# DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

**Reihe C** 

Dissertationen

Heft Nr. 521

**Oliver Friede** 

Ein hybrides Meßsystem zur Kalibrierung von Strichteilungen

München 2000

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

# DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

#### Dissertationen

Heft Nr. 521

# Ein hybrides Meßsystem zur Kalibrierung von Strichteilungen

# Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation

## vorgelegt von

Dipl.-Ing. Oliver Friede

# München 2000

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Marstallplatz 8 • D - 80539 München

Telefon (089) 23 031 113 • Telefax (089) 23 031 - 283/- 100 E-mail hornik@dgfi.badw.de • http://www.dgfi.badw.de/dgfi/DGK/dgk.html

Prüfungskommission: Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reiner Rummel Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer

Die Dissertation wurde am 29.11.1999 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen am 21.02.2000 angenommen

© 2000 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet, die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

# Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt ein neuartiges System zur Kalibrierung von Strichteilungen mit beliebiger Codierung und Längenausdehnung vor. Hierbei wird ein Laserinterferometer mit einer CCD-Flächen-Kamera zu einem hybriden Meßsystem kombiniert, dessen Meßgenauigkeit besser als  $\pm 5 \ \mu m$  ist. Laserstrahl und Längsachse der Strichteilung sind für diesen Zweck kolinear angeordnet. Die Kamera ist senkrecht dazu auf die Teilung ausgerichtet, von der sie einen ca.  $1 \, cm^2$  großen Ausschnitt erfaßt. Weil der Abstand der beiden Kanten eines Strichs bei Bar-Codes größer als der Bildausschnitt sein kann, werden sie einzeln nacheinander beobachtet. Aus beiden Aufnahmen läßt sich dann die definitionsgemäß bei einer Kalibrierung verwendete Strichmitte ableiten. Eine Messung ist sowohl unter statischen als auch unter dynamischen Bedingungen möglich. Der Unterschied besteht darin, daß die Teilung während der gleichzeitigen Abfrage beider Meßmittel ruht, bzw. in Längsrichtung verschoben wird. Für die statische Messung werden die Strichkanten mit Hilfe ihrer bekannten Sollpositionen näherungsweise angefahren, wodurch sich die Anzahl der Beobachtungen automatisch auf das Minimum beschränkt. Die dynamische Messung läuft zwar schneller ab, stellt jedoch wegen der kontinuierlichen Abfrage beider Meßmittel höhere technische Anforderungen. Um die Datenmenge in diesem Fall gering zu halten, erfolgt eine Abspeicherung nur für solche Bilder der Kamera, in denen eine Kante sichtbar ist. Dazu wird jedes Bild unmittelbar nach der Aufnahme in einem kleinen Bereich mit einem einfachen aber ungenauen Verfahren auf Kanten hin untersucht. Die exakte Bestimmung des Abstands einer Kante zum Ursprung des Bildkoordinatensystems geschieht erst im Anschluß an die Messung über ihre gesamte Breite im radiometrisch korrigierten Bild. Mit Hilfe eines zuvor bestimmten Maßstabsfaktors läßt sich der Abstand in das metrische System des Lasers transformieren. Dieser liefert nach der meteorologischen Korrektur seiner Meßwerte die Lageänderung der Teilung bezüglich einer beliebig gewählten Anfangsposition und stellt damit den geometrischen Zusammenhang zwischen den einzelnen Bildern her.

Zur Abschätzung der Meßgenauigkeit des Systems, werden nach der Beschreibung der physikalischen Prinzipien beider Meßmittel und deren technischer Realisierung, die auftretenden Fehler systematisch erläutert. Für die Kamera sind praktische Untersuchungsergebnisse bezüglich Objektivverzeichnung, Systemrauschen, Sensorempfindlichkeit und Überstrahlung dargestellt. Um die Kanten aus dem Bild zuverlässig und mit Sub-Pixelgenauigkeit zu extrahieren, werden verschiedene pixelgenaue Kantenalgorithmen detailiert erläutert und auf ihre Leistungsfähigkeit hin verglichen. Dazu gehören Difference-of-Boxes, Laplacian-of-Gaussian, Difference-of-Gaussians sowie die SHEN-, CANNY-, DERICHE-Filtergruppe. Diese Algorithmen ermöglichen bei der vorgestellten Auswertestrategie im zweidimensionalen Bild bereits eine sub-pixelgenaue Messung. Spezielle Sub-Pixelalgorithmen werden nur zusammenfassend erwähnt, da sie lediglich das Rauschen vermindern, was exemplarisch am "Steger-Filter" gezeigt wird. Abschließend werden Ergebnisse vom praktischen Einsatz des Meßsystems bei der Kalibrierung von Invarband-Nivellierlatten präsentiert.

# Summary

This thesis presents a new system for the calibration of scales of random code and length. For this purpose, a laser interferometer and a CCD-array camera are combined to form a hybrid measuring system with an accuracy better than  $\pm 5 \,\mu m$ . Laserbeam and longitudinal axis of the scale are arranged colinearly. The camera is positioned perpendicular to this axis and observes a  $1 \, cm^2$  large window of the scale. As the distance between the two edges of a line of a bar code scale may be wider than the size of the window, they are observed seperately one after the other. The center of a line, used by definition for the calibration, can be derived from the two images. Measurement is possible under both static and dynamic conditions. The difference is that, as both gauges are read out simultaneously, the scale stands still or moves in longitudinal direction. For static measurements, the edge positions are approximately adjusted by means of their nominal value, which automatically reduces the number of observations to a minimum. Of course, dynamic measurement is faster, but the technical demands are higher due to the steady read out of both gauges. In order to reduce the amount of data, only those images with at least one visible edge of the bar code are stored. Therefore, after grabbing, each image is immediately scanned for edges by a simple but imprecise method. The precise determination of the distance between the edge and the origin of the image coordinate system is done off-line after the measurement, using their entire width in the radiometrically corrected image. The distance between the edge and the origin of the coordinate system is transformed by a previously determined scale factor into the metric system of the laser. After meteorological correction, the laser value determines the shift relative to the arbitrarily chosen start position yielding the geometric relation between the images.

After describing the physical principles and their technical realisation, the errors of both sensors are presented in a systematic manner to give an estimate of the accuracy of the system. Especially for the camera, practical research results concerning lens distortion, system noise, sensor sensitivity, and lighting effects are presented. To extract the edges in an image reliably and with sub-pixel accuracy, different algorithms for edge detection are explained in detail and compared with regard to their performance. This includes the Difference-of-Boxes, Laplacian-of-Gaussian, Difference-of-Gaussians and the SHEN, CANNY, DERICHE filter group. With these algorithms, sub-pixel accuracy can already be achieved by the proposed evaluation strategy in the twodimensional image. Special sub-pixel precise algorithms are only summarized because they merely reduce noise as demonstrated by the "STEGER-Filter". Finally, the results of the practical application of the measurement system with respect to the calibration of Invar-Barcode staffs are presented.

