbare, schnelle Modulatoren ist die Flüssig-Kristall-Anzeige. Ihre Vorteile sind die stufenlose Intensitätsmodulation und die

schnelle Umprogrammierung in wenigen Millisekunden. Ein Nachteil ist die große Absorption von mindestens 50% im durchsichtigen Zustand, die durch die Polarisationsfilter im Strahlengang verursacht wird. In Kombination mit der geringen Hitzebeständigkeit (oberhalb von 60° bis 70°C zersetzt sich das Flüssig-Kristall) verhindert das einen Einsatz bei großen Leuchtdichten. Durch eine räumliche Trennung von Polarisatoren und Flüssig-Kristall lässt sich das Problem zwar entschärfen, aber nicht grundlegend aus der Welt schaffen.

Ebenso störend ist die große Ausdehnung der Flüssig-Kristall-Streifen. Ein Streifen ist etwa 100  $\mu\text{m}$  breit. Ein Modulator mit nur 600 Linien hat also schon eine Ausdehnung von 6 cm! Schließlich ist der maximal erzielbare Kontrast von 1 : 20 sehr unbefriedigend.

Flüssig-Kristall-Modulatoren finden ihre Einsatzberechtigung bei Aufgaben, bei denen es auf schnelle Datenaufnahme in einem kleinen Messvolumen ankommt.

**Mikrospiegel:** Mikrospiegel-Modulatoren (Englisch: „Digital-Mirror-Device“) sind eine Entwicklung der Firma *Texas Instruments*. Sie sind aus einzelnen Spiegeln mit 16  $\mu\text{m}$  Durchmesser aufgebaut, die 20° um eine Achse gekippt werden können. Der Antrieb erfolgt elektrostatisch und ermöglicht eine Schaltzeit von 20  $\mu\text{s}$ .

Die Mikrospiegel ermöglichen ein hohes Kontrastverhältnis von 1 : 100. Da sie weniger als 10% des einfallenden Lichts absorbieren, können sie in extrem lichtstarken Projektoren verwendet werden. Die kleinen Bildpunkt-Abmessungen ermöglichen eine große Schärfentiefe. Mikrospiegelanordnungen sind mit 1900  $\times$  1200 Elementen erhältlich, so dass auch sehr hochauflösende Muster projiziert werden können. Ihre Vorteile zeigen Mikrospiegel-Modulatoren vor allem bei binären Mustern. Da die Spiegel nur zwei Zustände kennen, erfolgt die Intensitätsmodulation über Pulsbreitenmodulation. Dies erfordert eine genaue Synchronisation der Belichtungszeiten der Kamera mit dem Modulationstakt. Da die Belichtungszeit immer ein ganzzahliges Vielfaches der Modulationsperiode sein muss, ist eine freie Wahl der Belichtungszeit nicht mehr möglich.

Notni u. a. (1999) erreichten, nach einer Linearisierung der Intensitäts-Übertragungskennlinie, mit einem solchen Projektionssystem Phasenmessgenauigkeiten von bis zu  $\pi/200$  rad, jedoch nur durch gleichzeitige Beobachtung mit mehr als zwei Kameras und der damit impliziten flächigen Mittelung.

**Laser-Abtaster:** Laser-Abtaster (Englisch: „Laser Scanner“) existieren in zwei Varianten: Punkt-Abtaster und Linien-Abtaster. Beim Punkt-Abtaster wird ein Laser-Punkt mit einer Zweiachsen Ablenkeinheit zeilenweise über die Projektionsfläche geführt. Ein schneller Modulator (Kerr-Zelle oder piezooptisches Element) sorgt für die Intensitätsmodulation. Die Schwierigkeit liegt in der genauen Synchronisation von Modulator und Ablenkeinheit. Für den Konsumentenbereich ist dieses Problem gelöst, für messtechnische Zwecke reicht die Genauigkeit jedoch noch nicht aus.

Die Ansteuerung vereinfacht sich, wenn man vom frei programmierbaren Projektor zum Linienprojektor übergeht. Anstatt einer Standardoptik wird eine Zylinderlinse zur Projektion verwendet. Der Strahl wird so zu einer Linie aufgefächert und es ist nur noch eine Ablenkeinheit notwendig. Die Abtastrate kann dann erheblich reduziert werden.

Laser-Abtaster sind unschlagbar in Bezug auf Lichtintensität und Schärfentiefe und Kontrast. Schwierigkeiten bereiten zum Einen die Einschränkungen durch die Synchronisation mit



**Abbildung 4.7:** Aufnahme einer Glas Maske mit einem Laserabtastungsmikroskop (LSM). Der Ausschnitt zeigt einen Teil einer Periode des Sinus-förmigen Intensitätsverlaufs. Die Welligkeit der Kanten entsteht, wenn das Schreiberaster des Elektronenstrahls nicht parallel dazu verläuft.

der Kamera (s. Mikrospiegel) und zum Anderen die durch die große Kohärenzlänge verursachten Speckle-Effekte.

**Diaprojektor:** Herkömmliche Diafilme finden keine Anwendung in der kodierten Streifenprojektion. Kontrast, Lebensdauer und mechanische Eigenschaften sind dafür zu schlecht.

**Glasmaskenprojektor:** Die Glasmaskentechnologie wurde für die Herstellung integrierter Schaltungen entwickelt. Mit einem Elektronenstrahl wird ein mit Photoresistlack abgedecktes Chrom beschichtetes Glassubstrat beschrieben. Durch einen Entwicklungsvorgang werden die belichteten Stellen aufgelöst und die darunter frei liegende Chromschicht weg geätzt. Die minimale Strukturgröße liegt je nach Prozess unterhalb von einem Mikrometer. Die Auflösungsgrenze des Verfahrens reicht bis 50 nm. Das Verfahren eignet sich somit ideal für optische Anwendungen. Das Zerodur Glassubstrat besitzt zudem hervorragende mechanische und thermische Stabilität.

Durch das Abtragen der Chromschicht lassen sich zwar zunächst nur binäre Muster erzeugen, aber unter Ausnutzung von Beugungsphänomenen können kontinuierliche Intensitätsübergänge hergestellt werden. In Abb. 4.7 ist ein Ausschnitt aus der Flanke eines Sinus-förmig modulierten Streifenmusters dargestellt.

Die Schwierigkeiten bei der Konstruktion eines Projektors mit Glas-Masken liegen in der aufwändigen Positioniermechanik und der diffizilen Justierung. Ebenso ist die Anzahl der Muster durch mechanische und optische Randbedingungen stark eingeschränkt und die Bildwechselzeit liegt im Sekundenbereich.

Die Vorteile sind ein extrem hoher Kontrast von über 1 : 100, eine sehr hohe maximale Leuchtdichte und die sehr große Schärfentiefe.

#### 4.3.1.3 Der *Ganymed* Projektor

Beim Entwurf des *Ganymed* Systems fiel die Entscheidung bei der Wahl der Projektortechnologie zugunsten des Glas-Masken-Systems aus. Ausschlaggebend war, dass mit ihr, bei maximaler Leuchtdichte, höchste Präzision erreicht werden kann. Die geringen Abmessungen der

auf diese Weise herstellbaren Dias ( $12,6 \times 12,6 \text{ mm}^2$  beim *Ganymed*) ermöglichen es, auf kurze Projektionsdistanz ein großes Messvolumen von  $(500 \text{ mm})^3$  zu realisieren. Auch bei der Erzeugung von kontinuierlichen Intensitätsverläufen sind die Glas-Masken unübertroffen.

Das Positioniersystem arbeitet mit einer aktiven Lageregelung des Diaträgers und ermöglicht eine Positioniergenauigkeit von etwa  $1/800000$  des Umfangs, das entspricht etwa  $7,9 \mu \text{ rad}$ .

### 4.3.2 Methoden

Es existiert eine große Auswahl an publizierten Phasenschiebemethoden (Creath 1986; Surrel 1998). Sie verfolgen verschiedene Ansätze zur Steigerung der Robustheit gegenüber Phasenschiebefehlern (Surrel 1993; Surrel 1996; Zhang, Lalor und Burton 1999), Detektor-Nichtlinearitäten (Hibino, Oreb, Farrant und Larkin 1996) und Abweichungen des Phasenschiebemusters von der Sinus-Form (Zhang, Lalor und Burton 1999; Hibino, Oreb, Farrant und Larkin 1996), sowie dem Signalrauschen (Schmit und Creath 1995).

Beim Aufbau eines Phasenschiebesystems muss zunächst die Anzahl  $n_p$  der Schiebestufen und die Phasenverschiebung  $\alpha$  festgelegt werden. Bei einem idealen Aufbau lauten die Gleichungen für die beobachteten Intensitäten  $p_i$  der einzelnen Stufen:

$$p_i = O + A \cdot \sin(\varphi + \alpha_i) \quad (4.16)$$

Mit der Amplitude  $A$  und der Untergrundhelligkeit  $O - A \geq 0$ . Bei bekanntem  $\alpha_i$  sind somit mindestens drei Stufen notwendig, um aus diesem Gleichungssystem die Objektphase  $\varphi$  zu berechnen. Setzt man  $\alpha$  als unbekannt voraus oder benötigt man Redundanz, um die Messergebnisse zu beurteilen, sind mindestens vier Stufen notwendig.

Mit noch mehr Stufen kann man mehr Information gewinnen und die Genauigkeit der Phasemessung auf bis zu  $2\pi/1000 \text{ rad}$  steigern (Schmit und Creath 1995). Von Zhang, Lalor und Burton (1999) ist ein Verfahren mit  $n_p = 7$  bekannt und Hibino u. a. (1995) geben eines mit  $n_p = 11$  an. Es existiert keine obere Grenze für  $n_p$  und allgemeine Ansätze für beliebige  $n_p$  sind von Surrel (1996) bekannt. Allerdings verlängert jede zusätzliche Stufe die Messzeit.

Darum und wegen der begrenzten Muster-Auswahl des Projektors wird beim *Ganymed* System die minimale Anzahl von Stufen eingesetzt, bei der die Daten noch Redundanz enthalten: Das sind  $n_p = 4$  Stufen und  $\alpha = 90^\circ$ .

#### 4.3.2.1 Streifenprojektion und Interferometrie

Alle bekannten Ansätze des Phasenschiebeverfahrens wurden für die Interferometrie entwickelt. Das Grundprinzip ist zwar bei der Streifenprojektion das gleiche, aber die typischen Probleme sind anders gelagert. Klassische Phasenschiebe-Algorithmen sind meistens auf die im Folgenden beschriebenen Fehler angepasst.

**Phasenschieberfehlkalibrierung:** In der Interferometrie wird die Phasenverschiebung normalerweise mit einem piezoelektrisch linear bewegten optischen Element erzeugt. Das hat zur Folge, dass sich eine Fehlkalibrierung der Phasenverschiebung als linearer Fehler bemerkbar macht. Die tatsächliche Phasenverschiebung  $\alpha'$  kann dann durch

$$\alpha'_i = \alpha_i + i \cdot \varepsilon \quad (4.17)$$

beschrieben werden. Dieses Modell gilt weder für Streifenprojektionssysteme mit mechanischer Positionierung der Dias noch für Flüssigkristallmodulatoren oder Mikrospiegelanordnungen. Im Zweifelsfall sind die Positionen  $\alpha_i$  der einzelnen Phasenstufen unabhängig voneinander. Dann ist es günstiger nur die bekannten  $\alpha_i$  für die Phasenberechnung zu benutzen.

Es gibt zwar Algorithmen wie der von Carré (1966), die von der absoluten Phasenverschiebung unabhängig sind, sie setzen aber voraus, dass  $\alpha$  konstant ist.

**Nicht-Linearität des Sensors:** Eine nichtlineare Kennlinie des Sensors führt zu Abweichungen des Phasenschiebemusters von der Sinus-Form. Bei Streifenprojektionssystemen mit 8-Bit-Digitalisierung der Grauwerte stammt der größte Teil der Nicht-Linearität vom Quantisierungsfehler. Darum kann die separate Modellierung dieses Fehlers unterbleiben.

**Abweichungen von der Sinus-Form:** Abweichungen des Intensitätsverlaufs des Streifenmusters von der Sinus-Form entstehen in der Interferometrie im Allgemeinen durch Mehrstrahlinterferenzen. Sie äußern sich in Oberschwingungen niedriger Ordnung. Viele Algorithmen sind daher auf die Unterdrückung von Fehlern  $n$ -ter Ordnung ausgelegt. Bei Streifenprojektionssystemen enthalten die projizierten Muster jedoch deutlich höhere Frequenzen als in Interferometern. Diese Abweichungen lassen sich nur mit einem Ansatz erfassen, der einen beliebigen Intensitätsverlauf zulässt.

#### 4.3.2.2 Auswerte Formeln

Die generelle Auswerte Formel für das Phasenschieben mit  $n_p$  Stufen und einer Phasenverschiebung von  $\alpha = 2\pi/n_p$  lautet:

$$\tan \varphi = -\frac{\sum_{i=1}^{n_p} p_i \cdot \sin((i-1)\alpha)}{\sum_{i=1}^{n_p} p_i \cdot \cos((i-1)\alpha)} \quad \text{mit } n_p \geq 3 \quad (4.18)$$

Die  $p_i$  stellen die beobachteten Grauwerte dar,  $\varphi$  ist die gesuchte *Objektphase*. Für das vierstufige Phasenschieben mit  $\alpha = \pi/2$  erhält man aus (4.18) die folgende Lösung:

$$\tan \varphi = \frac{p_4 - p_2}{p_3 - p_1} \quad (4.19)$$

Das ist die einfachste Formel zur Berechnung der Objektphase beim vierfach Phasenschieben.

Eine Verbesserung gegenüber dieser Basisformel erreicht man durch die so genannte Mittelungstechnik (Schmit und Creath 1995). Dabei werden die vier Intensitätswerte in zwei Gruppen zu je drei Werten eingeteilt. Es existieren dann zwei Möglichkeiten der Mittelung:

- Die Berechnung von zwei Objektphasen aus diesen Gruppen und ihre anschließende Mittelung.
- Die Mittelung der Zähler und Nenner der beiden Gruppen und anschließende Berechnung einer Objektphase.

Die Gleichung für die Mittelung von zwei Objektphasenwerten nach Schwider, Burow, Elsner, Grzanna, Spolaczyk und Merkel (1983) lautet:

$$\varphi = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \tan^{-1} \frac{p_3 - p_2}{p_1 - p_2} + \tan^{-1} \frac{p_4 - p_3}{p_2 - p_3} \right\} \quad (4.20)$$

Ein ähnliches Prinzip wie (4.20) verfolgt das von Schwider u. a. 1983 und 1993 vorgeschlagene Mittelungsprinzip. Dabei werden nicht die Objektphasen selbst gemittelt, sondern die Zähler und Nenner der beiden Gruppen:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{-p_1 + 3p_2 - p_3 - p_4}{p_1 + p_2 - 3p_3 + p_4} \quad (4.21)$$

Eine Variante dieser Methode aus Schwider u. a. 1983 lautet:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{p_1 + p_2 - p_3 - p_4}{p_1 - p_2 - p_3 + p_4} \quad (4.22)$$

Schließlich gibt es die bereits erwähnte Formel von Carré (1966), die eine unbekannte aber konstante Phasenverschiebung benutzt.

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{[-p_1 + 3p_2 - 3p_3 + p_4] \cdot [p_1 + p_2 - p_3 - p_4]}}{-p_1 + p_2 + p_3 - p_4} \quad (4.23)$$

Eine Zusammenstellung dieser Formeln ist in Tab. 4.1 dargestellt.

Quelle	$\varphi$
Carré 1966	$\tan^{-1} \frac{\sqrt{[-p_1 + 3p_2 - 3p_3 + p_4] \cdot [p_1 + p_2 - p_3 - p_4]}}{-p_1 + p_2 + p_3 - p_4}$
Creath 1986	$\tan^{-1} \frac{p_4 - p_2}{p_3 - p_1}$
Schwider u. a. 1983 Wyant und Prettyjohns 1987	$\frac{1}{2} \cdot \left\{ \tan^{-1} \frac{p_3 - p_2}{p_1 - p_2} + \tan^{-1} \frac{p_4 - p_3}{p_2 - p_3} \right\}$
Schwider u. a. 1993 Schmit und Creath 1995	$\tan^{-1} \frac{-p_1 + 3p_2 - p_3 - p_4}{p_1 + p_2 - 3p_3 + p_4}$
Schwider u. a. 1983	$\tan^{-1} \frac{p_1 + p_2 - p_3 - p_4}{p_1 - p_2 - p_3 + p_4}$

**Tabelle 4.1:** Verschiedene Auswerteformeln für das vierfach Phasenschieben mit  $\alpha = \pi/2$ . Die Formel von Carré gilt für beliebige  $\alpha$ .

### 4.3.3 Die Objektphasentransferfunktion

Unabhängig von der verwendeten Auswerteformel für den Phasenwinkel besitzt jedes Streifenprojektionssystem eine spezifische Objektphasentransferfunktion (OPTF) (Wiora, Laukenmann und Malz 1999; Wiora 2000). Diese Funktion beschreibt in Form einer Kennlinie die systematischen Abweichungen der aus dem Grauwert-Vektor  $\mathbf{p}$  berechneten Objektphase  $\Phi$  zur tatsächlichen Objektphase  $\varphi$ . Im Idealfall ist somit

$$\Phi(\varphi) = \varphi. \quad (4.24)$$

Gelingt es die OPTF  $\Phi(\varphi)$  für ein reales Messsystem zu bestimmen und ist die Funktion streng monoton, kann man ihre Umkehrfunktion  $\varphi(\Phi)$  berechnen. Mit der Umkehrfunktion ist es möglich zu jedem gemessenen Objektphasenwert  $\Phi$  den wahren Objektphasenwert  $\varphi$  bestimmen. Die eigentliche Schwierigkeit liegt nun in der Messung der OPTF.

#### 4.3.3.1 Messung der OPTF

Um die OPTF überhaupt messbar zu machen, müssen einige vereinfachende Annahmen getroffen werden: Zum Einen geht man davon aus, dass die Eigenschaften des Modulators über die ganze Projektionsfläche nur wenig variieren. Wenn also Abweichungen von der Sinus-Form bestehen, so sollen sie überall ähnlich sein. Die Andere Annahme ist, dass die OPTF nur von  $\varphi$  bzw.  $\zeta$  abhängt und sich entlang der anderen Bildkoordinate  $\xi$  des Projektors nicht ändert.

Zunächst gilt es eine Messsituation zu schaffen, in der sowohl  $\Phi$  als auch  $\varphi$  gleichzeitig bestimmt werden können. Es empfiehlt sich einen Körper mit bekannter Geometrie als Messobjekt dafür einzusetzen. Der Aufwand, die absoluten Oberflächen-Koordinaten des Körpers im Sensorkoordinatensystem mit einer unabhängigen Methode zu bestimmen wäre jedoch beträchtlich. Eine sehr viel einfachere Möglichkeit ist die Verwendung einer ebenen Platte, wie sie bereits zur Bestimmung der Kalibrier-Qualität in Abschnitt 3.4.5.2 verwendet wurde.

**Die OP-Projektion:** Unabhängig von der Sensor-Geometrie besitzt das OP-Bild eines beliebigen Objektes zwei wesentliche Eigenschaften: Die Erste ist, dass der Gradientenvektor des OP-Bildes im Bildkoordinatensystem überall senkrecht auf den projizierten Streifen steht:

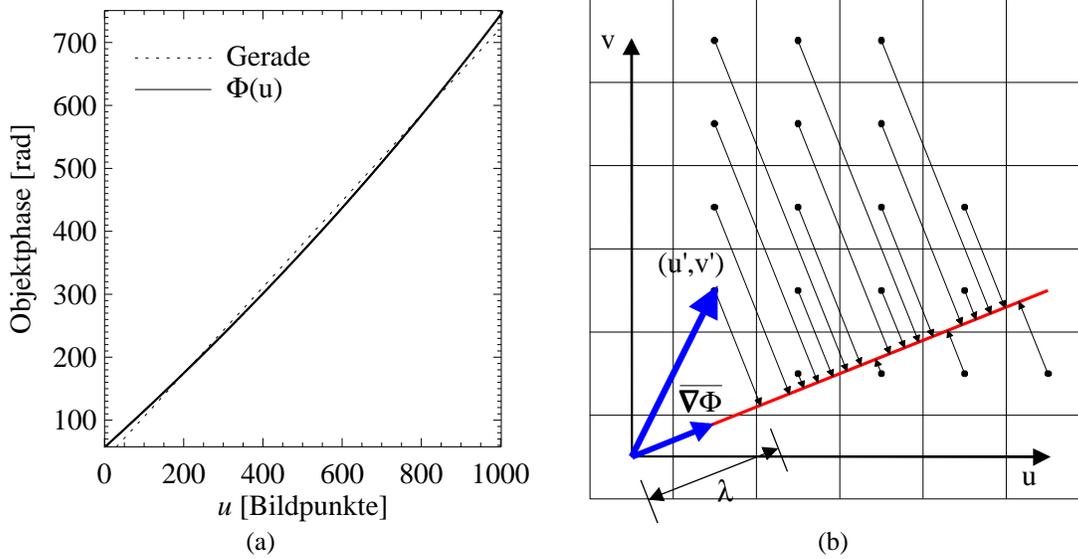
$$\nabla\Phi(u, v) \perp \text{Streifenrichtung}|_{(u,v)} \quad (4.25)$$

Die Zweite ist, dass sich  $\Phi$  entlang des Gradientenvektors auf kurze Strecken näherungsweise linear ändert.

Sorgt man durch eine entsprechende Aufnahme-Geometrie noch dafür, dass die Streifenrichtung einen kleinen Winkel zu den Einheitsvektoren  $\hat{\mathbf{u}}$  und  $\hat{\mathbf{v}}$  des Bildkoordinatensystems aufweist, eröffnet sich eine Methode mit der sowohl die Objektphase  $\Phi$ , als auch die wahre Objektphase  $\varphi$  aus der Messung eines ebenen Körpers mit hoher Genauigkeit berechnet werden können.

Dazu wählt man zunächst einen kleinen Objektphasenbereich aus dem OP-Bild  $\Phi(u, v)$  so aus, dass die Bedingung

$$I_\Phi = [\Phi_{min} \dots \Phi_{max}] \quad (4.26)$$



**Abbildung 4.8:** a) Ein Schnitt durch ein Objektphasenbild entlang der  $\hat{u}$ -Achse. Der Anstieg ist fast linear. Zum Vergleich ist eine Gerade eingezeichnet. b) Die Projektion der Bildkoordinatenvektoren  $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$  auf den mittleren Gradientenvektor  $\overline{\nabla\Phi}$  zur Bestimmung der unskalierten Objektphase  $\lambda$ .

gilt. Der Bereich  $S$  enthält dann alle Bildpunkte, für die gilt:

$$S = \{(u', v') \mid \Phi_{min} \leq \Phi(u', v') < \Phi_{max}\} \quad (4.27)$$

Im Objektphasenbild einer ebenen Platte ist dies ein schmaler Streifen. Die Anzahl der Punkte in  $S$  ist:

$$n_s = \text{card } S \quad (4.28)$$

Auf  $S$  bestimmt man nun den mittleren Gradientenvektor  $\overline{\nabla\Phi}$ :

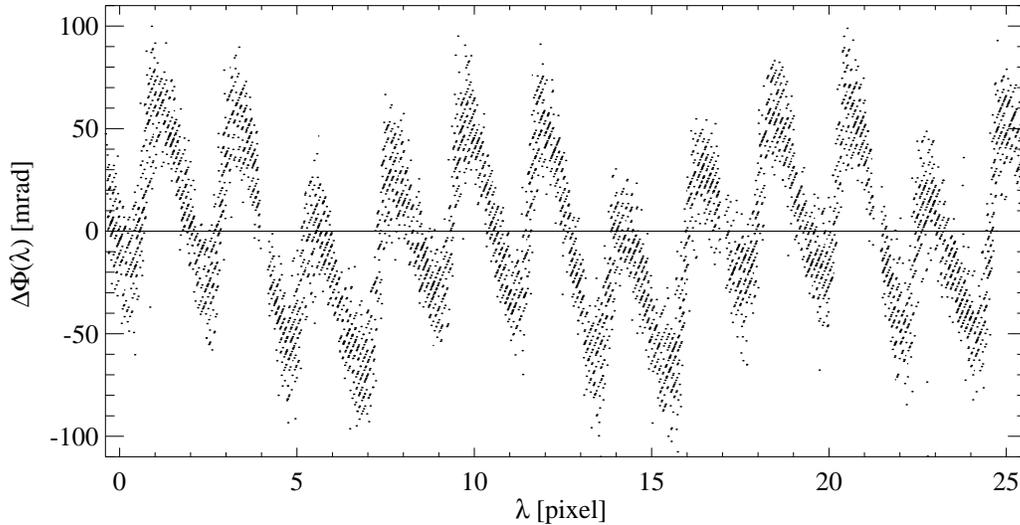
$$\overline{\nabla\Phi} = \frac{1}{n_s} \cdot \sum_{(u', v') \in S} \nabla\Phi(u', v'). \quad (4.29)$$

Mit Hilfe der in Abb. 4.8(b) dargestellten Projektion der Bildkoordinatenvektoren  $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$  auf eine beliebige Gerade die parallel zu  $\overline{\nabla\Phi}$  ist, kann nun für jede OP  $\Phi(u, v)$  ein Parameter  $\lambda$  ermittelt werden, der proportional zur wahren Objektphase ist. Am einfachsten projiziert man auf eine Ursprungsgerade  $g$ :

$$g : \mathbf{X} = \lambda \cdot \overline{\nabla\Phi}. \quad (4.30)$$

Die eigentliche Projektion lautet dann:

$$\lambda(u, v) = \frac{\overline{\nabla\Phi} \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}}{|\overline{\nabla\Phi}|}. \quad (4.31)$$



**Abbildung 4.9:** Das Resultat der Projektion der Objektphasenwerte auf den Gradientenvektor für drei Perioden des Phasenschiebemusters. Es ist der relative Objektphasenfehler  $\Delta\Phi(\lambda) = \Phi(\lambda) - \lambda$  angegeben. Der systematische Fehler ist deutlich zu erkennen.

So erhält man die unskalierte Objektphasenfunktion  $\Phi(\lambda(u, v))$ .

Das Ergebnis der Projektion ist Abb. 4.9 dargestellt. Es zeigt sich systematischer Fehler der von einem deutlich kleineren Rauschen überlagert wird. Die Amplitude des Rauschens beträgt in Bildkoordinaten etwa 300 nm. Das liegt nahe bei der mit (2.35) bestimmten Auflösungsgrenze von 200 nm.

**Skalierung der Objektphasenfunktion:** Nun muss noch die Skalierung und der Nullpunkt der OPTF bestimmt werden. Dazu bieten sich mehrere Methoden an. Stützt man sich nur auf die Daten aus dem OP-Bild, so kann man die Periodendauer der OP durch eine Autokorrelation und den Nullpunkt durch eine Nulldurchgangsbestimmung berechnen. Wegen des Rauschens der Funktion ist dieses Vorgehen jedoch fehlerbehaftet. Statt dessen wurde hier die Ansteigende beziehungsweise abfallende Flanke des feinsten Gray-Kode-Musters zur Skalierung verwendet. Das ist möglich, wenn man zusätzlich zur Graubild-Sequenz des Gray-Kodes  $g$  zwei Normierungsbilder aufnimmt. Das erste wird bei abgeschalteter das zweite bei voller Projektorbeleuchtung aufgenommen. Mit den Grauwerten  $g_h(u, v)$  des Hellbildes und  $g_d(u, v)$  des Dunkelbildes kann man für jeden Bildpunkt  $g(u, v)$  eine Zweipunktnormierung durchführen. Die normierten Grauwerte  $\tilde{g}(u, v)$  berechnen sich aus:

$$\tilde{g}(u, v) = \frac{g(u, v) - g_d(u, v)}{g_h(u, v) - g_d(u, v)} \cdot (g_{max} - g_{min}) + g_{min} \quad (4.32)$$

Dabei sind  $g_{min}$  und  $g_{max}$  die Normierungsgrenzen im einfachsten Fall somit 0 und 1. Die Normierung beseitigt sowohl räumliche Variationen des CCD-Sensors, als auch des Messobjektes. Es bleibt also nur noch die normierte Radianzfunktion des Projektors übrig.

Trägt man das feinste Gray-Kode-Muster  $\tilde{g}_p(u, v)$  als  $\tilde{g}_p(\lambda(u, v))$  auf, erhält man die Radianzfunktion des dieses Projektordias. Durch einen Kleinste-Quadrate-Anpassung einer empi-

risch bestimmten Modellfunktion  $\sigma(\lambda)$  an die Kante lässt sich deren Lage sehr genau bestimmen:

$$\sigma(\lambda) = O + A \cdot \tanh((\lambda - \Delta\lambda) \cdot \omega). \quad (4.33)$$

Diese Anpassung kann z.B. mit dem Amoeba-Algorithmus aus (Press, Teukolsky, Vetterling und Flannery 1992) berechnet werden. Der Parameter  $\Delta\lambda$  gibt dann die Lage der Gray-Kode-Kante auf der  $\lambda$ -Achse an. Bestimmt man zwei benachbarte Kanten  $\Delta\lambda_k$  und  $\Delta\lambda_{k+1}$ , lässt sich damit die OPTF auf  $\varphi$  skalieren:

$$\varphi(\lambda) = (\lambda - \Delta\lambda_k) \cdot \frac{2\pi n_p}{\Delta\lambda_{k+1} - \Delta\lambda_k}. \quad (4.34)$$

Dabei ist  $n_p$  die Anzahl der Phasenschiebe-Perioden zwischen zwei Gray-Kode-Flanken. Die vollständige OPTF ist damit durch  $\Phi(\varphi(\lambda(u, v)))$  definiert oder kurz  $\Phi(\varphi)$ .

#### 4.3.3.2 Korrektur des Objektphasenfehlers.

Der Objektphasenfehler ist mit Kenntnis der OPTF trivial zu korrigieren. Die OPTF ist wegen der Kleinheit der systematischen Fehler im Verhältnis zur ihrer Grundsteigung 1 für alle denkbaren Systeme streng monoton. Daher kann man aus  $\Phi(\varphi)$  auch die Umkehrfunktion  $\varphi(\Phi)$  berechnen. Das bedeutet, dass man zu jedem fehlerbehafteten Messwert  $\Phi$  den korrigierten Wert  $\varphi$  berechnen kann!

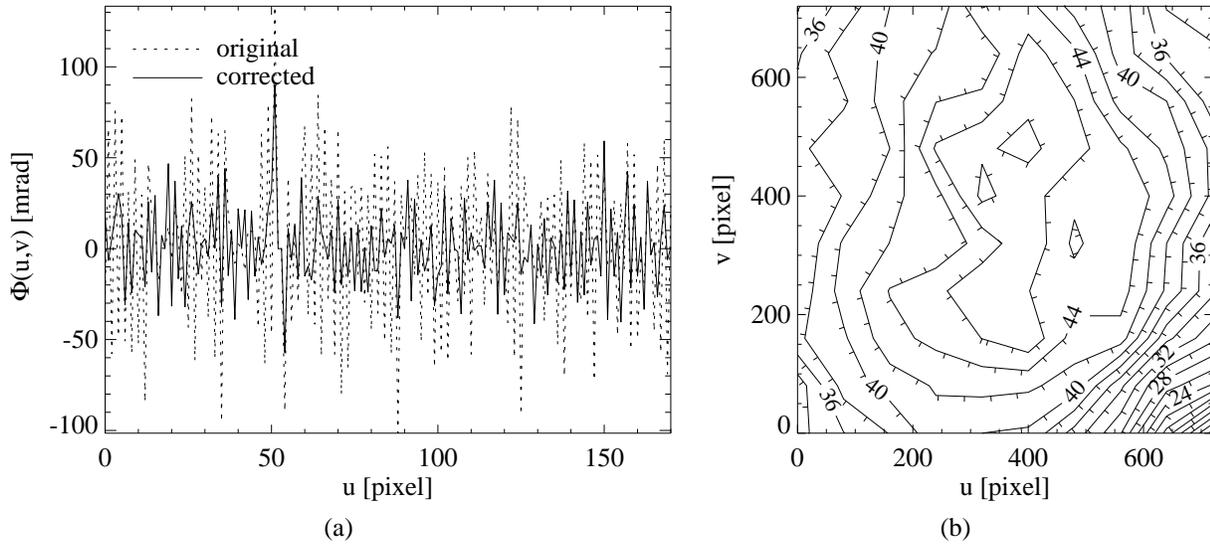
### 4.3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Linearisierung der OPTF sind in Abb. 4.10 dargestellt. Durch die Anwendung der Korrektur-Funktion  $\varphi(\Phi)$  konnte der Objektphasenfehler und damit auch der tatsächliche 3D-Messfehler des Systems um durchschnittlich 43% reduziert werden. Trotzdem lohnt es sich, sich über die eigentlichen Ursachen der des Objektphasenfehlers klar zu werden.

#### 4.3.4.1 Ursachen des Objektphasenfehlers

Eine Ursache des Objektphasenfehlers ist die Phasenschieberfehlkalibrierung, die zu Schwereungen in der OPTF führt. Sie lässt sich aber durch geeignete Maßnahmen bei der Positionierung der Dias auf ein Minimum beschränken. Deutlich stärker wirken sich die Abweichungen von der Sinus-Form und die Variation der Periodenlänge aus.

**Abweichungen von der Sinus-Form** Die Abweichung des Phasenschiebemusters von der Sinus-Form erkennt man am besten, wenn man die normierten Grauwerte  $p_1$  und  $p_2$  bzw.  $p_3$  und  $p_4$  gegeneinander aufträgt. Wegen der Phasenverschiebung von  $90^\circ$  sollte das Ergebnis bei einer perfekten Sinus-Form ein Kreis sein. Dass dem nicht so ist zeigt Abb. 4.11.



**Abbildung 4.10:** a) Ergebnis der OPTF-Linearisierung für die Messung eines ebenen Körpers. Der Objektphasenfehler ist für eine Bild-Zeile vor und nach der Korrektur dargestellt. b) Die relative Verbesserung des Objektphasenfehlers in Prozent für die Messung einer ebenen Platte. Der Abstand zwischen den Konturlinien beträgt 2%. Die kurzen Striche weisen abwärts. Die Mittlere Verbesserung beträgt 43%, die  $U_{95}$  Grenze reduziert sich um 45%. In Absoluten Zahlen verringert sich der Fehler von 78 mrad auf 43 mrad.