# Inhaltsverzeichnis

Eint	inführung				
1.1	Aufga	benstellung	7		
1.2	1.2 Bisherige Arbeiten				
1.3	.3 Überblick über den Vertikalkomparator				
Lase	aserinterferometer				
2.1	1 Technische Grundlagen				
	2.1.1	Strahlung, Kohärenz und Interferenz	11		
	2.1.2	$Helium-Neon-(HeNe-)Gaslaser \qquad \ldots \qquad $	12		
	2.1.3	Laser-Doppler-Interferometer	12		
2.2	Fehler	einflüsse	14		
	2.2.1	Abweichung von der Neonlinie	14		
	2.2.2	Frequenzinstabilität	14		
	2.2.3	Auflösungsungenauigkeit	15		
	2.2.4	Refraktion	15		
	2.2.5	Totweg	16		
	2.2.6	Cosinus-Fehler	17		
	2.2.7	ABBÉscher Fehler	17		
	2.2.8	Strahlwegfehler des Meßprismas	18		
	2.2.9	Zusammenfassung der Fehlereinflüsse	19		
Kamera					
3.1	1 Technische Grundlagen				
	3.1.1	Lichtempfindliche Halbleiter	20		
	3.1.2	Ladungstransport	22		
	3.1.3	CCD-Architekturen für Flächensensoren	22		
	3.1.4	Auslesen der Ladung	23		
3.2 Fehlereinflüsse		einflüsse	24		
	3.2.1	Geometrie	24		
	3.2.2	Lineare Systemtheorie	29		
	3.2.3	Radiometrie	31		
	3.2.4	Überstrahlungseffekte	32		
	3.2.5	Rauschen	33		
	3.2.6	Zusammenfassung der Fehlereinflüsse	35		
	Ein 1.1 1.2 1.3 Las 2.1 2.2 Kar 3.1 3.2	Einfibre for the set of the se	<b>EinFührung</b> 11       Aufgabenstellung         12       Bisherige Arbeiten         13       Überblick über den Vertikalkomparator         Laserinterformeter		

4	Kaı	Kantenextraktion				
	4.1	Grundlagen				
4.2 Operatoren		Operatoren				
		4.2.1 Difference-of-Boxes				
		4.2.2 CANNY-, SHEN- und DERICHE-Operator				
		4.2.3 Laplacian-of-Gaussian				
		4.2.4 Zusammenstellung der Operatoren				
	4.3	Sub-Pixel-Genauigkeit				
<b>5</b>	Unt	tersuchungen zur Kantenextraktion				
	5.1	Systemrauschen				
5.2       Geometrische Verzeichnung         5.3       Radiometrie		Geometrische Verzeichnung				
		Radiometrie				
		5.3.1 Sensorempfindlichkeit				
		5.3.2 Radiometrische Korrektur				
5.4 Überstrahlungseffekte		Überstrahlungseffekte				
	5.5	Kantenschrittfehler				
		5.5.1 Pixelgenaue Kantenoperatoren				
		5.5.2 Subpixelgenaue Kantenoperatoren				
		5.5.3 Überstrahlungseffekte beim Kantenschrittfehler				
6	Pra	aktische Anwendung				
	6.1	Meßablauf				
	6.2	Kalibrierungsergebnisse				
Li	tera	turverzeichnis				

# 1. Einführung

# 1.1 Aufgabenstellung

Im Vermessungswesen bestimmt die bei der Ermittlung geometrischer Größen geforderte Genauigkeit direkt die Güte der verwendeten Meßmittel. Sie leitet sich aus dem Zusammenhang zwischen beobachteten Istund theoretischen Sollwerten ab, der durch eine Kalibrierung ermittelt und mit zulässigen Grenzmaßen verglichen wird. Unmittelbar nach der Fertigung des Meßmittels hat dies für den Hersteller die Funktion einer qualitätssichernden und qualitätsverbessernden Maßnahme. Aufgrund von Alterung und Abnutzung sind zur Überprüfung auch danach noch in regelmäßigen Abständen Kalibrierungen durchzuführen.

Höchste Anforderungen werden an die Strichteilungen der bei einer geometrischen Höhenübertragung verwendeten Nivellierlatten vor allem bei der Industrievermessung gestellt. Die Deutsche Industrie Norm (DIN) 81717 schreibt für diesen Fall eine zulässige Abweichung eines beliebigen Meters der Strichteilung von maximal  $\pm 30 \ \mu m$  vor. Dies entspricht einem Maßstabsfaktor von  $1 \pm 0,00003$ . Der tatsächliche Maßstabsfaktor einer Teilung wird bei einer Kalibrierung aus den Differenzen zwischen den gemessenen Abständen der Strichmitten und ihren Sollabständen abgeleitet. Für ein aussagekräftiges Ergebnis muß die Präzision der Kalibrierung nach [SCHLEMMER 1975] besser als  $\pm 5 \ \mu m$  sein. In den vergangenen Jahrzehnten war diese anspruchsvolle Aufgabenstellung bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, die den ständigen Wandel im oberen Bereich der technischen Möglichkeiten und Erfordernisse belegen. Dabei konnte die Messung vor allem durch den Einsatz von sogenannten "elektronischen Mikroskopen" zur Erfassung der Strichmitten in Verbindung mit Laserinterferometern zur Abstandsmessung automatisiert und in ihrer Genauigkeit gesteigert werden.

Mit der Einführung digitaler Meßverfahren für die geometrische Höhenübertragung zu Beginn der 90er Jahre [INGENSAND 1990] entstand die Notwendigkeit neue Meßverfahren zur Kalibrierung der Strichteilungen zu entwickeln. Wiesen die Teilungen bis dahin nämlich Striche mit konstanter Breite in gleichmäßigem Abstand auf, wurden sie nun durch digitale Codes mit Strichen ungleichmäßiger Breite und Position abgelöst. Damit war eine Erfassung aller Striche nicht mehr möglich, weil die verwendeten Mikroskope die Strichmitten nur mit Hilfe der beiden gleichzeitig im Gesichtsfeld auftretenden Strichkanten bis zu einer bestimmten maximalen Breite beobachten konnten.

Um den Maßstabsfaktor der Teilung weiterhin aus allen Strichen ableiten zu können, erwies es sich als notwendig, das Meßkonzept zu ändern. Ziel dieser Arbeit ist daher der Aufbau eines Meßsystems zur Kalibrierung von Strichteilungen bis zu 3 m Länge, deren Striche, unabhängig von ihrer Dicke, alle zur Ableitung des Maßstabsfaktors verwendet werden. Dabei wird eine CCD-Kamera mit Flächensensor eingesetzt, die anstelle der Mitte die beiden Kanten eines Striches erfaßt und prinzipbedingt auch ein Maß zu deren Positionsbestimmung liefert. Die beiden Meßmittel, Kamera und Laser, sind so zu einem hybriden Meßsystem zu vereinen, daß die Präzision der Kalibrierung besser als  $\pm 5 \ \mu m$  ist. Das Meßsystem soll das Stadium eines Prototypen erreichen. Auf automatischen Beobachtungsablauf, besondere Bedienerfreundlichkeit und längerwährende Beobachtungsreihen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Im weiteren wird zunächst ein Überblick über bisherige Arbeiten gegeben, der die Einordnung der Arbeit in den Zusammenhang mit verwandten Arbeiten ermöglicht. Darauf folgt eine Beschreibung des Vertikalkomparators zur Kalibrierung von Nivellierlatten am Geodätischen Institut der TU München. Das zweite und dritte Kapitel befassen sich mit den beiden zur Messung verwendeten Sensoren, dem Laser und der Kamera. Beide Kapitel sind in der Art und Weise aufgebaut, daß zum Verständnis des jeweiligen Funktionsprinzips zunächst die technischen Grundlagen erläutert werden, an die sich eine systematische Darstellung der auftretenden Fehler anschließt. Im vierten Kapitel wird die Verarbeitung der mit der Kamera aufgenommenen Bilder in Form der Kantenextraktion behandelt, wobei nach den allgemeinen Grundlagen verschiedene Lösungen unterschiedlicher Genauigkeit dargestellt werden. Das fünfte Kapitel beinhaltet die Untersuchungen, die mit der im Rahmen der Kalibrierung von Strichteilungen erstmalig verwendeten Kamera mit CCD-Flächensensor und der neuen Auswertestrategie durchgeführt wurden. Die zusammenfassende Darstellung der Vorgehensweise bei einer Kalibrierung mit dem neuen System und die Ergebnisse der Erprobungsmessungen schließen die Arbeit ab.

# 1.2 Bisherige Arbeiten

Bis Ende der 60er Jahre erfolgte die Kalibrierung von Strichteilungen ausschließlich manuell. Dabei wurden zwei Striche im Abstand von einem Meter durch das menschliche Auge mit Hilfe jeweils eines Meßmikroskops erfaßt und mit der physischen Länge eines Normalmeters, z.B. aus Metall verglichen. In [PESCHEL 1938] wurde letzterer direkt auf die Teilung aufgelegt und die Abweichung der beiden Striche gegenüber den Sollmarken des Normalmeters an den dort zusätzlich angebrachten Feinunterteilungen mit Hilfe einer Lupe abgelesen. Eine Meßanordnung bei der sich Prüfling und Normalmeter nicht berühren, ist in [MARZAHN 1957] beschrieben. Dort wurde in einem ersten Schritt die Position der beiden Meßmikroskope durch Verschiebung der Fadenkreuze mit Mikrometerschrauben auf die Länge des Normalmeters abgeglichen. Nach dem Austausch des Normals gegen den Prüfling ergab sich die Abweichung aus der zur erneuten Koinzidenz zwischen Fadenkreuz und Strichmitte notwendigen Verdrehung der Mikrometerschrauben. In [PESCHEL 1963] wurde der Meßablauf dadurch vereinfacht und beschleunigt, daß das zu beobachtende Strichpaar über ein Prismensystem in ein ziges Mikroskop eingespiegelt und durch ein ablesbares Planplattenmikrometer zur Deckung gebracht wurde. In allen Fällen war der Prüfling zur Messung mehrerer Strichpaare seitlich zu verschieben, aus denen als Maßstabsfaktor das sogenannte "durchschnittliche Lattenmeter" folgte. Eine Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Strichpositionen bezogen auf die gesamte Teilung, läßt sich daraus näherungsweise durch das in [SCHLEMMER 1975] beschriebene Verfahren berechnen.

Einen großen Entwicklungssprung in Bezug auf Automatisierung und Genauigkeitssteigerung stellte der in [HOFFROGGE u. LEBOWSKY 1969] vorgestellte Komparator dar. Dort wurden nicht nur erstmals photoelektronische Meßmikroskope zur Stricherfassung, sondern in ersten Ansätzen auch die optische Laserinterferometrie zur Abstandsmessung eingesetzt. Ein mehrfach unterteilter Referenzmaßstab wurde so in einer Flucht mit dem Prüfling auf dem Schlitten angeordnet, daß der jeweils erste Strich im Gesichtsfeld des entsprechend zugeordneten Mikroskops lag. Die elektrischen Signalspannungen sogenannter "Photomultiplier" in den beiden Mikroskopen, dienten in dieser Anfangsstellung jeweils als Referenz für die nachfolgende Messung. Prüfling und Normal wurden anschließend durch einen Motor soweit verschoben, bis die Spannung des nächsten Strichs im Mikroskop des Prüflings wieder den Referenzwert erreichte. Die Spannungsveränderung des entsprechenden Strichs im Mikroskop des Normals gegenüber dem Referenzwert entsprach der gesuchten Abweichung. Zur Angabe im metrischen System wurde vorab eine Kalibrierung der Spannungsstärke gegenüber interferometrischen Strichteilung des Normalmaßstabs direkt angeben.

In [SCHLEMMER 1975] wurde aufgrund des Fortschritts bei der Vergrößerung des Meßbereichs von Laserinterferometern erstmals auf die Verwendung eines physischen Normalmeters und damit auch des entsprechenden Mikroskops verzichtet. Die Aufgabe des mit Photodioden arbeitenden Meßmikroskops bestand darin, die Mitten der Striche des dynamisch verschobenen Prüflings zu detektieren und in diesem Fall einen elektronischen Impuls auszusenden. Daraufhin erfolgte die Abfrage des vom Laserinterferometer gemessenen Verschiebungsbetrags des gesamten Prüflings gegenüber einer zuvor beliebig gewählten Anfangsposition. Zu diesem Zweck war in Verlängerung der Teilung ein Meßprisma angebracht, das zusammen mit dem Prüfling verschoben wurde. Durch ein entsprechend geeichtes Laserinterferometer wurde der Anschluß an die internationale Definition des Meters als Funktion einer Lichtwellenlänge realisiert.

Eine alternative Strategie zur Erfassung der Strichmitten wurde in [HEISTER 1988] dargestellt. Dabei wurde das elektrische Signal des Meßmikroskops während der Verschiebung des Prüflings in diskreten Schritten zusammen mit dem synchron gemessenen Interferometerwert aufgezeichnet. Der einer Strichmitte entsprechende Interferometerwert ergab sich im Anschluß an die Messung analog zur rechnerischen Interpolation der Strichmitte aus dem Intensitätsverlauf des Mikroskopsignals. Damit existierte bereits vor der Markteinführung des ersten Digitalnivelliers mit entsprechender Bar-Code-Nivellierlatte [INGENSAND 1990] die Möglichkeit, Teilungen mit variabler Strichdicke zu messen. Ein anderer Ansatz zur Messung solcher Teilungen wird in [SCHMID 1995] vorgestellt. Er verwendet eine CCD-Kamera mit Zeilensensor, die nicht ausschließlich zur Erfassung, sondern als Zuschlag zum Wert des Laserinterferometers auch zur Abstandsmessung dient (siehe Abbildung 1.1).

Während der Meßfahrt erfolgt parallel zur Bildaufnahme i, j die Messung der von der Teilung in Bezug auf eine beliebig gewählte Anfangsposition zurückgelegten Verschiebung durch das Laserinterferometer  $(s_i, s_j)$ . In jedem Bild wird anschließend die Position  $t_i, t_j$  der abgebildeten Striche in der Mitte zwischen den mathematisch detektierten Kanten gegenüber einem festen Bezugspunkt ermittelt. Bei bekanntem Abbildungsmaßstab m berechnet sich der Abstand zweier Kanten dann nach

$$d = (s_j + mt_j) - (s_i + mt_i).$$
(1.1)



Abb. 1.1: Prinzip der CCD gestützten Kalibrierung nach [SCHMID 1995]

Aus dem Vergleich mit dem Sollwert ergibt sich die relative Verbesserung des Strichs in der Aufnahme j.

Die Verfahren nach [HEISTER 1988] und [SCHMID 1995] haben den Nachteil, daß sie die Kanten nur in einem schmalen Bereich detektieren und daher sehr empfindlich gegen Streulicht sind. Dies läßt sich durch Verwendung einer CCD-Kamera mit Flächen-Sensor nach [TAKALO 1997] vermeiden, die einen breiteren Abschnitt des Strichs verwendet. Allerdings liegen auch dort noch folgende drei Probleme vor:

- es werden nur solche Striche beobachtet, die mit ihrer gesamten Breite im Bild liegen;
- wegen der anfallenden großen Datenmenge bzw. geringen Verarbeitungsgeschwindigkeit wird nur eine statische Messung durchgeführt;
- die Kanten werden nur in einigen diskreten Bereichen ausgewertet.

Diese drei Probleme werden in der vorliegenden Arbeit auf solche Art und Weise beseitigt, daß der Ubergang vom Meßmikroskop zur CCD-Kamera als vollständig vollzogen angesehen werden kann.

# 1.3 Überblick über den Vertikalkomparator

Das Geodätische Institut der TU München besitzt zur Kalibrierung von Nivellierlatten in Gebrauchsstellung einen ca. 7 m hohen Vertikalkomparator, der sich im Schacht eines stillgelegten kleinen Lastenaufzuges befindet. Der Aufbau der Anlage besteht aus den drei Komponenten Träger-, Laser- und Kamerasystem, die in Abbildung 1.2 in Seitenansicht dargestellt sind. Das Trägersystem hat die Aufgabe, dafür zu sorgen, daß während der Messung für jeden Strich einer Teilung gleiche geometrische Beobachtungsverhältnisse für die beiden Meßmittel Laser und Kamera gelten.