**Variation der Periodenlänge** Ein Fehler, der besonders bei rotierend positionierten Dias auftreten kann, sind Änderungen der Periodenlänge zwischen den einzelnen Dias. Das liegt im Allgemeinen nicht an der Konstruktion oder Herstellung der Dias, sondern wird durch die Änderung des Abbildungsmaßstabs hervorgerufen. Selbst bei bester Justierung des Diaträgers auf der Drehachse ändert sich der Abstand des projizierten Dias zum Objektiv im Laufe einer halben Umdrehung um einige Mikrometer. Eine höhere Präzision ist selbst mit großem mechanischem Aufwand kaum zu erreichen. Nur eine aktive Neigungsregelung könnte diesem Umstand abhelfen.

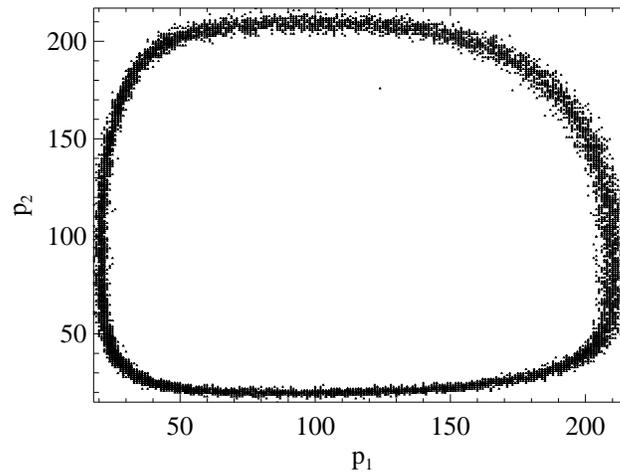
Der Abbildungsmaßstab  $M$  ist nach den Gesetzen der geometrischen Optik durch das Verhältnis von Bildweite  $b$  zu Gegenstandsweite  $g$  gegeben:

$$M = \frac{b}{g} \quad (4.35)$$

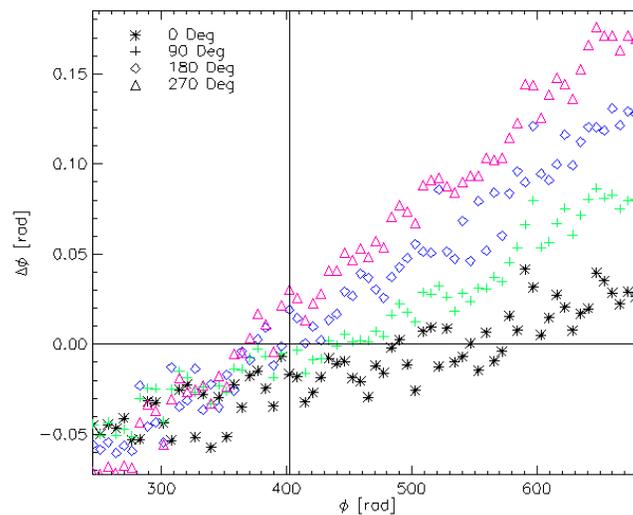
Die relative Änderung des Abbildungsmaßstabs beträgt somit:

$$\frac{M'}{M} - 1 = \frac{b}{g + \Delta g} \cdot \frac{g}{b} - 1 = -\frac{\Delta g}{g + \Delta g} \quad (4.36)$$

Bei einer Gegenstandsweite von  $g = 24 \text{ mm}$  und einer Änderung von  $\Delta g = -10 \text{ }\mu\text{m}$  ergibt sich somit eine Maßstabsänderung von etwa 0,042%. Die Änderung des Maßstabs über der Objektphase ist in Abb. 4.12 dargestellt.



**Abbildung 4.11:** Die Abweichung des Phasenschiebemusters von der Sinus-Form erkennt man am besten, wenn man die normierten Grauwerte  $p_1$  und  $p_2$  bzw.  $p_3$  und  $p_4$  gegeneinander aufträgt.



**Abbildung 4.12:** Die Änderung des Abbildungsmaßstabs für die vier Phasenschiebemuster über  $\phi$ . Für jede Periode ist absolute Phasenverschiebung gegenüber dem Gray-Kode aufgetragen.



# Kapitel 5

## Systembeschreibung und Anwendungen

In diesem Kapitel wird zunächst der genaue Aufbau des *Ganymed* Systems, einer speziellen Implementierung der bisher beschriebenen Methoden, beschrieben. Abschließend werden einige ausgewählte Anwendungen vorgestellt.

### 5.1 Das *Ganymed* 3D-Messsystem

Das *Ganymed* System ist eine Entwicklung der DaimlerChrysler Forschung, Abteilung *Optische Messtechnik und Modelltechnik*. Es ist ein Streifenprojektionssystem auf der Basis aktiver Triangulation und besteht, trotz des einfachen Grundprinzips, aus einer großen Anzahl von Hard- und Softwarekomponenten, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

#### 5.1.1 Sensor-Hardware

In Abb. 1.1 ist der komplett aufgebaute Sensorkopf sowohl in der Prototyp-Form, als auch mit einem Design-Gehäuse dargestellt. Jeweils auf der rechten Seite befindet sich eine Matrix-Kamera und auf der linken Seite ist ein Diaprojektor angebracht, in dem auf einem rotierenden Diaträger aus Glas 14 Muster angeordnet sind, die zur zeitlichen und räumlichen Modulation des Lichts dienen.

Abbildung 5.1 zeigt ein Blockdiagramm der gesamten Sensor-Hardware. Das System besteht aus drei Hauptkomponenten:

- Dem Steuerrechner mit der Software XCode, die den gesamten Datenaustausch zwischen Rechner und Sensor kontrolliert.
- Einer Xenon-Lichtbogen-Lampe (XBO) für inkohärentes Weiß-Licht hoher Intensität.
- Dem eigentliche Sensorkopf, bestehend aus Kamera und Projektor.

Die Subsysteme des Sensors werden im Folgenden näher beschrieben.

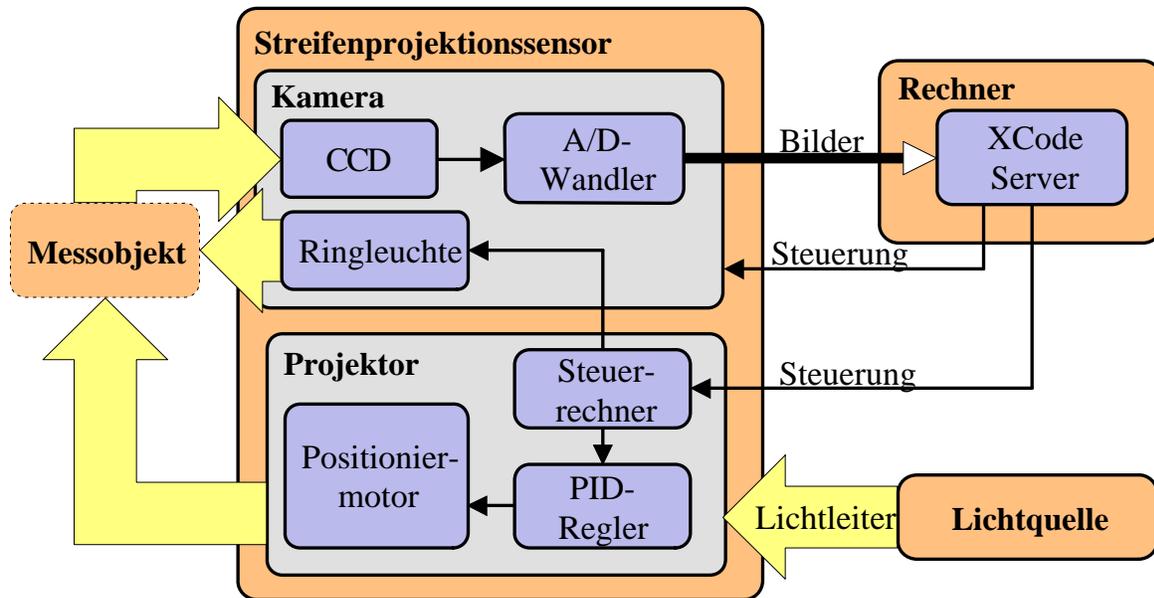


Abbildung 5.1: Die Struktur der *Ganymed* Hardware.

#### 5.1.1.1 Kamera

Die Kamera ist vom Typ *Kodak MegaPlus ES 1.0* auf Basis des Kodak CCD-Sensors *KAI-1010M* mit  $1008 \times 1018$  Bildpunkten in monochromer Ausführung ([Eastman Kodak Company 1999](#)). Die Kamera enthält bereits einen A/D-Wandler, so dass sie ausschließlich über digitale Schnittstellen besitzt. Die Kamera ist mit einem Nikon Objektiv mit 20 mm Brennweite bestückt.

**Retrobeleuchtung:** Als zusätzliche Vorrichtung ist auf dem Objektiv eine Ringlichtquelle bestehend aus etwa 30 hoch intensiven LEDs aufgeschraubt. Sie dienen zur Beleuchtung von so genannten *retroreflektierenden* Passmarken, die für die Navigation des Sensors verwendet werden. Diese Marken sind aus einem Material hergestellt, das aus etwa  $100 \mu\text{m}$  großen Glas-kugeln besteht. Ein ähnliches Material wird auch für die Reflektorstreifen auf Kleidungsstücken verwendet. Die Kugeln reflektieren einen Lichtstrahl mit einem kleinen Öffnungswinkel von zwei bis drei Grad in seine Herkunftsrichtung zurück. Koppelt man die Beleuchtung mit einem Strahlteiler in den Beobachtungs-Strahlengang ein, so ist die Energiedichte des auf einen Kamera-Bildpunkt rückgestrahlten Lichts bei Verwendung eines perfekten Retroreflektor von der Entfernung unabhängig!

Wegen des Öffnungswinkels des Rückstreukegels und der Beleuchtung, die nicht durch das Kameraobjektiv erfolgt, ist trotzdem eine leichte Abnahme der Energiedichte mit der Entfernung feststellbar. Sie folgt jedoch eher einer  $1/r$  Proportionalität als dem  $1/r^2$  Gesetz einer Lambert'schen Oberfläche. Es ist außerdem anzumerken, dass die Rückstreuung vom Einfallswinkel abhängig ist und bei etwa  $45^\circ$  zur Oberflächennormalen erlischt.

Der eigentliche Nutzen dieses Verfahrens liegt in der stark vereinfachten automatischen Verarbeitung der damit gewonnenen Bilder. Wegen der, im Vergleich zu normalen Oberflächen, großen Rückstreuintensität des Retromaterials, erscheinen diese Flächen im Kamerabild selbst

bei Sonneneinstrahlung noch deutlich heller als die Umgebung. Im Normalfall ist der Hintergrund des Bildes fast Schwarz und lediglich die Marken erscheinen hell. In solchen Bildern kann man die Marken einfach mit Hilfe eines konstanten Szenen-unabhängigen Schwellwerts klassifizieren.

**Einkameraprinzip:** Der Aufbau des Sensors mit nur einer Kamera bringt einige entscheidende Vorteile gegenüber einer Mehrkameralösung. Zunächst muss aber der Projektor wie eine inverse Kamera behandelt werden. Das setzt voraus, dass seine äußere und innere Orientierung bekannt sind. Die  $\zeta$ -Koordinate entspricht dann der virtuellen Bildkoordinate des Projektors und definiert eine Lichtebene. Die Objektkoordinaten ergeben sich eindeutig als Schnittpunkt der Lichtebene und des jeweiligen Sehstrahls eines Kamera-Bildpunkts. Die maximale Anzahl der Punkte pro Messung ist somit gleich der Anzahl der Bildpunkte der Kamera.

**Nicht diffus streuende Oberflächen:** Wenn man bedenkt, dass die räumlichen Koordinaten der Objektoberfläche über eine Grauwert-Korrelation der einzelnen Bilder bestimmt werden, zeigt sich, dass das nur bei nahezu perfekt diffus reflektierenden Oberflächen befriedigend möglich ist. Hat die Oberfläche ein richtungsabhängiges Streuverhalten, ist eine Korrelation der Intensitäten, die aus verschiedenen Beobachtungsrichtungen gemessen wurden, ungenau oder sogar unmöglich. Ein extremes Beispiel sind spiegelnde Oberflächen: Hier kann die Eine Kamera ein schwach gestreutes Signal vom Projektor sehen, während die Andere genau in ein Glanzlicht blickt. Beide Kameras sehen dann auf dem selben Objektpunkt eine um mehrere Größenordnungen verschiedene Intensität. Eine Korrelation dieser beiden Messwerte ist nicht mehr möglich. Dieses Phänomen findet sich bei fast allen technischen Oberflächen. Eine Abhilfe ist das Weißeln der Objekte, was nicht immer möglich bzw. gern gesehen ist.

Ein Streifenprojektionssystem mit einer Kamera umgeht diese Problematik völlig. Es bleiben zwar noch die Glanzlichter, die die eine Kamera sieht, aber wie man selbst an diesen Stellen noch messen kann wird später noch dargestellt.

**Abschattung:** Ein weiterer Vorteil des Ein-Kamera-Prinzips ist die Verringerung von Abschattungen. Bei zwei Kameras und einem Projektor existieren drei Lichtwege, die durch das Objekt unterbrochen werden können. Für den Bediener ist es, vor allem bei komplizierten Objekten, eine schwierige Aufgabe die Abschattungsfreiheit aller Lichtwege zu gewährleisten. Bei nur einer Kamera ist das erheblich einfacher: Die Kontrolle des einen Kamerabildes genügt um alle messbaren und nicht messbaren Flächen auf einen Blick zu erkennen.

**Lokale Auswertung:** Schließlich ermöglicht das Ein-Kamera-Prinzip eine rein lokale Auswertung der Messdaten. Es finden keine Korrelationen oder sonstige Verknüpfungen von benachbarten Messpunkten statt, die die Auflösung reduzieren. Jedes Kamera-Bildelement liefert einen unabhängigen Messwert. Mit einem solchen System lässt sich sogar ein Igel vermessen!

### 5.1.1.2 Projektor

Der Projektor unterscheidet sich in zwei wesentlichen Punkten von einem handelsüblichen Diaprojektor: Zum Einen verfügt er über eine sehr große Schärfentiefe, zum Anderen ist die Re-

positionierung der Dias extrem präzise. Die große Schärfentiefe erreicht man durch ein sehr kleines Dia von nur 13,6 mm Kantenlänge und die dadurch bedingte hohe Vergrößerung, sowie eine große Dia-seitige Apertur. Das Dia ist nicht als Absorptionsdia ausgeführt, wie es in der Photographie verwendet wird, sondern als Reflektionsdia, damit es der großen Energiefussdichte stand hält. Als Basismaterial dient Zerodur-Glas, die reflektierenden Bereiche sind mit Chrom beschichtet.

Die Dias sind so auf einer kreisförmigen Scheibe angeordnet, dass sie durch Drehung der Scheibe in den Projektionsstrahlengang gebracht werden können. Der Projektor verfügt außerdem über einen eigenen Mikroprozessor, der neben der an der Kamera befestigten Ringleuchte auch die Positioniereinheit für den Diaträger ansteuert. Die Positioniereinheit verwendet einen PID<sup>1</sup>-Regler um über einen Motor die Diaposition zu regeln. Das Regelsignal wird über eine Lichtschranke erzeugt, die auf der Scheibe angebrachte Markierungen abtastet. Die so erreichte Winkelgenauigkeit der Positionierung beträgt etwa  $8\mu$  rad !

Wegen des großen Dia-seitigen Aperturwinkels der Projektionsoptik ist auch die Schärfentiefe auf der Diaseite sehr klein. Sie beträgt nur wenige zehn Mikrometer. Das erfordert eine sehr genaue rechtwinklige Ausrichtung des Diaträgers zur Drehachse, damit die Scheibe nicht taumelt und so zu unerwünschten Unschärfen und Maßstabsänderungen führt. Hierfür benötigt man eine geeignete Justagevorrichtung und viel feinmechanisches Geschick. Zur Projektion wird ein verzeichnungsarmes 24 mm Objektiv von Nikon eingesetzt.

## 5.1.2 Sensor-Software

Die Software des Sensors besteht aus mehreren unabhängigen Prozessen, die hauptsächlich über TCP/IP kommunizieren. Man spricht auch von einem *Client-Server-System*, da die Dienstgeberprozesse (Server) Aufgaben vom Dienstnehmerprozess (Client) erhalten und diese selbständig abarbeiten. Abbildung 5.2 zeigt die Einzelkomponenten und ihre Kommunikationswege. Die Kommunikation über TCP/IP ermöglicht einen verteilten Aufbau des Systems, da Client und Server auf räumlich getrennten Maschinen laufen, die lediglich über eine Netzwerkverbindung verfügen.

### 5.1.2.1 Digiman

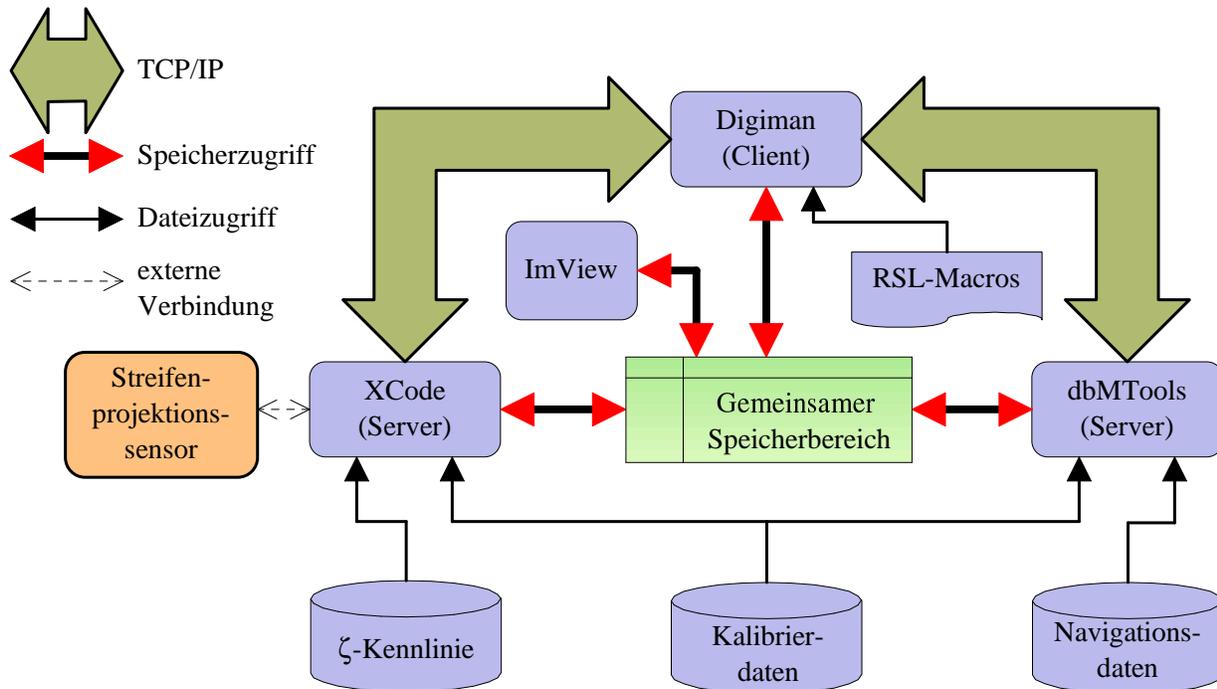
Der Zentrale Client ist *Digiman*. Das Digiman-Programm stellt die Anwendungs-Schnittstelle zur Verfügung und enthält alle Bedienelemente für die Steuerung einer Messung und die Kalibrierung des Sensors. Außerdem hat er umfangreiche Visualisierungs- und Analyse Möglichkeiten für die dreidimensionale *Punktwolke*, die das Messergebnis darstellt. Ebenso kann er die 3D-Daten in vielen wichtigen Austauschformaten exportieren.

Digiman wurde speziell auf die Anforderung zugeschnitten mit sehr großen Punktemengen umzugehen. Auf einem gut ausgestatteten Arbeitsplatz-Rechner sind 100 Millionen Punkte problemlos zu handhaben. Für die schnelle Visualisierung wird eine signifikante Teilmenge verwendet!

Um dem Gesamtsystem eine möglichst große Flexibilität zu verleihen, damit sowohl die Entwicklung der Messstrategien als auch die Anpassung an Kundenwünsche schnell zu bewerkstelligen ist, wurde eine eigene Skriptsprache integriert die so genannte *Reverse Engineering*

---

<sup>1</sup>PID = Produkt-Integral-Differenz



**Abbildung 5.2:** Die Struktur der *Ganymed* Software.

*Script Language* kurz *RSL*. Mit ihr lassen sich zusätzliche Elemente in die Benutzeroberfläche integrieren und Kommandos an die verschiedenen Server schicken. Die gesamte Ablaufsteuerung der Messungen ist in *RSL* implementiert.

### 5.1.2.2 dbMTools

Der *dbMTools*-Server enthält die komplette photogrammetrische Algorithmik. Zentrales Element davon ist der Bündelblockausgleich. Er wird ergänzt durch Funktionen zur Sub-Pixel genauen Messung der Bildkoordinaten der Passmarken, sowie zur Dekodierung ihrer Identifizierungskodes. Hinzu kommen Funktionen für die Navigation und Kalibrierung des Sensors sowie allgemeinen Transformations- und Verwaltungsfunktionen für 2D und 3D Punkte-Listen.

### 5.1.2.3 XCode

Der *XCode*-Server stellt alle Schnittstellen zur Sensor-Hardware zur Verfügung. Das ist zum Einen die Steuerung der Kamera und der Bild-Einzug von der Kamera über einen digitalen Frame-Grabber. Zum Anderen werden die Kommandos für den Projektor erzeugt.

Eine weitere Aufgabe von *XCode* ist die Dekodierung der aufgenommenen Streifen-Sequenzen. Dabei wird aus den Bildern der Gray-Code-Sequenz für jeden Bildpunkt die Nummer des an dieser Stelle projizierten Streifens berechnet. Aus der Phasenschiebe-Sequenz wird die zugehörige relative Objektphase bestimmt und aus beiden die absolute *Objektphase*  $\zeta$  berechnet. Aus dem  $\zeta$ -Bild wird schließlich mit Hilfe der Kalibrierinformation in einem modifizierten Vorwärtsschnitt die 3D-*Punktewolke* berechnet (s. Abschnitt 5.1.3).

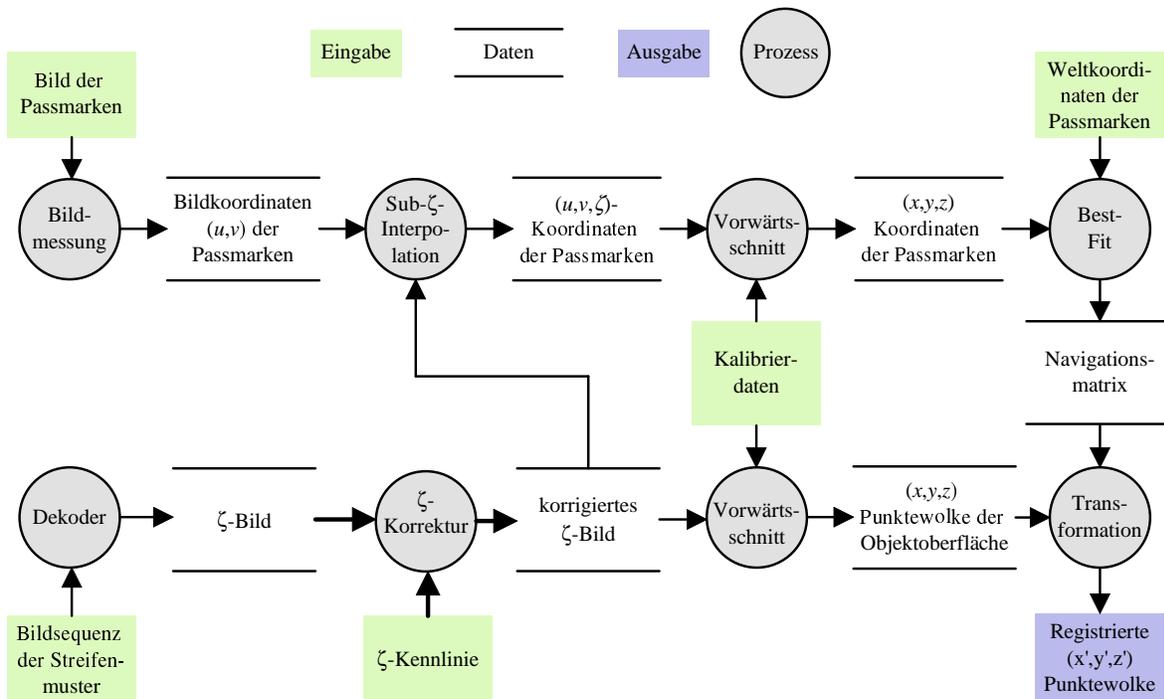


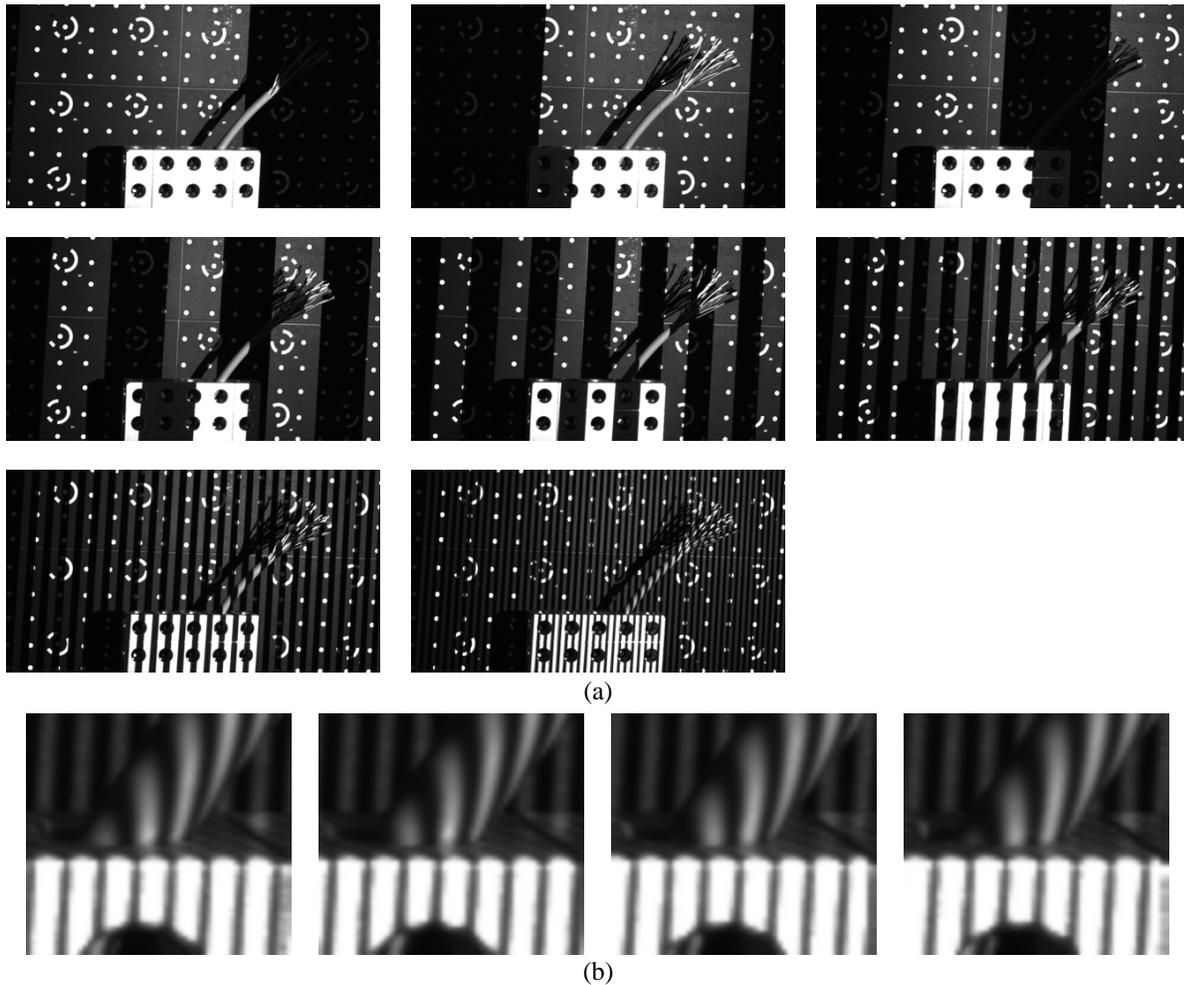
Abbildung 5.3: Das Datenflussschema einer navigierten Messung.

#### 5.1.2.4 Kommunikation

Wie bereits erwähnt kann die gesamte Kommunikation des Systems über Netzwerkverbindungen abgewickelt werden. Das ermöglicht eine räumlich getrennte Installation der einzelnen Komponenten. Die Bediensoftware Digiman kann so z.B. den eigentlichen Sensor-Rechner fernsteuern. Läuft das System aber auf einem einzigen Rechner, so ist es aus Geschwindigkeitsgründen sinnvoll zumindest die großen Datenmengen zwischen den Servern über einen gemeinsam genutzten Speicherbereich auszutauschen. Auf diese Weise werden die Bild-Daten zwischen XCode und dbMTools, sowie dem Bildanzeigeprogramm ImView und die Punktwolke zwischen XCode und Digiman ausgetauscht.

### 5.1.3 Messung und Navigation

Vom Aufnehmen der Bilder bis zur Darstellung der 3D-Punktwolke des Messobjektes ist, wie in Abb. 5.3 dargestellt, die Zusammenarbeit vieler Teilprozesse notwendig. Zunächst müssen die notwendigen Vorab-Informationen zur Verfügung stehen. Das sind die Kalibrierinformation, die die Daten der Abbildungsmodelle von Kamera und Projektor enthält, sowie die so genannte  $\zeta$ -Kennlinie, die sensor-spezifischen Eigenschaften des  $\zeta$ -Dekoders beschreibt. Da die 3D-Daten der Oberfläche zunächst im lokalen Koordinatensystem, des Sensors bestimmt werden, benötigt man noch die Koordinaten der Passmarken im *Weltkoordinatensystem*. Die Transformation vom Sensor- in das Weltkoordinatensystem bezeichnet man auch als *Navigation*, da sie die Bestimmung der Sensorposition im Weltkoordinatensystem beinhaltet.



**Abbildung 5.4:** Eine Sequenz von Graubildern, wie sie die Kamera des *Ganymed* sieht. In a) ist die Gray-Kode-Sequenz dargestellt, b) zeigt eine Ausschnittsvergrößerung des Phasenschiebens aus derselben Sequenz. Der Phasenwinkel beträgt  $90^\circ$ . Die Unschärfe ist vergrößerungsbedingt.

### 5.1.3.1 Nicht navigierte Einzelmessung

Weil die meisten Objekte nicht aus einer einzelnen Position erfasst werden können, benötigt man mehrere *Ansichten*. Für jede Ansicht des Objektes muss der in Abb. 5.3 dargestellte Prozess durchlaufen werden.

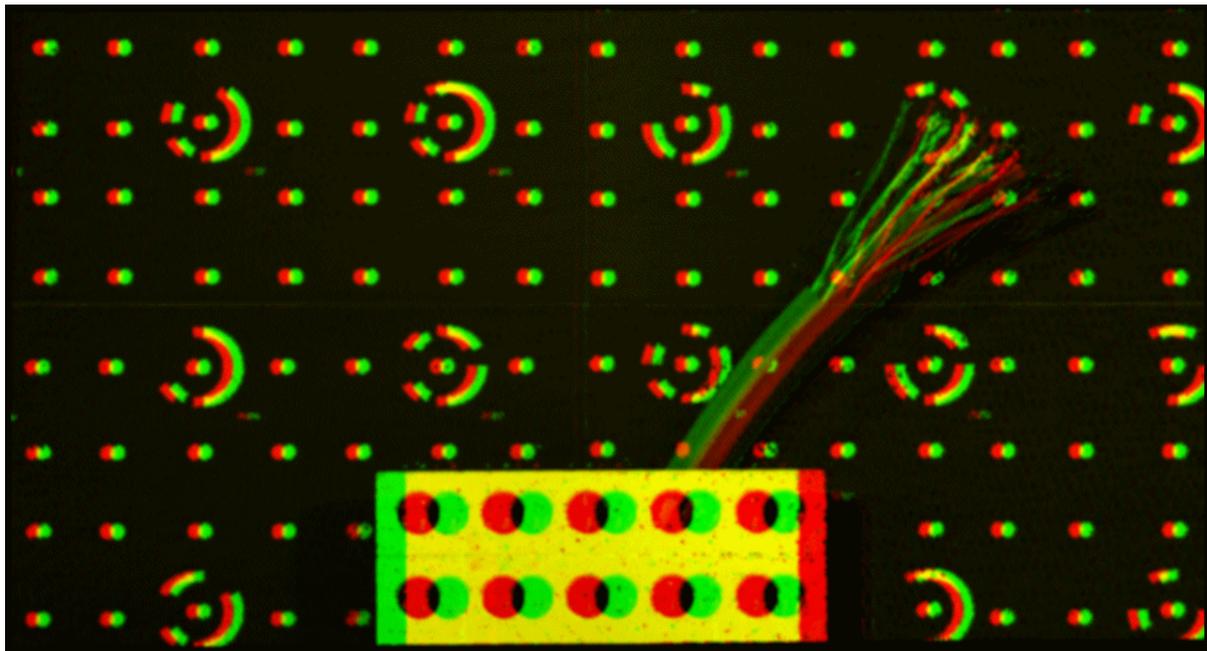
Dabei wird zunächst eine Sequenz der projizierten Streifenmuster für den Gray-Kode und das Phasenschieben aufgenommen. Die Bilder einer solchen Sequenz sind in Abb. 5.4 wiedergegeben. Für die Navigation benötigt man ein Bild der Passmarken unter gleichmäßiger Beleuchtung bzw. Beleuchtung mit der Ringlichtquelle bei Verwendung von retroreflektierenden Passmarken. Aus der Streifen-Sequenz wird im Dekoder das so genannte  *$\zeta$ -Bild* berechnet. Es enthält für jeden Bildpunkt die *Objektphase*  $\zeta$  des auf den zugehörigen Objektpunkt projizierten Streifens. Auf diese Streifennummer wird noch die  $\zeta$ -Kennlinie zur Korrektur angewandt und schließlich mit Hilfe der Kalibrierdaten im Vorwärtsschnitt der zugehörige 3D-Punkt aus den Bildkoordinaten  $(u, v)$  und der Objektphase  $\zeta$  berechnet. Führt man diese Operation für alle Bildpunkte durch, erhält man die *Punktewolke* einer Einzel-Ansicht im Sensorkoordinatensystem.