Die zu prüfende Teilung 1) wird in einem U-förmigen Profil 7) auf einen Adapter mit Kugelkopf zur Bestimmung des Lattennullpunktfehlers (3) gestellt und seitlich fixiert. Das Profil ist auf zwei Schlitten (4) gelagert, die mittels geschlitzter Kugellagerbüchsen (5) auf zwei parallel ausgerichteten Wellen (3) laufen und in regelmäßigen Abständen durch Wellenunterstützungen (2) an die Schachtwand montiert sind. Zwischen beiden Schlitten befindet sich eine Trapezspindel (2), die über eine Gewindemutter (5) mit dem oberen Schlitten verbunden ist. Am Kopfende der Spindel befindet sich der Motor (1), der die Spindel um die Längsachse dreht und damit den oberen Schlitten bewegt. Der untere Schlitten wird über das U-Profil passiv nachgeführt.

Die Verschiebung des Profils bzw. der Teilung während einer Meßfahrt wird mit einem Lasersystem der Firma HEWLETT-PACKARD nach dem Prinzip der Doppler-Interferometrie gemessen. Das System umfaßt die Komponenten Laserkopf, Transducer, Interferometer, Umlenk-, Referenz- und Meßprisma. Der Laserkopf () erzeugt einen Laserstrahl, der nach der Umlenkung durch die Prismen () von dem am unteren Ende des U-Profils, in Verlängerung der Teilung befestigten Meßprisma () reflektiert wird. Dieser Laserstrahl wird im Interferometer (2) am Boden des Schachtes mit dem vom Referenzprisma () reflektierten Strahl überlagert. Das Referenzprisma ist auf der Unterseite des Meßtisches () in Höhe der Schachtmitte befestigt.

Durch die Prismenanordnung wird eine – allerdings höchst unwahrscheinliche – Hebung oder Senkung des Meßtisches verursachte Längenänderungen der beiden Meßmittel kompensiert. Die logische Steuereinheit des Laserkopfs befindet sich im externen Transducer (3), der auch die aufgrund der Doppler-Interferenzmessung erzeugten Signale digitalisiert. Von dort erfolgt zunächst die Übertragung der Werte in das Schnittstellenmodul IFC (PAUL ELEKTRONIK) (3), in dem sie mit den während der Meßfahrt über elektronische Sensoren abgefragten meteorologischen Werten zu einem Datensatz verknüpft werden. Die Sensoren erfassen kontinuierlich die Temperatur T, die relative Luftfeuchtigkeit H (beide SIKA) und den Luftdruck P (THOMMEN). Die



Abb. 1.2: Vertikalkomparator

Temperaturmessung erfolgt an mehreren verschiedenen Stellen des Schachtes. Um den Einfluß der Meteorologie so konstant wie möglich zu halten, sind der Schacht und das angrenzende Meßlabor vollklimatisiert. Neben der Zwischenspeicherung der Meßwerte steuert und regelt das IFC den gesamten motorischen Ablauf der Messung. Nach der Meßfahrt wird der Datensatz an eine HP375 WORKSTATION (s) übertragen, mit deren Hilfe die Strecken meteorologisch korrigiert werden.

Zur Messung der Teilungsstriche wird auf dem Meßtisch eine CCD-Flächenkamera (DALSA) mit einem Makro-Objektiv (RODENSTOCK) und einer Lichtfaser-Ring-Beleuchtung (CLASSEN) (2) näherungsweise senkrecht zum U-Profil montiert. Der Sensor der Kamera hat eine Größe von  $1024 \times 1024$  Sensorelementen und arbeitet nach dem Frame-Transfer-Verfahren. Mit einer maximalen Bildrate von 40 Bildern pro Sekunde werden die Bilder zur weiteren Verarbeitung in digitaler Form auf eine PCI-Steckkarte (IMAGING) im PC (3) übertragen. Dieser ist ausgestattet mit einem INTEL PENTIUM II 400 Prozessor, 64MB-RAM und einer Festplatte mit 9*GB* Speicherkapazität bei einer mittleren Schreibrate von ca. 6MB/s. Die Auswertung der Bilder geschieht mit Unterstützung des Programmsystems HALCON der Firma MVTEC SOFTWARE unter WINDOWS NT 4.0. Zur Berechnung der einzelnen Strichpositionsfehler werden die korrigierten Laserwerte anschließend von der Workstation auf den PC übertragen.

# 2. Laserinterferometer

Die Kalibrierung einer mehrere Meter langen Strichteilung mit einer Meßgenauigkeit von wenigen Mikrometern wird erst durch Verwendung eines Laserinterferometersystems möglich. Im Rahmen eines hybriden Meßsystems stellt die damit gemessene Verschiebung der Teilung eine Verknüpfung zwischen den einzelnen Bildern der Strichkanten her, die während einer Meßfahrt von der Kamera aufgenommen werden. Um die Genauigkeit der Streckenmessung bewerten zu können, ist ein Verständnis des Meßprinzips unerläßlich. Daher wird in Abschnitt 2.1, ausgehend von einer Darstellung der allgemeinen Phänomene wie Strahlung, Kohärenz und Interferenz, deren Ausnutzung bei einem Gaslaser und speziell beim verwendeten Doppler-Interferometer beschrieben. In Abschnitt 2.2 folgt darauf aufbauend eine Darstellung der möglichen Fehlerquellen.

# 2.1 Technische Grundlagen

## 2.1.1 Strahlung, Kohärenz und Interferenz

Nach dem BOHRschen Atommodell (siehe [GERTHSEN et al. 1982]) bewegen sich die Elektronen eines Atoms bei Vernachlässigung der HEISENBERGschen Unschärferelation in definierten konzentrischen Kugelschalen um den Kern. Der Energiezustand eines Elektrons hängt vom Abstand der Schale zum Kern ab und setzt sich aus kinetischer und potentieller Energie zusammen. In Festkörpern und Gasen liegen die verschiedenen Zustände aufgrund von Wechselwirkungen des Ionengitters in Form von Energiebändern vor. Durch Energieaufnahme (Absorption) von oder Abgabe (Emission) nach außen, können die Elektronen zwischen den Bändern wechseln. Weil die potentielle Energie mit größer werdendem Abstand stärker wächst, als die kinetische zur Kompensation der Anziehungskraft der Kerne abnimmt, besitzen die Elektronen der äußersten Schalen die größte Gesamtenergie. Sie befinden sich im sogenannten "Valenzband" und gelangen von dort leicht aus dem Anziehungsbereich der Atome in das darüberliegende Leitungsband, in dem sie frei beweglich sind.

Wird in einem abgeschlossenen System einer großen Anzahl von Atomen im Grundzustand Energie von außen zugeführt, kehren sie nach einer gewissen Zeit von selbst, d.h. spontan, wieder in ihren Ausgangszustand zurück. Dabei wird die Energiedifferenz zwischen Anfangs- und Endzustand in Form eines Lichtquants entsprechender Frequenz abgestrahlt. Die Verweildauer im angehobenen Zustand ist normalerweise proportional zur Bandbreite. Eine Ausnahme stellen die Atome dar, die sich nach Aufnahme einer bestimmten Energie in einem als metastabil bezeichneten Zustand befinden. In diesem Fall ist eine Energieabgabe nicht ohne weiteres möglich. Erst wenn auf diese Atome eine Strahlung von außen einwirkt, wird eine zusätzliche Emission hervorgerufen d.h. stimuliert. Die Frequenz der zugeführten Strahlung muß dabei dem Frequenzübergang zwischen mindestens zwei Zustandsstufen des Atoms entsprechen. Ob in einem Molekül häufiger spontane oder stimulierte Emission auftritt hängt davon ab, ob die Anzahl der Atome im Grundzustand oder im angeregten Zustand überwiegt. Generell sind bei Temperaturen unter  $100^{\circ}C$  mehr Atome im Grundzustand vorhanden. Eine Umkehr (Inversion) dieser Verhältnisse kann dadurch erreicht werden, daß die Atome durch Energiezufuhr von außen um mindestens zwei Zustandsstufen angehoben werden.

Die stimulierte Strahlung weist die gleiche Frequenz und Richtung im Raum auf, wie die sie Erzeugende. Von großer praktischer Bedeutung ist weiterhin, daß sie bei anderen angeregten Atomen ebenfalls eine Emission stimulieren kann. Dadurch wird eine Strahlung mit bestimmter Frequenz in einer bestimmten Richtung verstärkt (kohärente Strahlung). Aus dieser Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission leitet sich die Bezeichnung Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ab. Die für die Emission von Strahlung verantwortlichen Atome werden als aktives Medium bezeichnet und die Energiezufuhr als optisches Pumpen. Je nach Medium lassen sich Festkörper-, Halbleiter- und Gaslaser unterscheiden. Beim kohärenten Licht wird zwischen räumlicher und zeitlicher Kohärenz unterschieden. Räumliche Kohärenz bezeichnet die konstante Phasendifferenz von Wellen, die zum gleichen Zeitpunkt von verschiedenen Punkten der Quelle abgestrahlt wurden. In zeitlicher Kohärenz sind die Wellen dann, wenn sie eine konstante Phasendifferenz während einer festen Zeit einhalten. Da die spontane Strahlung, die auch im Falle der Inversion vorhanden ist, nach allen Richtungen im Raum statistisch verteilt erfolgt und somit nur zu einem kleinen Teil in Richtung der einfallenden Strahlung liegt, setzt keine Verstärkung ein. Dieser Teil der Strahlung wird als inkohärent bezeichnet und resultiert in Verlustleistung bzw. Rauschen. Kennzeichen der zeitlichen Kohärenz ist die Kohärenzzeit  $\Delta t_K$ . Diese entspricht näherungsweise der reziproken Bandbreite  $\Delta f$ , um die jede Frequenz entsprechend den Energiebändern des Moleküls schwankt und es unmöglich macht, streng

eine Strahlung einer einzigen Frequenz zu erzeugen. Durch Multiplikation der Kohärenzzeit mit der Lichtgeschwindigkeit läßt sich die sogenannte "Kohärenzlänge" berechnen. Sie gibt den Weg an, über den die Welle mit anderen Wellen oder ein Teil der Welle mit einem Teil der anderen Welle kohärent sein kann.

Die zeitliche Kohärenz wird für die Interferometrie genutzt. Darunter ist die Überlagerung (Interferenz) verschiedener Wellen zu verstehen, die sich dadurch verstärken oder abschwächen. Wenn sich die Frequenzen der beiden Wellen geringfügig unterscheiden, ergibt sich durch die Interferenz eine Welle mittlerer Frequenz, deren Amplitude sich periodisch mit der Hälfte des Frequenzabstandes ändert. Eine so erzeugte Welle besitzt in der Optik bei Verwendung von Wellenlängen im sichtbaren Bereich helle und dunkle Streifenmuster. Bei Verwendung von zwei identischen Frequenzen, resultiert eine Welle gleicher Frequenz und einer Amplitude, die von der Phasendifferenz der Ausgangsfrequenzen abhängt.

Für den praktischen Einsatz bei der relativen Distanzmessung muß die Kohärenzlänge mindestens doppelt so lang sein wie der Abstand zwischen Strahlungsquelle und Zielpunkt. Temperaturstrahler scheiden für diesen Zweck aus, weil sie ein breites Spektrum an Frequenzen abstrahlen und folglich nur eine kurze Kohärenzlänge besitzen. Für weißes Licht beträgt die Kohärenzlänge z.B. nur 2-3  $\mu m$ . Dagegen besitzen Laser eine große Kohärenzlänge, die theoretisch bis zu Hunderten von Kilometern reicht. In der Praxis sind solche Entfernungen wegen der Instabilität der Erdatmosphäre, die die Kohärenz zerstört, nicht erreichbar. Im Maschinenbau wird die Interferometrie heutzutage über Entfernungen bis zu ca. 50 m eingesetzt.

# 2.1.2 Helium-Neon-(HeNe-)Gaslaser

Bei einem kontinuierlich strahlenden Laser dieser Bauart wird die Strahlung in einem abgedichteten Glasrohr erzeugt, das mit einem Gemisch von Helium- und Neon-Gas gefüllt ist (siehe [BoLšakov et al. 1985, TRADOWSKY 1986]). Die Anregung, d.h. das optische Pumpen des Gasgemischs, erfolgt entweder durch Gleichstromentladung an zwei in das Gas hineinragenden Elektroden oder durch Anlegen eines hochfrequenten elektrischen Feldes an außerhalb des Rohrs befindliche Elektroden. Die Rohrwand ist so beschichtet, daß vor allem die nicht parallel zur Längsachse des Rohres verlaufenden, durch spontane Emissionen entstandenen Strahlen absorbiert werden. Das Gasgemisch ist notwendig, um eine Inversion herbeizuführen. Reines Neon gibt die Energie zwar ab, es gelingt jedoch technisch nicht, die auftretende Verluststrahlung so klein zu halten, daß es zu einer Inversion kommt. Dieser "optische Anfangswiderstand" wird durch Zugabe von Helium überwunden. Die angeregten Helium-Atome befinden sich im metastabilen Zustand und geben ihre Energie an die Neon-Atome durch Stöße zweiter Art ab, was zur Inversion führt. Da das Verhältnis Helium:Neon je nach Rohrdurchmesser im Bereich 5:1 bis 10:1 liegt, steht immer genügend Energie zur Verfügung, das Neon nach der Energieabgabe sofort wieder anzuregen und die Inversion zu erreichen. Das Neon strahlt im sichtbaren Bereich mit einer Wellenlänge von ca. 633 nm und im infraroten Bereich mit ca. 1150 nm und 3390 nm. Die Energieausbeute ist im infraroten Bereich größer als im sichtbaren. Aus praktischen Gründen wird die Welle im sichtbaren Bereich verwendet.

Um die Strahlung zusätzlich zu verstärken, werden die im Rohr entstandenen Strahlen an Resonatorspiegeln an den Enden des Rohres zurück in das Medium gelenkt. Damit die Spiegel durch den Aufprall von Ionen im Glasrohr auf Dauer nicht beschädigt werden, sind sie nicht direkt am Glasrohr sondern in Verlängerung der Achsen angebracht. Zur Abdichtung des Rohres sind daher an den Enden planparallele Glasplatten aufgeschmolzen. Der Abstand l der Spiegel bestimmt die Bandbreite des Frequenzspektrums nach  $\Delta f = \frac{c}{2l}$ . Um die Strahlleistung durch Reflexionen nicht zu mindern, sind die Platten nicht senkrecht zur Rohrachse angebracht, sondern zu dieser um den sogenannten "BREWSTER-Winkel" geneigt. Für Wellen, die senkrecht zur Fallebene der Platten polarisiert sind, ist der Reflektionsfaktor damit praktisch gleich Null. Die Platten wirken damit als Polarisationsfilter, da nur solche Wellen das Rohr verlustfrei verlassen. Die außenliegenden Spiegel sind mit einem dielektrischen Mehrschichtbelag versehen, von denen einer ca. 1 bis 2% der Strahlung nach außen durchläßt. Abhängig von der Wahl des Mehrschichtbelags wird eine der drei oben genannten Wellenlängen selektiv reflektiert, während die anderen absorbiert werden. Das Licht, das nach außen gelangt, besteht aus einem schmalen Bereich *einer* Frequenz und ist linear polarisiert.