### 5.1.3.2 Navigationsprinzip

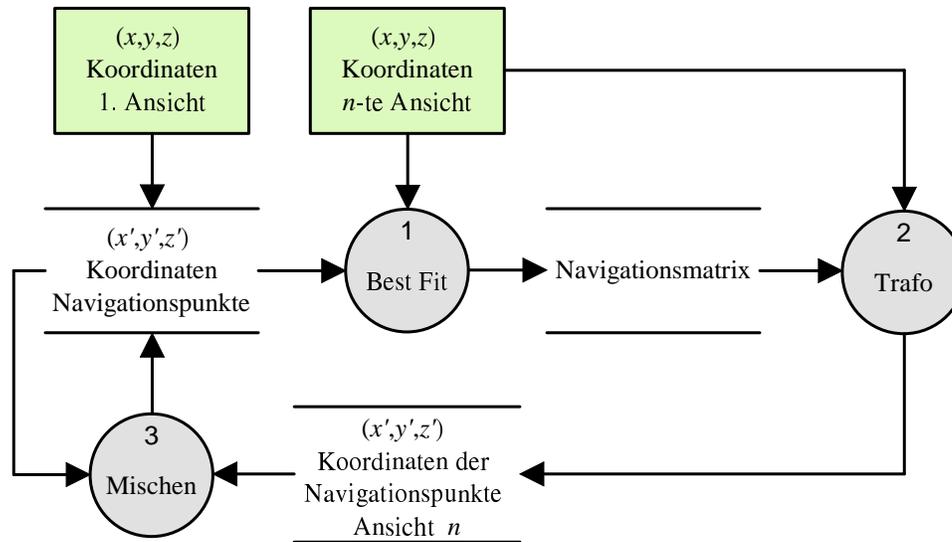
Die Positionsbestimmung des Sensors im vorgegebenen Weltkoordinatensystem erfolgt in einem separaten Prozess. Das Weltkoordinatensystem ist durch die vorab bestimmten Koordinaten der Passmarken festgelegt. Aus dem Bild der Passmarken werden über die so genannte Bildmessung die Sub-Pixel genauen Bild-Koordinaten  $(u, v)$  der Passmarken ermittelt. Für die Bildmessung müssen zunächst die Bildbereiche herausgefiltert werden, die zu den Passmarken gehören. Dazu verwendet man eine einfache Schwellwert Operation. Dann sucht man nach möglichen Kandidaten für Passmarken und überprüft ihren Identifikationscode, der aus Zahlen oder Buchstaben bestehen kann. Ist der Code korrekt erkannt, handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um eine Passmarke. Dann wird der Mittelpunkt der Marke entweder als Grauwert-gewichteter Schwerpunkt oder mittels Kreuz-Korrelation (englisch: „Template-Matching“) bestimmt. Die Genauigkeit der Bildmessung liegt bei photogrammetrischen Anwendungen üblicherweise zwischen  $1/50$  und  $1/100$  Bildpunkt.

Da  $\zeta$  immer nur für ganzzahlige  $(u, v)$  vorliegt, muss  $\zeta(u, v)$  für die genaue Bild-Position der Passmarke interpoliert werden. Dazu werden alle  $\zeta$  auf der Fläche der Marke herangezogen. Das resultierende Koordinaten-Tripel  $(u, v, \zeta)$  kann schließlich mit dem Vorwärtsschnitt in eine 3D-Koordinate transformiert werden.

Da die Marken durch ihre Kodierung eindeutig identifizierbar sind, kann man eine affine Transformation  $\mathcal{N}$  berechnen, die sie aus dem Sensorkoordinatensystem so in das *Weltkoordinatensystem* transformiert, dass der mittlere Abstand zwischen gleich identifizierten Punkten minimal wird. Die Transformation  $\mathcal{N}$  ist eine  $4 \times 4$  Matrix, die eine  $3 \times 3$  Rotationsmatrix und einen Verschiebvektor enthält. Man nennt  $\mathcal{N}$  auch *Navigationsmatrix*. Mit dieser Matrix kann man schließlich die Punktewolke der Objektoberfläche ebenfalls in das Weltkoordinatensystem transformieren.



**Abbildung 5.5:** Ein Rot-Grün-Stereo-Bild der Punktwolke das aus zwei gedrehten Ansichten erzeugt wurde. Die Punktwolke wurde aus der in Abb. 5.4 dargestellten Streifen-Sequenz berechnet. Zur Betrachtung benötigt man eine Brille mit einem Rot-Filter im linken und einem Grün-Filter im rechten Glas. Die Grauwerte des Kamerabildes wurden zur besseren Visualisierung auf die 3D-Punkte abgebildet.



**Abbildung 5.6:** Verfahren zur Navigation auf unbekanntem Passmarken. Die 3D-Koordinaten der Passmarken, die in der ersten Ansicht gemessen wurden, dienen zur Initialisierung der Navigationspunktliste. Dann werden die Prozesse in der nummerierten Reihenfolge für jede weitere Ansicht ausgeführt.

### 5.1.3.3 Navigationsstrategien

**Navigation auf bekannten Passmarken:** Wie oben beschrieben, beruht die Navigation des Sensors auf der Kenntnis der 3D-Koordinaten eines Passmarkenfeldes. An diesem Punkt stellt sich die Frage wozu ein 3D-Messsystem dient, wenn man zu seinem Einsatz noch ein zweites benötigt um die Lage der Referenzpunkte zu messen. Diese Messung kann man im Prinzip mit jeder verfügbaren Technologie, wie mechanischen Koordinatenmessmaschinen, Laserabtastern und anderen durchführen. Aus praktischen Gründen hat sich aber die photogrammetrische Messung eingebürgert. Zum Einen liefert die Photogrammetrie eine hohe Genauigkeit auf Einzelpunkten, zum Anderen verfügt *Ganymed* schon über photogrammetrische Methoden die sich hier wieder verwenden lassen.

Die Passmarken müssen vor der Messung so auf, oder nahe bei dem Messobjekt verteilt werden, dass in jeder gewünschten *Ansicht* mindestens vier Marken sowohl von der Kamera gesehen als auch vom Projektor beleuchtet werden können. Im Prinzip reichen zwar drei Marken zur Navigation, aber erst ab vier Marken ist eine Redundanz-Prüfung möglich. Eine besonders elegante Methode für Serienmessungen und kleine Objekte ist die Verwendung einer *Navigationskulisse*. Dabei werden die Marken auf einer stabile Vorrichtung angebracht, die um das Objekt herum befestigt wird. Man vermeidet dadurch, dass man für jedes Messobjekt die Koordinaten erneut bestimmen muss.

**Navigation auf unbekanntem Passmarken:** Unter bestimmten Umständen kann man auf die Vorabmessung der Passmarken ganz verzichten, denn mit dem *Ganymed* verfügt man ja bereits über ein 3D-Messsystem. Es bietet sich also an, die Koordinaten der Passmarken direkt damit zu bestimmen. Abbildung 5.6 zeigt den entsprechenden Prozess. Man misst zunächst *eine* An-

sicht des Objektes ohne Navigation. Dadurch erhält man die 3D-Koordinaten der Passmarken in dieser Ansicht im Sensorkoordinatensystem. Die folgende Messung wird wieder navigiert, wobei die Passmarkenkoordinaten aus der ersten Ansicht als Navigationspunkte benutzt werden. Passmarken aus der zweiten Ansicht, die nicht zur Navigation benutzt wurden, können zur Liste der Navigationspunkte hinzugefügt werden. Mit den folgenden Ansichten wird genauso verfahren.

Voraussetzung für diese Methode ist, dass die Marken so dicht gesetzt wurden und die einzelnen Ansichten so viel Überlapp haben, dass jede neue Ansicht mindestens vier bereits bekannte Marken enthält. Außerdem besteht bei diesem iterativen Vorgehen immer die Möglichkeit, dass sich Fehler kumulieren. Deshalb sollte am Ende der Messung eine Ausgleichsrechnung durchgeführt werden, die die mittleren Abstände zwischen den Navigationspunkten in allen Ansichten durch Anpassen der Navigationstransformation minimiert.

**Markenfreie Navigation:** Es existieren auch einige Ansätze, die vollständig auf Passmarken verzichten. Dabei wird die Gestalt des Messobjektes benutzt, um die einzelnen Ansichten aufeinander zu registrieren. Die großen Nachteile dieser Methode liegen im hohen Rechenaufwand, schlechten Ergebnissen bei merkmalslosen Oberflächen – man denke an eine Kugel oder eine ebene Fläche – und vor allem der fehlenden On-Line-Fähigkeit. Alle Verfahren dieser Art können erst benutzt werden, wenn schon von der gesamten Objektoberfläche Daten vorliegen. Dadurch entfällt die Möglichkeit zur Vollständigkeitskontrolle und zur Orientierung des Bedieners während der Messung. Man muss sozusagen „blind“ messen. Die Vermessung großer und komplexer Objekte ist so nicht möglich.

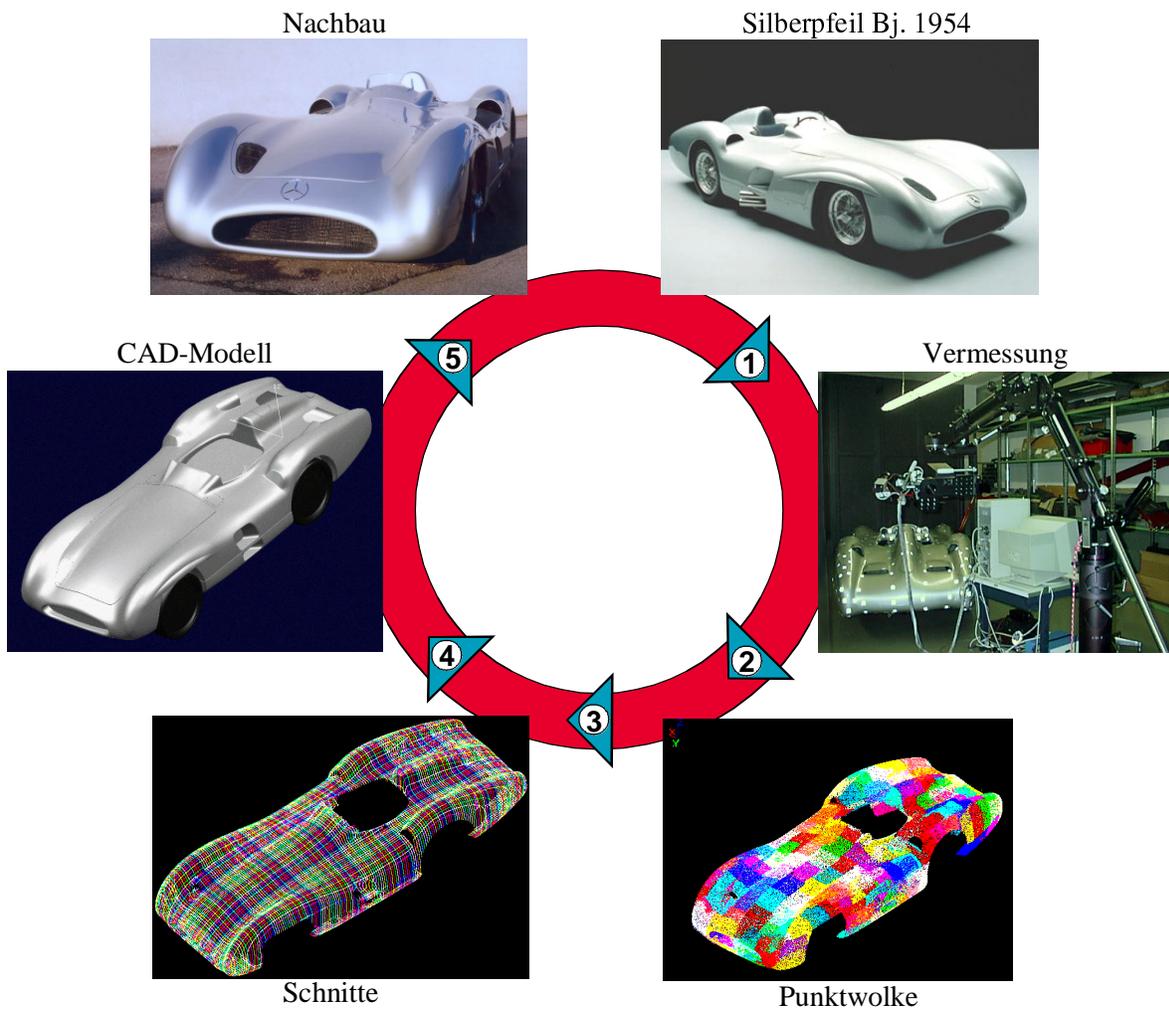
## 5.2 Ausgewählte Anwendungen

Hier werden einige ausgewählte Anwendungen des *Ganymed* Systems beschrieben. Die vorgestellten Algorithmen und Methoden wurden an und für diese Systeme entwickelt und erprobt.

### 5.2.1 Rekonstruktion historischer Fahrzeug-Karosserien

Dieses Projekt, das im Dezember 1998 durchgeführt wurde, hatte das Ziel, historische Fahrzeuge der *Silberpfeil* Baureihe von *Mercedes-Benz* aus den Jahren 1926 bis 1954 in digitaler Form zu konservieren und die Möglichkeit zur Rekonstruktion zu schaffen. Bei allen Fahrzeugen handelt es sich um Einzelstücke, deren Pläne entweder verschollen sind oder nie angefertigt wurden. Die Fahrzeuge sind teilweise in desolatem Zustand. Sie werden noch regelmäßig bei Oldtimer-Rennen gefahren und sind gelegentlich auch in leichtere Unfälle verwickelt. Außerdem ist die Magnesium Legierung der Karosserien nicht korrosionsbeständig. Mit Hilfe des Reverse-Engineering-Zyklus, der in Abb. 5.7 dargestellt ist, kann zumindest der Ist-Zustand konserviert werden.

Der ganze Prozess von der Digitalisierung bis zum Nachbau soll hier beispielhaft an einem Silberpfeil aus dem Baujahr 1954 dargestellt werden. Zur Erfassung des Fahrzeuges wurde es zunächst mit etwa 250 Textcode-Marken signalisiert und photogrammetrisch vermessen. Für die photogrammetrische Messung wurden rund 150 Fotos des Fahrzeuges mit einer hoch auflösenden Digital-Kamera mit  $3000 \times 2000$  Bild-Punkten aufgenommen. Die Berechnung der 3-D-



**Abbildung 5.7:** Der Reverse-Engineering-Prozess am Beispiel eines Silberpfeils, Baujahr 1954. Vom Original wurde in 14 Stunden Messzeit (1) eine Punktwolke mit 98 Millionen Messpunkten (2) erzeugt. Diese wurden auf achsparallele Schnitte im Abstand von zwei Zentimetern reduziert (3), auf denen in etwa 80 Arbeitsstunden (4) ein CAD-Modell konstruiert wurde. Auf Basis des CAD-Modells wurde schließlich ein Nachbau im Maßstab 1:1 angefertigt (5).

Koordinaten der Marken erfolgte mit dem DaimlerChrysler-Photogrammetrie-System (DCPS). Das so bestimmte Passpunktfeld wurde auf das Ganymed-System übertragen und diente zur Navigation der Einzel-Ansichten bei der folgenden flächenhaften Vermessung.

Die flächenhafte Vermessung des Fahrzeugs wurde mit dem Ganymed'98 System durchgeführt. Als Auswerte-Rechner diente ein  $2 \times 300$  MHz Pentium II mit 512 MByte Hauptspeicher unter dem Betriebssystem Windows NT. Innerhalb von 14 Stunden wurden 163 Ansichten der gesamten Blech-Oberfläche erfasst. Daraus resultierte eine Punktwolke mit 98 Millionen Punkten und einem Daten-Volumen von 2,19 GByte. Die Erfassungs-Rate betrug somit rund 2000 Punkte pro Sekunde. Im nächsten Schritt wurden die Überlappungen der einzelnen Ansichten mit einem so genannten *Grid-Filter* entfernt. Die verbleibende Punktwolke hatte noch 48 Millionen Punkte. Da diese Datenmenge bei allen gängigen CAD-Systemen immer noch weit jenseits der Leistungsgrenze liegt, wurde die Punkte-Menge auf achsparallele Schnitte im Abstand von 2,5 Zentimetern reduziert. Danach verblieb noch etwa eine Million Punkte, auf denen in rund 80 Arbeitsstunden ein CAD-Modell konstruiert wurde, das schließlich für die Rekonstruktion eines Karosserie-Nachbaus benutzt wurde.

## 5.2.2 Oblisk II Sensor

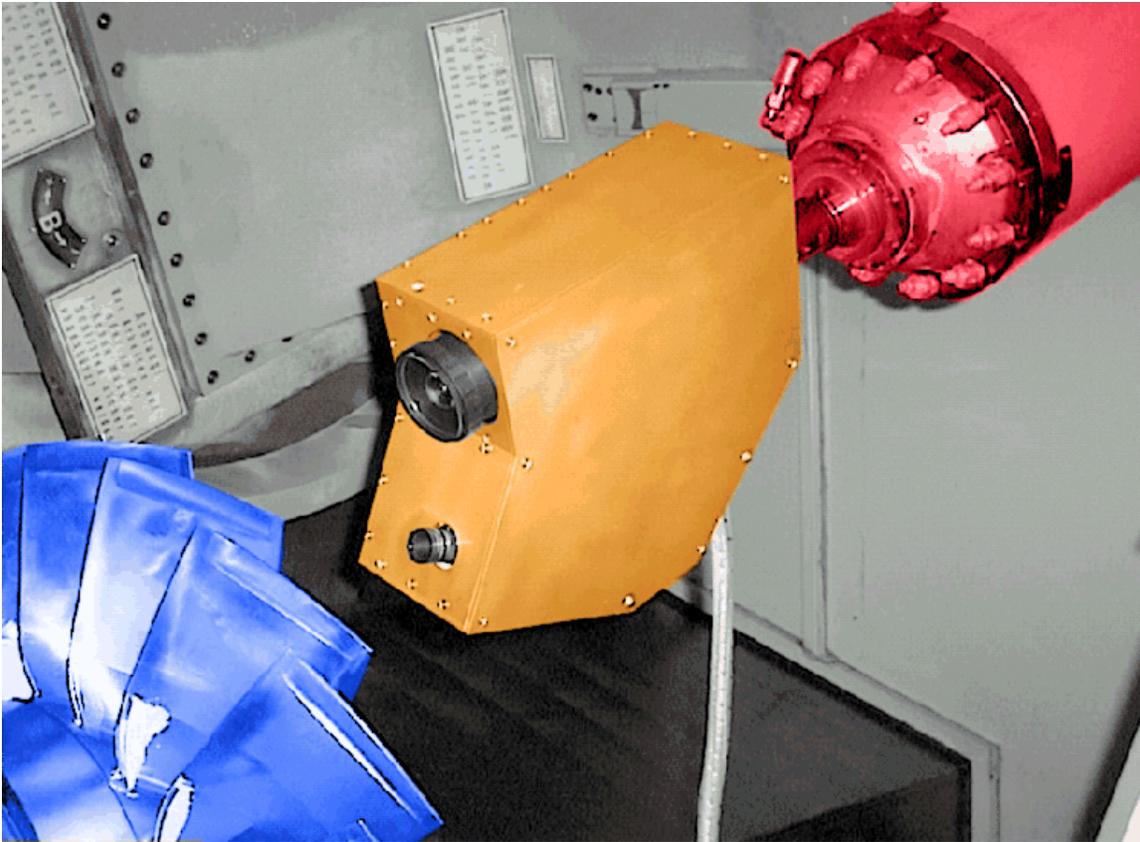
Das Oblisk System diente zur optischen Vermessung von so genannten *Blisks* (Blade Integrated Disks). Das sind Turbinen-Schaufeln, die in Strahltriebwerken von Flugzeugen eingesetzt werden. Bei der Herstellung werden einzelne Blätter auf die Nabe aufgeschweißt und anschließend mit einer 5-Achsen-CNC-Fräsmaschine in die endgültige Form gefräst. Wegen der hohen Herstellungskosten ist man bestrebt z.B. durch Vogel-Schlag beschädigte Schaufeln zu reparieren.

Für die Verwirklichung dieses Zieles wurde das Oblisk-System entwickelt. Es handelt sich dabei um eine Variante des *Ganymed* Systems, die mit einem LCD-Projektor ausgerüstet wurde, um kürzere Messzeiten zu erreichen. Das Messvolumen war mit  $200 \times 200 \times 150 \text{mm}^3$  auf die Größe der Blisks angepasst. Der Sensor wurde in der CNC-Fräsmaschine an Stelle des Fräskopfes montiert und kann so Programm-gesteuert alle zur Vermessung und Kalibrierung nötigen Positionen selbständig anfahren.

### 5.2.2.1 Hybrid-Navigation

Für die Navigation des Sensors wurde ein hybrides optisches und mechanisches Verfahren benutzt. Dadurch konnte auf eine Signalisierung der Blisks vollständig verzichtet werden. Die Fräsmaschine verfügt über eine hoch präzise Verschiebe-Einheit, die mit einer Genauigkeiten unter 0,1 mm spezifiziert ist. Außerdem befindet sich in der Maschine eine mit photogrammetrischen Marken bedruckte Platte. Die Koordinaten der Marken sind im Maschinen-Koordinatensystem bekannt.

Zur Navigation wird der Sensor zunächst mit den beiden Drehachsen der CNC-Maschine in die für die nächste Messung richtige Winkel-Position gefahren. Dann wird er mit den Translations-Achsen verschoben bis die Navigations-Kulisse im Mess-Feld liegt. Mit einer Messung der Kulisse wird eine optische Navigations-Matrix  $\mathcal{M}_o$  bestimmt, die sowohl Translations- als auch Rotations-Anteile enthält. Dann wird der Sensor über eine reine Translations-Bewegung in die Mess-Position vor dem Blisk gefahren. Da diese Translation im Maschinen-Koordinatensystem bekannt ist, kann man für sie eine mechanische Navigations-Matrix  $\mathcal{M}_m$  angeben. Das Produkt



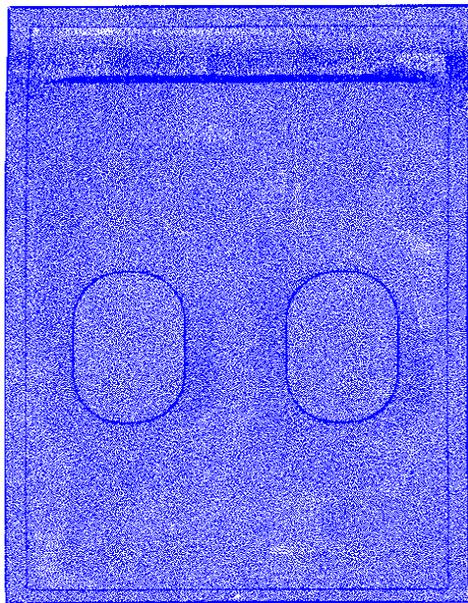
**Abbildung 5.8:** Das auto-kalibrierende Oblisk-System. Der Sensor (Orange) ist anstelle eines Fräasers auf der Spindel (Rot) einer Fünf-Achsen-CNC-Fräsmaschine montiert. Die laterale Verschiebung wird über die präzise Mechanik der Fräsmaschine erfasst. Die Rotations-Freiheitsgrade werden optisch über eine im Bild nicht sichtbare Kulisse bestimmt. Das System vermisst Turbinen-Schaufeln (Blau), die in dieser Maschine gefertigt oder repariert wurden.

der beiden Matrizen liefert die benötigte Transformation vom Sensor-Koordinatensystem in das Maschinen-Koordinatensystem.

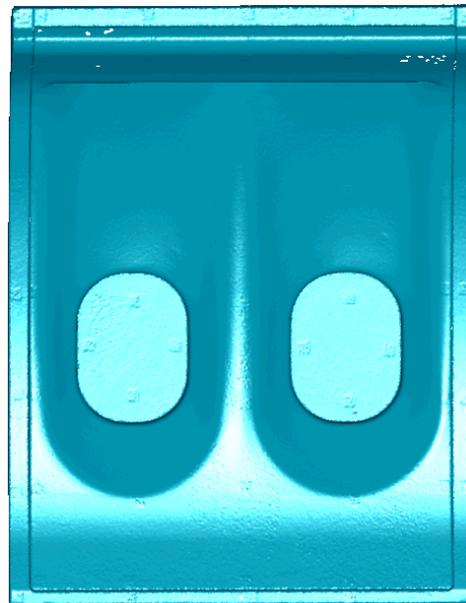
### 5.2.3 Flächen-Rückführung einer Airbus Kabinen-Verkleidung

Am Beispiel der Kabinen-Verkleidung eines Airbus Flugzeuges soll die Komplexität einer vollständigen Flächen-Rückführung erläutert werden. Die Aufgabenstellung bei diesem Teil war, für ein manuell von Designern angefertigtes physikalisches 1:1 Modell, ein CAD-Modell, das allen Anforderungen des Flugzeugbaus entspricht, zu erstellen. Die wesentlichen Kriterien waren:

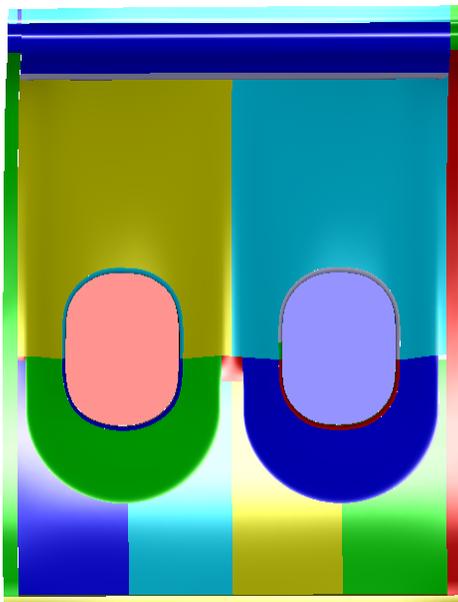
- Stetigkeit der ersten Ableitung an allen Flächen-Übergängen
- Möglichst kleine Abweichungen vom Modell



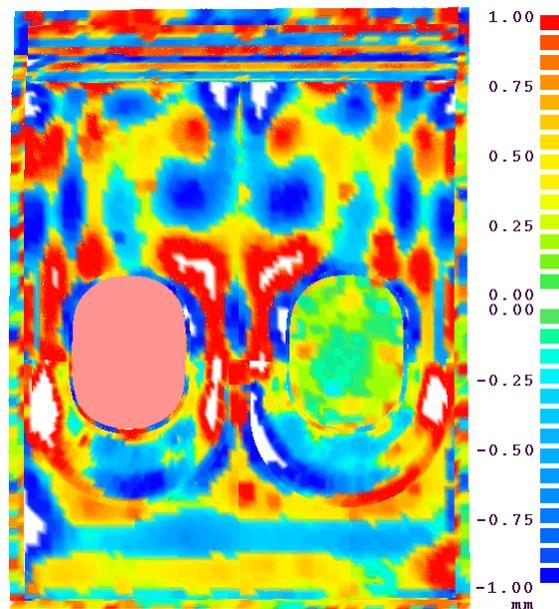
(a) Punktwolke



(b) Triangulierte Punktwolke



(c) CAD-Modell



(d) Soll-Ist-Vergleich

**Abbildung 5.9:** Flächen-Rückführung einer Airbus Kabinen-Verkleidung. Das Teil ist etwa  $1,8 \times 1,2\text{m}^2$  groß. Die ovalen Ausschnitte sind für die Fenster vorgesehen.

- Verwendung von Regel-Geometrien (Ebenen, Zylinder, Kugeln, etc.) an bestimmten Punkten

In Abb. 5.9 sind die wesentlichen Zwischenergebnisse des Prozesses dargestellt. Zunächst wurde, genau wie bei der Vermessung des Silberpfeils, mit der Photogrammetrie ein Passpunktfeld bestimmt. Anschließend folgte die flächenhafte Vermessung des Modells mit dem *Ganymed* System. Die Punktwolke ist in Abb. 5.9(a) dargestellt. Zur besseren Visualisierung wurde die Punktwolke trianguliert (5.9(b)). Bei genauem hinsehen erkennt man sogar die nur 100  $\mu\text{m}$  dicken Aufkleber der photogrammetrischen Marken.

Anschließend wurde auf der Punktwolke ein CAD-Modell konstruiert, das den oben genannten Anforderungen entspricht. Da diese Anforderungen sowohl von Aufgabe zu Aufgabe als auch von Firma zu Firma stark variieren, gibt es bisher noch kein voll-automatisches System, für dieses Problem. In Abb. 5.9(c) ist das fertige CAD-Modell dargestellt. Die einzelnen Flächenelemente, die bestimmten Typen von Regel-Geometrien oder Frei-Form-Flächen entsprechen sind unterschiedlich eingefärbt. Wie genau das CAD-Modell schließlich zur Punktwolke passt, liegt im Ermessen des Konstrukteurs bzw. der oben aufgeführten Randbedingungen. Nicht immer lassen sich alle Bedingungen gleich gut erfüllen. So bringt die Forderung nach Regel-Geometrien zwangsläufig Abweichungen zum physikalischen Modell mit sich.

### 5.2.3.1 Soll-Ist-Vergleich

Um die Abweichungen zwischen CAD-Modell und Punktwolke zu überprüfen wurde ein so genannter *Soll-Ist-Vergleich* durchgeführt. Dabei berechnet man für jeden Punkt der Punktwolke den Euklidischen Abstand zum CAD-Modell und visualisiert ihn (Abb. 5.9(d)). Befinden sich CAD-Modell und Punktwolke im gleichen Koordinatensystem, ist diese Operation einfach durchführbar und ergibt ein definiertes Ergebnis.

Der Soll-Ist-Vergleich dient auch dazu, die Form-Genauigkeit von Fertig-Teilen zu kontrollieren. Da man in diesem Fall die Punktwolke nicht automatisch im Koordinatensystem des CAD-Modells erhält, muss sie dort hin transformiert werden. Diesen Prozess bezeichnet man als *Registrierung*. Die Registrierung ist zu komplex, als dass sie sich hier umfassend darstellen ließe. Wesentlich ist, dass man für eine aussagefähige Registrierung detailliertes Wissen über die Funktion des Bauteils benötigt. Es genügt nicht, das mittlere Abstands-Quadrat aller Punkte zum CAD-Modell zu minimieren! Richtiger ist es die Registrierung auf den funktionalen Flächen des Bauteils durch zu führen.

Das lässt sich am besten am Beispiel einer Tür erläutern. Die funktionalen Flächen der Tür sind die Scharniere und der Anschlag. Die Form des Tür-Futters ist dagegen unwesentlich für die Funktion. Es ist somit notwendig die Registrierung nur an den Scharnieren durch zu führen um die Abweichung am Anschlag zu berechnen.

### 5.2.4 *Ganymed*@Kalimero

Ein laufendes Projekt ist die Entwicklung eines *aktiven Messsystems*. „Aktiv“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das System über eine eigene Strategie verfügt um die Aufnahme-Positionen zu planen und diese Positionen mit einer mobilen Plattform selbständig anzufahren (von Ehr, Dillmann und Vogt 1999; Graf, von Ehr, Dillmann, Zilker und Vogt 1998). Das



**Abbildung 5.10:** Der autonome Messroboter *Kalimero* verfügt über sechs Freiheitsgrade und trägt den *Ganymed* Sensor. Er navigiert auf dem Marken-Feld des Messobjektes und verfügt über eine adaptive Strategie zur Wahl des günstigsten Aufnahme-Standortes.

Ziel ist, dem System nur das photogrammetrisch bestimmte Navigations-Feld zur Verfügung zu stellen. Die flächenhafte Messung soll dann unbeaufsichtigt autonom ablaufen.

Für dieses Projekt wurde ein Prototyp des *Ganymed* Systems auf eine, vom Institut für Prozess-Rechen-Technik (IPR) der Universität Karlsruhe entwickelte, autonome Plattform gesetzt: Der **Karlsruher lineare Mess-Roboter *Kalimero***. *Kalimero* verfügt über sechs Freiheitsgrade: Die Basis kann über zwei unabhängig angetriebene Räder sowohl auf der Stelle drehen, als auch gerade aus fahren. Der Sensor ist an einem Handgelenk mit zwei Freiheitsgraden angebracht, das wiederum auf zwei, senkrecht zueinander montierten, Linear-Antrieben sitzt.

Das System soll das Messobjekt als Teil seiner Umwelt begreifen und sein anfängliches Wissen darüber mit Hilfe des *Ganymed* Sensors verfeinern. Die Mess-Strategie muss laufend an das verfeinerte Modell angepasst werden und soll auch mit unerwarteten Situationen zu-recht kommen.

# Kapitel 6

## Schluss

Es konnte gezeigt werden, dass ein freifliegendes Streifenprojektionssystem mit einer Kamera auch außerhalb des Labors zuverlässig und genau mit einem einfach zu handhabenden Verfahren kalibriert werden kann. Durch die separate Bestimmung der photogrammetrischen Kalibrierung und der OPTF-Korrektur vereinfacht sich die Modellierung des Sensors sehr. Weiterhin wurde in Kap. 2 ein Modell mit wenigen Parametern zur Berechnung der Auflösungsgrenze eines Streifenprojektionssystems vorgelegt, das anhand der Messwerte für die OPTF bestätigt werden konnte.