# 2.1.3 Laser-Doppler-Interferometer

Beim Laser-Doppler-Interferometer wird eine Streckenänderung durch die relative Frequenzverschiebung zweier geringfügig unterschiedlicher Frequenzen bestimmt. Um die zwei Frequenzen zu erhalten, wird entlang des Mediums ein axiales Magnetfeld angelegt, welches den im Medium erzeugten Strahl aufgrund des ZEEMAN-Effektes symmetrisch in zwei Teillinien mit den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  aufspaltet. Diese entgegengesetzt zirkumpolarisierten Wellen sind nach dem Durchgang durch eine sogenannte " $\frac{\lambda}{4}$ -Platte" senkrecht zueinander linear polarisiert. Der Frequenzabstand ist abhängig von der Stärke des Magnetfeldes und liegt bei den verwendeten Geräten der Baureihe HP5527B von HEWLETT-PACKARD (HP) im Bereich von 1,7 *MHz* bis 2,4 *MHz*<sup>1</sup>. Da die Abweichung der beiden Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  gegenüber der Wellenlänge  $\lambda_0$  des Neons kleiner als 2,5 · 10<sup>-9</sup> ist, kann analog zu [MAURER 1983] ohne Genauigkeitsverlust mit der Neonlinie gerechnet werden.

Der aus zwei Frequenzen bestehende Strahl wird mit Hilfe eines Strahlteilers in einen Referenz- und einen Meßstrahl zerlegt (siehe Abbildung 2.1). Mit Hilfe eines Polarisators werden die beiden Wellen des internen Referenzstrahls in einer einzigen Ebene polarisiert und durch Interferenz wird daraus das Schwebungssignal  $f_2 - f_1$  erzeugt. Dieses Signal gelangt auf eine Photodiode, deren Ausgangssignal verstärkt und in Impulse umgeformt durch einen Zähler registriert wird. Die beiden Frequenzen des Meßstrahls werden im Interferometer voneinander getrennt und auf unterschiedliche externe Prismen gelenkt. Die Frequenz  $f_2$  gelangt während der gesamten Messung auf das stationäre externe Referenzprisma, die Frequenz  $f_1$  auf das längs des Strahls bewegliche Meßprisma. Nach der Strahlumkehr in den Prismen werden beide wieder im Interferometer vereinigt, durch einen Polarisator zur Interferenz gebracht und im weiteren analog zum internen Referenzstrahl verarbeitet.



Abb. 2.1: Laser-Doppler-Interferometer

Alternativ zu diesem Verfahren kann der Meßstrahl im Interferometer in zwei Strahlen unterschiedlicher Intensität geteilt werden. Damit sich nach der Umkehr in den Prismen unterschiedliche Frequenzen der beiden Strahlen im Interferometer überlagern, wird zwischen Interferometer und Meßprisma eine  $\frac{\lambda}{4}$ -Platte gebracht, die den Meßstrahl bei jedem Durchgang um 45° um die Strahlachse dreht. Der Polarisator hat dann die Aufgabe, eine der beiden senkrecht zueinander stehenden Interferenzebenen zu selektieren.

Wird das Meßprisma nicht verschoben, bewegt sich das Interferenzmuster des Meßstrahls mit derselben konstanten Geschwindigkeit wie das Muster des internen Referenzstrahls, d.h. beide Zähler erfassen innerhalb eines Zeitraums die gleiche Anzahl von Impulsen. Bei einer Verschiebung des Meßprismas relativ zum Laser, erfährt die Frequenz  $f_1$  aufgrund des Doppler-Effektes dagegen eine Frequenzverschiebung  $\pm \Delta f_1$ . Die Mischfrequenz mit der konstant gebliebenen Frequenz  $f_2$  ergibt sich dann zu  $f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1)$  und als Differenz zum Referenzstrahl

$$\Delta f = (f_2 - f_1) - (f_2 - (f_1 \pm \Delta f_1)) \quad . \tag{2.1}$$

 $\Delta f$  ist positiv bei Bewegung des Prismas in Richtung des Interferometers und negativ bei entgegengesetzter Bewegung. Eine Streckenänderung wird beim HP-Gerät durch Integration der Verschiebungsgeschwindigkeit über die Zeit ermittelt. Die momentane Geschwindigkeit  $v_M$  des Meßprismas ergibt sich aus  $\Delta f$  in Abhängigkeit von der Zeit zusammen mit der Wellenlänge  $\lambda_0$  der Neonlinie im Vakuum zu

$$v_M(t) = \pm \Delta f(t) \frac{\lambda_0}{2} \quad . \tag{2.2}$$

Durch Integration der Geschwindigkeit über die Zeit beträgt die Längenänderung

$$\Delta s = \frac{\lambda_0}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta f(t) dt \quad . \tag{2.3}$$

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Alle Zahlenangaben beziehen sich auf die Geräte von HP am Geodätischen Institut der Technischen Universität München.

Praktisch erfolgt diese Integration beim verwendeten Gerät, indem 1500 Mal pro Sekunde die Differenz zwischen den jeweils bis dahin von den Zählern registrierten Impulsen  $N_1$  und  $N_2$  gebildet wird. Mit der Gleichung  $N = N_2 - N_1$  ergibt sich die Längenänderung letztendlich zu

$$\Delta s = \frac{\lambda_0}{2} N \quad . \tag{2.4}$$

# 2.2 Fehlereinflüsse

In diesem Abschnitt sind alle Fehlerquellen dargestellt, die die Meßgenauigkeit des Laserinterferometers beeinflussen. Dazu zählen die langperiodische Abweichung der ausgestrahlten Wellenlänge gegenüber der exakten Wellenlänge des Neons, die kurzperiodische Schwankung der Frequenz, sowie die begrenzte Auflösung mit der sich Verschiebungen feststellen lassen. Während eine langperiodische Änderung unvermeidbar ist und sich nur durch eine spezielle Kalibrierung überprüfen läßt, werden Frequenzschwankung und Auflösungsbegrenzung durch elektronische Schaltungen weitestgehend eliminiert. Weitere Fehlerquellen stellen Refraktion, Totweg, Cosinus- und Abbéscher Fehler sowie der innere und äußere Strahlwegfehler des Meßprismas dar. Den größten Einfluß hat die Refraktion, die wegen der sich ständig ändernden meteorologischen Bedingungen entlang des Meßstrahls nur schwer erfaßbar ist. Alle anderen Fehler lassen sich durch eine entsprechende Meßanordnung soweit minimieren, daß sie vernachlässigbar sind.

# 2.2.1 Abweichung von der Neonlinie

Durch Anderungen in der Zusammensetzung des Gasgemischs des aktiven Mediums kann die tatsächlich ausgestrahlte Wellenlänge von der theoretischen des Neons abweichen. Die Zusammensetzung schwankt fertigungstechnisch bedingt, da es bildlich gesprochen nicht möglich ist, Atome einzeln abgezählt in das Glasrohr zu füllen. Ebenso ist es technisch unmöglich, das Glasrohr vollständig abzudichten, d.h. die Gasdichte nimmt mit zunehmendem Alter der Laserköpfe ab [FICKER 1996].

Die von HP durch Vergleich mit einem Jod-stabilisierten HeNe-Laser höherer Ordnung gemessene, von den beiden Lasern des Geodätischen Instituts tatsächlich ausgestrahlte Wellenlänge beträgt laut Zertifikat aus dem Jahr 1996, 632, 9913765 nm bzw. 632, 9913728 nm. Da im Gerät zur Berechnung der Strecke aber die Soll-Wellenlänge des Neons von 632, 991370 nm verwendet wird, folgt daraus ein absoluter Meßfehler von  $+0, 2 \mu m$  bzw.  $+0, 1 \mu m$  auf 20 m. Relativ bedeutet dies +0, 01 ppm bzw. +0, 004 ppm und ist damit für geodätische Zwecke ausreichend. Wegen der abnehmenden Gasdichte sollte ein Laser, der für Kalibrierungszwecke verwendet wird, in regelmäßigen Abständen durch den Hersteller überprüft werden.