Die Robustheit des Systems konnte durch bessere Ausnutzung des Informationsgehaltes der Gray-Kode- und Phasenschiebe-Vektoren deutlich gesteigert werden. Im Zusammenhang damit konnte dem System eine Fehler-Klassifikation entwickelt, die einem menschlichen Bediener oder einer nachfolgenden automatischen Auswerte-Einheit erlaubt die Ursachen für das partielle oder vollständige Scheitern einer Messung zu ergründen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Die erreichte Gesamt-Genauigkeit des Systems liegt schließlich unter den geforderten 0,1 mm.

Trotz der Erfolge bei der Optimierung des Systems besteht noch auf einigen Gebieten Handlungsbedarf. So wäre es notwendig eine präzisere Modellierung der Radianzfunktion der Phasenschiebemuster zu erhalten. Damit sollte eine Korrektur der OPTF möglich sein, die den Messfehler auf das Maß reduziert, das durch die Genauigkeitsgrenze (2.35) festgelegt ist.

Erheblich mehr Bedarf besteht allerdings bei der Verarbeitung der gewonnenen 3D-Messwerte. Die Anbindung an nachfolgende Auswerte-Prozesse ist bisher nur sehr indirekt. Ziel sollte es sein, dass der optische Sensor direkt Messwerte über Objektmerkmale wie „Bohrungsdurchmesser“ oder „Kantenlänge“ liefert, ohne dass der Benutzer manuell eine entsprechende Auswerte-Methode auf die Punktwolke anwenden muss.



# Kapitel 7

## Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle in chronologischer Reihenfolge all jenen danken, die mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Da sind zunächst meine Eltern und meine Geschwister, die mir das Physik-Studium durch ihre Unterstützung erst ermöglicht haben. Herr Dr. Torsten Scheuermann, der mir den Themenbereich empfahl sowie Herr Dr. Gerhard Jünemann, der mir diese Arbeit ermöglichte, mir den notwendigen Freiraum zur Erlangung meiner Ziele verschaffte und meine persönliche Entwicklung förderte, sowie Prof. Reinhard Malz, der mich zu dem Thema hinführte. Großer Dank gebührt Prof. Bernd Jähne, der bereitwillig meine universitäre Betreuung übernahm. Aus den Gesprächen mit ihm entstanden immer wieder weiterführende Ideen und in den schwierigen Phasen war er stets motivierend. Prof. Karlheinz Meier übernahm dankenswerter Weise das Korreferat.

Weiterhin möchte ich Johannes Kilian für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit danken und dafür, dass er mir die photogrammetrischen Grundlagen beibrachte. Dr. Marcus Ziegler, Dr. Andreas Zilker, Dr. Bernd Pollak und Dr. Thomas Schreiber danke ich für die beständige Diskussionsbereitschaft über Themen der Streifenprojektion und Photogrammetrie, so wie Dr. Klaus Fürderer für die Verminderung meiner administrativen Belastung. Daniela Ferber und Dr. Stefan Ferber verdienen besonderen Dank für ihre herzliche Gastfreundschaft und die Hilfe bei der Suche nach dem roten Faden. Herzlicher Dank geht auch an Dr. Horst Beyer und Graeme van der Vlugt für ihre photogrammetrie Software und ihr Wissen, ohne das diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ebenso wichtig war die Unterstützung des Software-Teams um Werner Jungbauer, Jürgen Riegel und Berthold Grupp die mir bei der Realisierung meiner Ideen immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Nicht zu vergessen Hubert Bieder, der mir durch Beschaffung einer zeitgemäßen Rechnerausstattung und durch den selbstlosen Verzicht auf einen 24-Zoll-Monitor einen so produktiven Arbeitsplatz ermöglichte. Sehr hilfreich für meine Arbeit war auch der perfekte Service der Bibliothek im Forschungszentrum Ulm, die mir meine Literaturwünsche immer in kürzester Zeit erfüllten. Mein Dank gilt selbstverständlich auch allen Mitarbeitern des IWR, die mir, durch die so notwendigen wissenschaftlichen Diskussionen zu einem steten Vortschritt meiner Arbeit verhelfen, sowie all jenen die ich hier nicht erwähnt haben mag.

Meiner Frau Melanie gebührt ganz besonderer Dank, für ihre moralische und praktische Unterstützung, ihre Geduld und ihre Liebe.



# Anhang A

## Glossar

**Ansicht:** Eine einzelne flächenhafte Messung eines Objektes im Sensorkoordinatensystem. Zur vollständigen Erfassung großer oder komplexer Objekte werden meist mehrere Ansichten benötigt, die in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem navigiert werden müssen.

**Bildkoordinatensystem:** Zweidimensionales Koordinatensystem mit den Koordinaten  $u$  und  $v$ , das an die Abbildungsebene einer Kamera oder eines Projektors gebunden ist. Einheitsvektoren  $\hat{u}$  und  $\hat{v}$ .

**digitale Nahbereichsphotogrammetrie:** Die digitale Nahbereichsphotogrammetrie bezieht sich auf Objekte in der Größenordnung zwischen  $10^{-1}$  und  $10^2$  Metern. Die größten Objekte auf die Nahbereichsphotogrammetrie angewandt wird sind Schiffe und Bauwerke wie Brücken und Tunnels. Die Bezeichnung *Nahbereich* steht im Gegensatz zur *Luftbildphotogrammetrie*. Einen umfassenden Überblick bietet (Luhmann 2000).

**Objektphase:** Der Phasenwert  $\varphi$  bzw.  $\zeta$ , der mit dem Phasenschiebverfahren oder einer Kombination von Phasenschieben und Gray-Kode für einen Objektpunkt bestimmt wurde.

**Phasenschiebverfahren:** Beim Phasenschiebverfahren werden meist sinusförmig modulierte Muster in mindestens drei verschiedenen Phasenlagen auf das zu vermessende Objekt projiziert. Aus den an einem Objektpunkt gemessenen Intensitätswerten lässt sich die Amplitude, die Hintergrundhelligkeit und die Phasenlage des Objektpunktes ermitteln.

**Punktewolke:** Eine Menge von Punkten  $P_i$ , die durch ihre Koordinaten  $x, y$  und  $z$  in  $\mathbb{R}^3$  definiert sind. Den Punkten können weitere Attribute zugeordnet sein wie Qualität des Messwertes, Nummer der Ansicht, Farbe der Objektoberfläche und andere.

**Rückwärtsschnitt:** Berechnung der äußeren Orientierung der Kamera bei bekannter innerer Orientierung und bekannten 3D- und Bildkoordinaten. Ab sechs Punkten gibt es eine direkte Lösung: Die Direkte Lineare Transformation (DLT) (Luhmann 2000, Kap. 4.2.3) (Abdel-Aziz und Karara 1971).

**Sensorkoordinatensystem:** Willkürliches, durch die Kalibrierung festgelegtes, kartesisches und metrisches Koordinatensystem, das an den mechanischen Aufbau des Sensors gebunden ist. Einheitsvektoren  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  und  $\hat{z}$ .

**statisches Rauschen:** Englisch: „Fixed-Pattern-Noise“. Ein der Bildinformation überlagertes Muster, das durch den Dunkelstromeffekt des Bildsensors und die lokale Variation der Lichtempfindlichkeit verursacht wird. Der Effekt ist zeitlich konstant und Räumlich variabel. Zur Messung des statischen Rauschens sowie zur Radiometrischen Kamerakalibrierung siehe (Healey und Kondepudy 1994).

**Vorwärtsschnitt:** Bestimmung des Schnittpunktes von mehreren Sehstrahlen. Dient zur Berechnung der Objektkoordinaten aus den Bildkoordinaten von mindestens zwei Aufnahmen bei bekannten inneren und äußeren Orientierungen der beteiligten Kameras. Das Problem kann bei mehr als zwei Kameras lokale Minima aufweisen und ist daher nicht trivial zu lösen.

**Weltkoordinatensystem:** Kartesisches und metrisches Koordinatensystem, das an das Messobjekt oder an eine, zum Zeitpunkt der Messung fest mit dem Messobjekt verbundene, Kulisse gebunden ist. Einheitsvektoren  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$  und  $\hat{z}$ .

**$\zeta$ -Bild:** Das  $\zeta$ -Bild enthält für jeden Bildpunkt die Objektphase  $\zeta$  oder  $\varphi$  des auf den zugehörigen Objektpunkt projizierten Streifens.

# Anhang B

## Herleitungen

### B.1 Lineare Regression

Die Herleitung der linearen Regression wird, ihrer Nützlichkeit wegen, hier ausführlich erläutert.

Die Funktion

$$y(x) = ax + b \quad (\text{B.1})$$

soll an einen Datensatz mit den  $n$  unabhängigen Elementen  $x_i$  und den abhängigen Elementen  $y_i$  nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angepasst werden.

Die quadratische Fehlersumme  $\varepsilon$  der Anpassung lautet dann:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (\text{B.2})$$

Das Ziel der Regressionsrechnung ist ein Wertepaar  $(a, b)$  zu bestimmen für die  $\varepsilon$  minimal wird.

Das Minimum von  $\varepsilon$  bestimmt man über die Nullstellen der partiellen Ableitungen von  $\varepsilon$  nach  $a$  und  $b$ :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial a} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot (y_i - ax_i - b) \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b} = -2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - ax_i - b \quad (\text{B.4})$$

Dass die Nullstellen von (B.3) und (B.4) auch tatsächlich in einem Minimum von (B.2) liegen wird offensichtlich, wenn man die zweiten Ableitungen betrachtet:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial a^2} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 > 0 \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial b^2} = 2n > 0 \quad (\text{B.6})$$

Durch nullsetzen von (B.3) und (B.4) erhält man ein Lineares Gleichungssystem in  $a$  und  $b$ , dessen Lösung das gesuchte Minimum darstellt:

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad (\text{B.7})$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{B.8})$$

Die Lösung lautet:

$$a = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - \left(\sum x_i\right)^2} \quad (\text{B.9})$$

$$b = \frac{1}{n} \left( \sum y_i - a \cdot \sum x_i \right) \quad (\text{B.10})$$

Der Übersichtlichkeit halber sind die Grenzen der Summen weggelassen.

## B.2 Beugungsbild des Einzelspaltes

### B.2.1 Fraunhofer-Beugung

Das Beugungsbild des Einzelspaltes wird durch die Überlagerung von unendlich vielen Elementarwellen, aus unendlich schmalen Spalten, die unendlich nah zusammen liegen und sich insgesamt zur Breite  $D$  summieren, beschrieben. Die Amplitude  $A$  auf einem unendlich weit entfernten Schirm lautet dann in Abhängigkeit vom Ausfallswinkel  $\beta$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

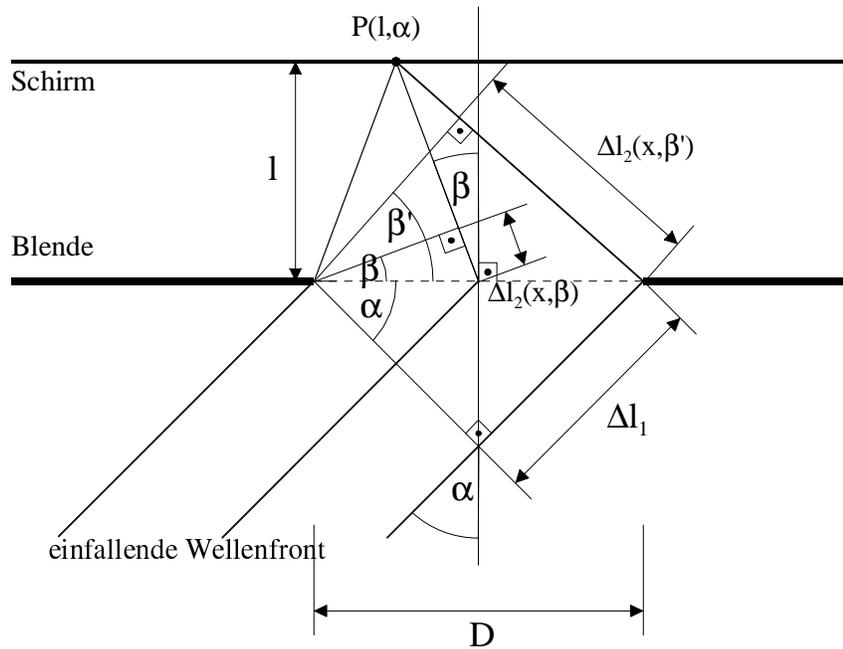
$$A(\beta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \beta\right)}{\frac{\pi D}{\lambda} \sin \beta} \quad (\text{B.11})$$

Diesen Fall bezeichnet man auch als *Fraunhofer-Beugung*. Diese Aussage ist jedoch nur zutreffend, wenn die einfallende Welle genau senkrecht auf den Spalt trifft.

### B.2.2 Winkelabhängige Fraunhofer-Beugung

In einer Projektionsanordnung wie sie in einem Diaprojektor verwendet wird ist jedoch keine parallele Beleuchtung des Gitters möglich. Der Strahlengang durch das Dia ist konvergent. Der Einfallswinkel  $\alpha$  des Lichtes ist somit ungleich null. Das führt dazu, dass die Weglängenunterschied der Partialwellen nicht nur auf der ausfallenden Seite, sondern auch auf der einfallenden Seite berechnet werden muss.

Die geometrischen Zusammenhänge sind in Abb. B.1 dargestellt. Für einen Schirm oder eine Lichtquelle in endlicher Entfernung vom Spalt ist die Weglängendifferenz der Partialwellen



**Abbildung B.1:** Verlauf der Wellenfront bei der Beugung am Einzelspalt und Berechnung der Phasenverschiebungen der Partialwellen. Im unteren Teil ist die Anordnung für einen Schirm bzw. eine Lichtquelle im Unendlichen dargestellt, im oberen Teil, für einen endlichen Abstand  $l$ . Der Winkel der einfallenden Welle ist  $\alpha$ , der der ausfallenden  $\beta$ . Der Koordinatenursprung liegt in der Mitte des Spaltes.

gegeben durch:

$$\begin{aligned} \delta_l(\beta, x) &= x \cdot \sin \left[ \arctan \left( \frac{x}{l} + \tan \beta \right) \right] \\ &= \frac{x \cdot (x + l \cdot \tan \beta)}{\sqrt{l^2 + (x + l \cdot \tan \beta)^2}} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Für  $l \rightarrow \infty$  erhält man die bekannte Lösung für einen unendlich entfernten Schirm:

$$\delta_\infty(\alpha, x) = \lim_{l \rightarrow \infty} \delta_l(\alpha, x) = x \cdot \sin \alpha \quad (\text{B.13})$$

Die gesammte Weglängendifferenz  $\Delta_l$  für einfallende und ausfallende Welle ist im Fall von  $\alpha \neq 0 \wedge \beta \neq 0$  durch die Summe der einzelnen Wegdifferenzen gegeben:

$$\Delta_l(\alpha, \beta, x) = \delta_l(-\alpha, x) + \delta_l(\beta, x) \quad (\text{B.14})$$

Das negative Vorzeichen ist nötig um die verschiedenen Koordinatensysteme der beiden Winkel in ein gemeinsames zu transformieren.

Die komplexe Amplitude  $E_p$  der Partialwellen hängt von der Wegdifferenz  $\Delta_l$  ab:

$$E_p(\alpha, \beta, l, x) = e^{i\Delta_l(\alpha, \beta, x)} = e^{i\delta_l(-\alpha, x)} \cdot e^{i\delta_l(\beta, x)} \quad (\text{B.15})$$

Mit  $i = \sqrt{-1}$ . Die Feldamplitude  $E(\alpha, \beta)$  auf dem Schirm ist dann durch das Integral aller Partialwellen über die Blendenbreite gegeben:

$$E(\alpha, \beta, l) = \int_{-D/2}^{D/2} E_p(\alpha, \beta, l, x) \, dx \quad (\text{B.16})$$

Für  $l \rightarrow \infty$  besitzt dieses Integral eine geschlossene Lösung:

$$\begin{aligned} E(\alpha, \beta) &= \int_{-D/2}^{D/2} e^{i\omega\delta_\infty(-\alpha, x)} \cdot e^{i\omega\delta_\infty(\beta, x)} \, dx \\ &= \int_{-D/2}^{D/2} e^{i\omega x(\sin\beta - \sin\alpha)} \, dx \\ &= 2 \cdot \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \cdot D \cdot \omega \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)\right)}{D \cdot \omega \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)} \end{aligned} \quad (\text{B.17})$$

Die Wellenlänge  $\lambda$  des monochromatischen kohärenten Lichtes fließt über  $\omega = \frac{2\pi}{\lambda}$  ein. Damit lautet die Lösung:

$$E(\alpha, \beta) = \lambda \cdot \frac{\sin\left(\frac{D\pi}{\lambda} \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)\right)}{D\pi \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)} \quad (\text{B.18})$$

Für  $\alpha = 0$  ist dies offensichtlich identisch mit (B.11):

$$A(\beta) \equiv E(0, \beta) \quad (\text{B.19})$$

Von Interesse sind auch die Positionen der Intensitätsmaxima des Beugungsbildes. Dazu benötigt man die Maxima der  $\text{sinc}(x) = \sin x/x$  Funktion:

$$x_{max} = \{x \mid x = \tan x\} \quad (\text{B.20})$$

Die Maxima von (B.18) sind also durch den Ausdruck

$$\frac{D\pi}{\lambda} \cdot (\sin\alpha - \sin\beta) = \tan\left(\frac{D\pi}{\lambda} \cdot (\sin\alpha - \sin\beta)\right) \quad (\text{B.21})$$

definiert.