# 2.2.2 Frequenzinstabilität

Um einen einheitlichen Maßstab zu gewährleisten, muß die Wellenlänge bzw. Frequenz während der Messung konstant bleiben. Weil das Energieniveau der Gasmoleküle aber nur unscharf als Band vorhanden ist (siehe Abschnitt 2.1.1), also eigentlich ein Energiespektrum aufweist, kann es bei Schwankungen der von außen auf das aktive Medium einwirkenden Energie zu Anderungen der abgestrahlten Frequenz kommen. Schwankungen treten z.B. bei der Umgebungstemperatur oder der Amplitude des optischen Pumpprozesses auf. Weicht die zugeführte Energie mehr ab, als mini- bzw. maximalfür den Ubergang von einem Band in ein anderes notwendig ist, kann es theoretisch sogar zum Zusammenbruch des Laserstrahls kommen. Im allgemeinen fallen beide Schwankungen jedoch nicht ins Gewicht [FICKER 1996]. Stärker wirkt sich eine Änderung der Resonatorlänge durch Temperaturänderungen aus, da die Frequenz unmittelbar von der Resonatorlänge abhängt. Im verwendeten Gerät läßt sich die Frequenz durch einen einfach aufgebauten Regelkreis weitgehend konstant halten. Dazu wird ein Teil des Referenzsignals  $f_2 - f_1$  im Laserkopf abgespalten und kontinuierlich von einer Photodiode aufgenommen. Aus dem entstehenden Signal können Abweichungen von der Frequenz der Neonlinie, die den Mittelwert beider Frequenzen darstellt, abgeleitet werden. Die Abweichungen werden während der Messung in Spannungskorrekturen umgeformt und zur Änderung der Resonatorlänge durch Piezo-Elemente verwendet. Die beiden Frequenzen liegen laut Herstellerangaben maximal 2,4 MHz auseinander. Die Hälfte davon ist der maximale Wert, um den die Frequenz  $f_0$  der Neonlinie schwanken darf, bevor die Resonatorlänge nachgesteuert wird. Wird in Formel (2.4) die Wellenlänge als Funktion der Frequenz ausgedrückt und nach der Frequenz abgeleitet, ergibt sich

$$d\Delta s = -\frac{c_0}{2f_0^2} N df_0 \quad . \tag{2.5}$$

Bei einer maximalen Differenzfrequenz von 1,2 *MHz* beträgt die Streckenänderung 0,05  $\mu m$  bezogen auf 20 m, was 0,002 ppm entspricht und für geodätische Zwecke als ausreichend konstant betrachtet werden kann.

## 2.2.3 Auflösungsungenauigkeit

Die Auflösung des Doppler-Interferometers von HP hängt von der Anzahl der von den Zählern pro Zeitraum erfaßten Impulse aufgrund des Ausgangssignals der Photodioden ab. Durch den Einsatz entsprechender Gerätekomponenten läßt sich die Frequenz dieses Signals vervielfachen und somit die Anzahl registrierter Zählimpulse pro Zeitraum deutlich vergrößern. Dies entspricht einer feineren Unterteilung der Bestimmung des Frequenzabstandes, wobei Formel (2.4) entsprechend anzupassen ist. Gleichzeitig werden damit immer höhere Anforderungen an die Erfassung der atmosphärischen Bedingungen gestellt. Bei Verwendung von Standardprismen garantiert HP eine Auflösung von  $\frac{\lambda_0}{64}$ . Dieser Wert gilt wegen der begrenzten Größe des internen Datenpuffers für die Zählimpulse nur über einen Bereich von ca. 20 m, was für diese Anwendung vollkommen ausreichend ist. Bei der gegebenen Auflösung wird jede Strecke, bei einer Wellenlänge von ca. 633  $\mu m$  und unter Ausschluß aller sonstiger Fehlerquellen, theoretisch mit einer Genauigkeit von ca. 10 nm aufgelöst. Der Einfluß dieses Fehlers kann somit vernachlässigt werden.

## 2.2.4 Refraktion

Ein stabilisierter Laserkopf strahlt eine Normalfrequenz  $f_0$  ab, die sich auch außerhalb des Kopfes beim Durchlauf durch die Atmosphäre nicht verändert. Dagegen ist die Lichtwellenlänge  $\lambda_L$  vom Brechungsindex  $n_L$  und damit von den meteorologischen Bedingungen entlang des Strahlweges abhängig. In Kombination mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  im Vakuum lautet die Formel für diesen Zusammenhang

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda_0} = \frac{c_0}{n_L \cdot \lambda_L} = const.$$
(2.6)

Die von der Auswerteeinheit des Lasersystems ausgegebene Strecke  $\Delta s_a$ , bezieht sich auf einen Bezugsbrechungsindex  $n_0$ , der vor der Messung programmiert werden kann. Während der Messung werden an mehreren diskreten Stellen kontinuierlich die atmosphärischen Bedingungen erfaßt, aus denen sich der aktuelle Brechungsindex  $n_L$  berechnet und mit dem die Strecken nach

$$\Delta s = \frac{n_0}{n_L} \Delta s_a \tag{2.7}$$

korrigiert werden.

Auf der 13. Versammlung der INTERNATIONAL UNION FOR GEODESY AND GEOPHYSICS (IUGG) wurde im Jahr 1963 das von BARREL & SEARS entwickelte Formelsystem zur Reduktion von elektro-optisch, mit nichtmoduliertem, monochromatischem Licht gemessenen Strecken "vorläufig endgültig" verabschiedet [IUGG 1963]. Alle folgenden Formeln sind auf die in Zwischenzeit standardmäßig eingeführte Größenordnung des Drucks in Hekto-Pascal [hPa] umgestellt. Die Frequenzstabilisierung des Lasers rechtfertigt es, das ausgestrahlte Licht als monochromatisch zu betrachten. Der Phasenbrechungsindex  $n_{Ph}$  von Luft wird mit der durch Kalibrierung ermittelten, tatsächlich ausgestrahlten Wellenlänge  $\lambda$  in [ $\mu m$ ] durch

$$n_{Ph} = 1 + (287, 604 + \frac{1, 6288}{\lambda^2} + \frac{0, 0136}{\lambda^4}) \cdot 10^{-6}$$
(2.8)

berechnet. Diese Formel gilt für eine trockene Lufttemperatur von  $0^{\circ}C$ , einen Luftdruck von 1013,25 hPaund einen Kohlendioxidgehalt von 0,03%. Für eine HeNe-Quelle folgt mit einer mittleren ausgestrahlten Wellenlänge  $\lambda = 632,991370 nm$ 

$$n_{Ph} = 1,000291754$$

Die Reduktion auf den tatsächlichen Brechungsindex  $n_L$  erfolgt mit der von KOHLRAUSCH vereinfachten Gleichung

$$n_L = 1 + \frac{n_{Ph} - 1}{1 + \alpha \cdot T} \cdot \frac{p}{1013, 25} - \frac{4, 125 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha \cdot T} \cdot e \quad , \tag{2.9}$$

mit Trockentemperatur T in [°C], Partialdruck des Wasserdampfes e in [hPa],  $\alpha = \frac{1}{273, 16}$  und Luftdruck p in [hPa].