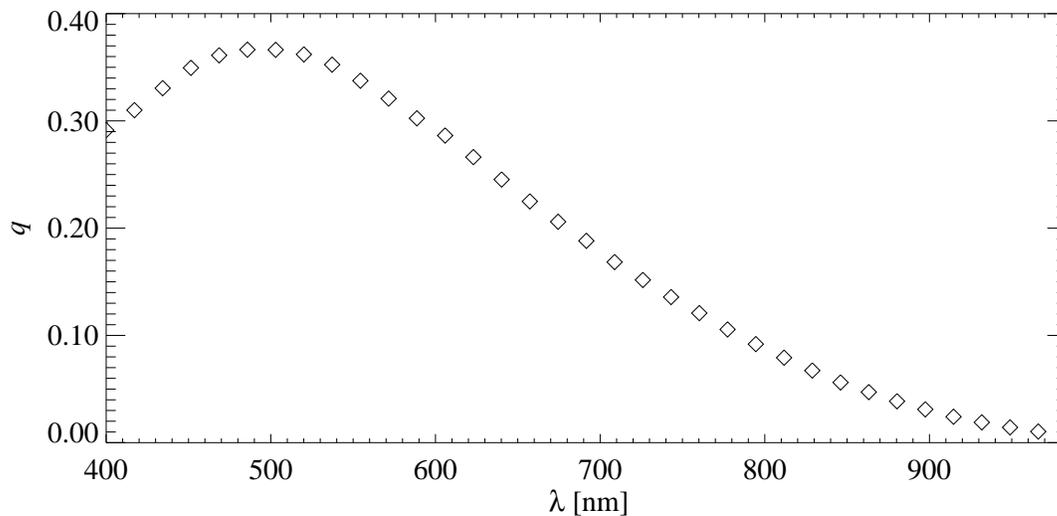
# Anhang C

## Technische Daten

Diese Kapitel enthält einige Technische Daten, die zwar nicht zum Verständnis beitragen, aber zur besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse hier aufgeführt sind.

### C.1 Der Kodak KAI1010M CCD-Sensors

Der KAI1010M ist ein *Interline-Transfer-CCD-Sensor*. Die wesentlichen Daten des Sensors wurden dem Datenblatt ([Eastman Kodak Company 1999](#)) entnommen. Abbildung C.1 zeigt den Verlauf der Quanteneffizienz des Sensors im sichtbaren Spektralbereich. Die maximale Quantenausbeute beträgt 37%.



**Abbildung C.1:** Die relative Empfindlichkeit  $q$  des Kodak KAI1010M CCD-Sensors im sichtbaren Spektralbereich. Die Maximale Quantenausbeute beträgt 37%.



# Literatur

- ABDEL-AZIZ, Y. UND H. M. KARARA (1971). Direct linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close range photogrammetry. In *ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry*. 34, 99
- ABRAHAM, S. UND W. FÖRSTNER (1997). Zur automatischen modellwahl bei der kalibrierung von CCD-kameras. In E. Paulus und F. M. Wahl (Hrsg.) *Mustererkennung 1997, Informatik Aktuell*, Heidelberg, S. 147–155. Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung (DAGM): Springerverlag. 19. DAGM-Symposium Braunschweig. 38, 46
- AHLERS, R.-J. (Hrsg.) (1999, Nov.). *Bildverarbeitung'99: Forschen, Entwickeln, Anwenden*, Ostfildern, Germany. Technische Akademie Esslingen. 110
- BERGMANN, L., C. SCHÄFER UND H. NIEDRIG (1978). *Lehrbuch der Experimentalphysik: Optik* (7. Aufl.), Bd. 3. Berlin: de Gruyter. 12
- BREUCKMANN, B. (1993). *Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis*. Franzis-Verlag GmbH, München. 38
- BREUCKMANN, B., E. KLAAS UND F. HALBAUER (1996). Präzisions-Kalibrierung von topometrischen 3D-Sensoren. In W. Waidelich, H. Hügel, H. Opower, H. Tiziani, R. Walenstein und W. Zinth (Hrsg.) *LASER in Forschung und Technik: Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95*, S. 551–556. Springer Berlin, Heidelberg. 43
- BROCKHAUS, F. A. (1990). *DTV Lexikon: Fli-GeV*, Bd. 6. F.A. Brockhaus, Mannheim und Deutscher Taschenbuchverlag München. 5
- CAESAR, T. UND M. MICHAELIS (1997). Verfahren zur Erkennung textcodierter Messmarken. *Zeitschrift f. Photogrammetrie und Fernerkundung (ZPF)* 5–6, 150–157. 35
- CARRÉ, P. (1966). Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du bureau international des poids et mesures. *Metrologica* 2(1), 13–23. 3, 63, 68, 69
- CREATH, K. (1986). Comparison of phase-measurement algorithms. *Surface characterization and testing 680*, 19–28. 67, 69
- Eastman Kodak Company (1999, Okt.). *KAI-1010 Series Megapixel Interline CCD Image Sensor - Performance Specification* (7. Aufl.). Rochester, New York, USA: Eastman Kodak Company. 14, 16, 18, 78, 105
- GEISSLER, P. UND T. SCHOLZ (1999). Depth-from-Focus for the Measurement of Size Distributions of Small Particles. In *Jähne, Hauß Becker und Geißler (1999a)*, Kap. 29 S. 623–646. 7

- GERTHSEN, C., H. O. KNESER UND H. VOGEL (1989). *Physik* (16. Aufl.). Berlin: Springer. 12
- GRAF, R., M. VON EHR, R. DILLMANN, A. ZILKER UND S. VOGT (1998). Automatische Vermessung großer Objekte mittels eines mobilen Roboters. In H. Wörn und R. Dillmann (Hrsg.) *14. Fachgespräche Autonome Mobile Systeme (AMS), Karlsruhe (30. Nov.–1. Dez. 1998)*, Berlin Heidelberg New York, S. 261–270. Gesellschaft für Informatik: Springer. 92
- GRAY, F. (1953, 17. März). Pulse Code Communications. US-Patent 2,632,058. 52
- HÄUSLER, G. (1999). Three-Dimensional Sensors - Potentials and Limitations. In [Jähne, Haußecker und Geißler \(1999b\)](#), Kap. 19 S. 485–506. 11
- HEALEY, G. E. UND R. KONDEPUDY (1994, März). Radiometric CCD camera calibration and noise estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16(3), 267–276. 23, 24, 27, 100
- HIBINO, K., B. OREB, D. FARRANT UND K. LARKIN (1996). Phase shifting algorithms for nonsinusoidal signals compensating nonlinear phase-shift errors and their susceptibility to random noise. *Optics for Science and New Technology* 2778, 235–236. 67
- HIBINO, K., B. F. OREB, D. I. FARRANT UND K. G. LARKIN (1995, Apr.). Phase shifting for nonsinusoidal waveforms with phase-shift errors. *Journal of the Optical Society of America* 12(4), 761–768. 67
- HORN, E. UND N. KIRYATI (1997, Mai). Toward optimal structured light patterns. In [Werner \(1997\)](#), S. 28–35. 51
- JÄHNE, B., H. HAUSSECKER UND P. GEISSLER (Hrsg.) (1999b). *Handbook of Computer Vision and Applications - Sensors and Imaging*, Bd. 1. San Diego: Academic Press. 108, 109, 110
- JÄHNE, B., H. HAUSSECKER UND P. GEISSLER (Hrsg.) (1999c). *Handbook of Computer Vision and Applications - Signal Processing and Pattern Recognition*, Bd. 2. San Diego: Academic Press. 108
- JÄHNE, B., H. HAUSSECKER UND P. GEISSLER (Hrsg.) (1999a). *Handbook of Computer Vision and Applications - Systems and Applications*, Bd. 3. San Diego: Academic Press. 107, 109
- JIANG, X. UND H. BUNKE (1997). *Dreidimensionales Computersehen: Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern*. Berlin: Springer. 3
- KLEIN, R. (1993). *Ein laseroptisches Entfernungsmeßverfahren mit frequenzvariabler Pseudo-Noise-Modulation*. Dissertation, Universität-GH Siegen. 4
- KLETTE, R., R. KOZERA UND K. SCHLÜNS (1999). Reflectance-Based Shape Recovery. In [Jähne, Haußecker und Geißler \(1999c\)](#), Kap. 19 S. 531–590. 7
- KRAUS, K. (1996). *Photogrammetrie - Verfeinerte Methoden und Anwendungen* (3. Aufl.), Bd. 2. Bonn: Dümmler Verlag. 34
- KUJAWIŃSKA, M. UND W. OSTEN (Hrsg.) (1999, Juni). *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*. Europto Conference: SPIE. 109

- LATECKI, L. J., D. M. MOUNT UND A. Y. WU (Hrsg.) (2000, Aug.). *SPIE Proceedings Vision Geometry IX*, Bd. 4117, Bellingham, Washington, USA. SPIE. 110
- LUHMANN, T. (2000). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag. 4, 7, 9, 10, 34, 36, 41, 99
- MALZ, R. W. (1992). *Codierte Lichtstrukturen für 3-D-Meßtechnik und Inspektion*. Dissertation, Universität Stuttgart, Institut für Technische Optik. 51, 52
- MALZ, R. W. (1995). High Dynamic Codes, Self Calibration and Autonomous 3-D-Sensor Orientation; Three Steps towards Fast Optical Reverse Engineering without Mechanical CMMs. In A. Grün und H. Kahmen (Hrsg.) *Optical 3-D measurement techniques III : papers presented to the conference organized at Vienna*. Institute of National Surveying and Engineering Geodesy, Dept. of Engin. Geodesy, University of Technology, Vienna: Wichmann, Heidelberg. 41
- MICHAELIS, M. (2000, Apr.). Automatic identification of textcoded measurement targets. *Photogrammetric Record* 16(95), 823–830. 35
- NAUMANN, H. UND G. SCHRÖDER (1987). *Bauelemente der Optik* (5. Aufl.). München, Wien: Hanser. 17
- NOTNI, G., W. SCHREIBER, M. HEINZE UND G. NOTNI (1999, Juni). Flexible autocalibrating full-body 3-D measurement system using digital light projection. In [Kujawińska und Osten \(1999\)](#), S. 79–88. 65
- PAUL, H. (Hrsg.) (1999). *Lexikon der Optik - M bis Z*, Bd. 2. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 18
- PFUNDT, G. UND T. SCHEUERMANN (1996, Juli). Ein einfache Methode zur mikroskopischen Gestaltvermessung und tiefenscharfen Abbildung. *Spektrum der Wissenschaft* (7), 12–13. 7
- PRESS, W. H., S. A. TEUKOLSKY, W. T. VETTERLING UND B. P. FLANNERY (1992). *Numerical Recipes in C*. New York: University of Cambridge. 73
- SCHEUERMANN, T. (1997). *Berührungslose Gestaltvermessung von Mikrostrukturen durch Fokussuche*. Dissertation, Universität Stuttgart, Pfintzal. 7
- SCHEUERMANN, T., G. WIORA UND M. GRAF (1999). Topographical maps of microstructures generated by depth-from-focus techniques. In [Jähne, Haußecker und Geißler \(1999a\)](#), Kap. 18 S. 381–410. 7
- SCHMIT, J. UND K. CREATH (1995, Juli). Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry. *Applied Optics* 34(19), 3610–3619. 67, 68, 69
- Schott Glas, Bereich Faseroptik (1999, Sep.). *Konstruieren mit faseroptischen Bauteilen*. Schott Glas, Bereich Faseroptik. <http://www.schott.de/faseroptik>. 14
- SCHWARTE, R., H. G. HEINOL, B. BUXBAUM, T. RINGBECK, Z. XU UND K. HARTMANN (1999). Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques. In [Jähne, Haußecker und Geißler \(1999b\)](#), Kap. 18 S. 463–484. 3, 5, 7

- SCHWARTE, R., H. G. HEINOL, Z. XU, J. LI UND B. BUXBAUM (1997, Apr.). Pseudo/Noise (PN)-Laser Radar without Scanner for Extremely Fast 3D-Imaging and -Navigation. In *Mikrowellen und Optronik: Sindelfingen; Kongressunterlagen, 9. Kongreßmesse für Hochfrequenztechnik, Funkkommunikation und Elektromagnetische Verträglichkeit*, Hagenburg, S. 168–176. Network GmbH. 4
- SCHWIDER, J., R. BUROW, K.-E. ELSSNER, J. GRZANNA, R. SPOLACZYK UND K. MERKEL (1983, Nov.). Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources. *Applied Optics* 22(21), 3421–3432. 69
- SCHWIDER, J., O. FALKENSTOERFER, H. SCHREIBER, A. ZOELLER UND N. STREIBL (1993, Aug.). New compensating four-phase algorithm for phase-shift interferometry. *Optical Engineering* 32(8), 1883–1885. 69
- SEITZ, P. (1999). Solid-State Image Sensing. In [Jähne, Haußecker und Geißler \(1999b\)](#), Kap. 7 S. 165–222. 24
- STRUTZ, T. (1993). *Ein genaues aktives optisches Triangulationsverfahren zur Oberflächenvermessung*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. 42
- SURREL, Y. (1993, Juli). Phase stepping: a new self-calibrating algorithm. *Applied Optics* 32(19), 3598–3600. 67
- SURREL, Y. (1996, Jan.). Design of algorithms for phase measurement by the use of phase stepping. *Applied Optics* 35(1), 51–60. 3, 67
- SURREL, Y. (1998, Juni). Design of algorithms for phase measurement. In P. K. Rastogi und F. Gyimesi (Hrsg.) *International Conference on Applied Optical Metrology*, P.O. Box 10, Bellingham, Washington, 98227-0010, USA, S. 67–72. SPIE–The International Society for Optical Engineering. 67
- VALKENBURG, R. J. UND A. M. MCIVOR (1998). Accurate 3-D measurement using a structured light system. *Image and Vision Computing* 16(2), 99–110. 41
- VOGT, S. (2000). *Reduktion optischer 3D-Messdaten mittels Multi-Resolution*. Dissertation, Universität Karlsruhe. 55
- VON EHR, M., R. DILLMANN UND S. VOGT (1999). Planung von Messpositionen zur automatischen und autonomen Oberflächenvermessung. In G. Schmidt (Hrsg.) *15. Fachgespräche Autonome Mobile Systeme (AMS99), München (1. Dezember 1999)*, Berlin Heidelberg New York, S. 262–271. Gesellschaft für Informatik: Springer. angenommener Beitrag. 92
- WERNER, B. (Hrsg.) (1997, Mai). *Proc. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, Los Alamitos, California, USA. IEEE Computer Society Press. 108
- WIORA, G. (2000, Aug.). High Resolution Measurement of Phase-Shift Amplitude and numeric Object Phase Calculation. In [Latecki, Mount und Wu \(2000\)](#), S. 289–299. 42, 70
- WIORA, G., U. LAUKENMANN UND R. MALZ (1999, Nov.). Robustes erweitertes Kalibrier- und Messverfahren für Streifenprojektionssysteme mit metrischem Projektor. In [Ahlers \(1999\)](#), S. 215–230. 70

- WYANT, J. C. UND K. N. PRETTYJOHNS (27. Jan. 1987). Optical profiler using improved phase shifting interferometry. U.S. patent 4,639,139. 69
- ZHANG, H., M. J. LALOR UND D. R. BURTON (1999, Sep.). Robust, accurate seven-sample phase-shifting algorithm insensitive to nonlinear phase-shift error and second-harmonic. *Optical Engineering* 38(9), 1524–1533. 67



# Lebenslauf

<b>Persönliche Daten</b>	Name	Georg Wiora geb. Pfundt
	Geburtsdatum	29. November 1967
	Geburtsort	Heidelberg
	Adresse	Rötestr. 49, 70197 Stuttgart
<b>Schulbildung</b>	1974 – 1978	Grundschule Meckesheim
	1978 – 1988	Bunsen-Gymnasium Heidelberg
		Abschluss mit Abitur
<b>Zivildienst</b>	Jul. 1988 – Feb. 1990	Reha-Klinik Kohlhof Königstuhl, Heidelberg
<b>Studium</b>	Apr. 1990 – Mär. 1997	Studium der Physik Universität Fridericiana, Karlsruhe Vordiplom 1992
	Nov. 1994 – Jul. 1996	Diplomarbeit am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT): „Optische Mikrostrukturvermessung“
	Mär. 1997	Abschluss mit Diplom
<b>Beruf</b>	Jul. 1992 – Sep. 1993	Universität Karlsruhe: Arbeit in der Spielzeug-Sammlung von Prof. Bürger
	Nov. 1993 – Okt. 1994	Universität Karlsruhe: Programmiertätigkeit am Insitut für experimentelle Kernphysik
	Aug. 1996 – Feb. 1997	Projektarbeit am FhG ICT: „Kommerzialisierung eines optischen Messsystems“
	Apr. 1997 – Sep. 1999	Doktorand bei der DaimlerChrysler AG Forschungszentrum Ulm Betreuung: Prof. Dr. Bernd Jähne IWR, Universität Heidelberg
	seit Okt. 1999	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der DaimlerChrysler AG