Der Partialdruck des Wasserdampfes wird, bei Messung der Trocken- und der Feuchttemperatur T' der Luft mit einem Assmannschen Aspirationspsychrometer, mit Hilfe der Formel nach MAGNUS-TETENS und Sprung berechnet nach

$$e = 10^{\left(\frac{7,5\cdot T'}{T'+237,3}+0,6609\right)} - \frac{1}{2} \cdot 9,935 \cdot 10^{-4} \cdot (T-T') \cdot p \quad .$$

$$(2.10)$$

Für mittlere atmosphärische Bedingungen im Meßlabor der TU München, von  $T = 20^{\circ}C$ , p = 960 hPa und e = 13 hPa ergeben sich nach Differentiation von Gleichung (2.9) zur Abschätzung von Meßfehlern oder nicht erfaßten meteorologischern Änderungen im Meßlabor um dT, dp und de die differentiellen Anteile

$$dn_L = \left( -\alpha \frac{n_{Ph} - 1}{(1 + \alpha T)^2} \frac{p}{1013,25} + \alpha \frac{4,125 \cdot 10^{-8}}{(1 + \alpha T)^2} e \right) dT \quad = -8,77 \cdot 10^{-7} dT \tag{2.11}$$

$$dn_L = \left(\frac{n_{Ph} - 1}{1 + \alpha T} \frac{1}{1013, 25}\right) dp \qquad \qquad \hat{=} + 2,68 \cdot 10^{-7} dp \qquad (2.12)$$

$$dn_L = -\left(\frac{4,125\cdot10^{-8}}{1+\alpha T}\right) de \qquad \qquad \hat{=} -0,38\cdot10^{-7} de \qquad (2.13)$$

Wird Gleichung (2.6) nach  $\lambda_L$  aufgelöst, ergibt sich

$$\lambda_L = \frac{\lambda_0}{n_L} \tag{2.14}$$

woraus sich bei einer Änderung um  $dn_L$  eine Unsicherheit der Lichtwellenlänge  $\lambda_L$  von

$$d\lambda_L = -\frac{\lambda_L}{n_L} \cdot dn_L \tag{2.15}$$

ableiten läßt.

Soll die Strecke mit einer relativen Genauigkeit von  $1 \cdot 10^{-7}$  gemessen werden, so ist  $n_L$  ebenso genau zu bestimmen. Daraus folgt eine maximal zulässige Ungenauigkeit bei der Temperaturmessung von  $dT = 0, 1^{\circ}C$ , bei der Druckbestimmung von dp = 0, 37 hPa und bei der Partialdruckbestimmung von de = 2, 63 hPa. Allerdings kann die Temperatur selbst unter Laborbedingungen nur mit einer Genauigkeit von maximal  $\pm 1, 0^{\circ}C$  bestimmt werden. Dadurch entsteht ein Streckenfehler, der betragsmäßig 1 ppm nicht übersteigt und noch zu tolerieren ist. Die übrigen Meßtoleranzen können dagegen bei Messungen unter Laborbedingungen eingehalten werden.

#### 2.2.5 Totweg

Eine Änderung der meteorologischen Verhältnisse wirkt sich nach Formel (2.6) auf die Wellenlänge und damit auf die Berechnung der Streckenänderung aus. In den identischen optischen Wegen der beiden Teilstrahlen des Lasers mit den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$ , sind die Laufzeitunterschiede differentiell vernachlässigbar klein. Nach dem Durchgang durch das Interferometer legen beide Strahlen jedoch unterschiedliche Wege zurück. Daher ist besonders in diesen Bereichen die Meteorologie zu erfassen, um beide Strahlen auf ein einheitliches Niveau zu korrigieren. Um den Aufwand zur Erfassung der Meteorologie so gering wie möglich zu halten, sollte das Interferometer mit dem Referenzprisma möglichst nah zur Anfangsstellung (Reset-Point) des Meßprismas montiert werden. Das dann meteorologisch nicht erfaßte Wegstück zwischen Interferometer und Reset-Point, wird als Totweg (Deadpath) bezeichnet (siehe Abbildung 2.2). Ist der Totweg groß und wird mathematisch nicht modelliert, können kleine Verschiebungen des Meßprismas im Rauschen der Meteorologie untergehen. Da am Komparator des Geodätischen Instituts konstruktionsbedingt nur ein minimaler Totweg vorhanden ist, braucht dieser Fehler nicht weiter berücksichtigt werden.



Abb. 2.2: Totweg-Fehler

## 2.2.6 Cosinus-Fehler

Der Laserstrahl und die Bewegungsachse des Meßprismas sollten im Idealfall identisch, zumindest aber parallel zueinander verlaufen. Ist dies nicht der Fall, dann entspricht die gemessene Entfernung s' nicht der vom Prisma zurückgelegten Entfernung s, sondern deren Anteil in Richtung des Laserstrahls (siehe Abbildung 2.3).



Abb. 2.3: Cosinus-Fehler

Ausgehend vom Beobachtungsfehler (Ist - Soll)

$$ds_C = s' - s = s \cdot \cos \alpha - s = -s \cdot (1 - \cos \alpha) \tag{2.16}$$

wird der relative Fehler

$$\frac{ds_C}{s} = -(1 - \cos \alpha) \tag{2.17}$$

berechnet. Weil dieser Fehler vom Cosinus des eingeschlossenen Winkels  $\alpha$  zwischen beiden Achsen abhängt, wird er als Cosinus-Fehler bezeichnet. Er ist immer negativ, d.h. die gemessene Entfernung ist immer kürzer als die wahre. Um den Fehler so klein wie möglich zu halten, müssen die beiden Achsen sorgfältig justiert werden. Bewegt sich das Prisma nicht parallel zum Laserstrahl, so ergibt sich aufgrund des Strahlengangs des Lichts im Prisma zwischen Sendestrahl und reflektiertem Strahl eine zunehmende Parallelversetzung. Dadurch wandert der Strahl aus der Eingangsoptik des Laserkopfs heraus, was auch zu einer elektronisch messbaren Verminderung der Strahlintensität führt.

Im konkreten Fall läßt sich das Meßprisma auf einer maximalen Strahllänge im Komparator von 6 m so justieren, daß die Abweichung an der Eingangsoptik des Laserkopfs weniger als  $\pm 0,5 mm$  beträgt. Dies entspricht einem Winkel  $\alpha$  von 5 mgon und damit einer ausreichenden relativen Streckengenauigkeit ds/svon  $\pm 0,003 ppm$ .

Zu demselben Phänomen führt auch das unterschiedliche temperaturbedingte Ausdehnungsverhalten der einzelnen Bauteile im bzw. am Laserkopf. Insbesondere nach dem Einschalten des Gerätes kann es durch die entstehende Wärme theoretisch zu einem allmählichen Auswandern des Strahls aus der Anfangsposition kommen. HP empfiehlt daher mindestens 10 Minuten nach dem Einschalten zu warten, damit innerhalb des Laserkopfs ein ausreichendes thermisches Gleichgewicht besteht. In der Praxis wurden aber auch bei kürzeren Zeiten keine Änderungen festgestellt. Da die Messungen unter klimatisierten Bedingungen stattfinden, sind während der Messung keine starken Temperaturschwankungen zu erwarten.

#### 2.2.7 ABBÉscher Fehler

Das ABBÉsche Komparatorprinzip [ABBÉ 1890] besagt, daß die zu messende Strecke (Strichteilung) und der Maßstab (Laserstrahl) möglichst in einer Geraden liegen sollen. Je größer der Abstand *h* zwischen beiden Achsen ist, desto größer wird der Längenmeßfehler *ds*, der durch eventuell vorhandene Ungenauigkeiten des Führungssystems für den Prüfling bzw. die Ableseeinrichtung (Mikroskop, Kamera) verursacht wird (siehe Abbildung 2.4).

Die Führungsungenauigkeiten können Kippungen bzw. Verdrehungen  $\varepsilon_i$  verursachen, die sich auf Prüfling und Prisma auswirken. Der vom Prisma zurückgelegte Weg ist also entsprechend dem Vorzeichen des Drehwinkels entweder kürzer oder länger als der tatsächlich am Prüfling abgegriffene Weg. Unter der Annahme einer fehlerfreien Ausgangsposition, wird der Abbésche Fehler berechnet durch

$$ds_A = s' - s = h \cdot \tan \varepsilon_i \quad . \tag{2.18}$$



Abb. 2.4: ABBÉscher Fehler

Bei einer maximalen Kantenlänge der Prismenfassung von ca. 50 mm kann der Abstand h zwischen den einzelnen Achsen meist kleiner gleich 40 mm gehalten werden. Unter Annahme eines Maximalwertes des ABBÉschen Fehlers von  $ds_A = \pm 0, 1 \, \mu m$  beträgt die erlaubte Neigungsänderung dann  $\varepsilon_i = \pm 0, 2 \, mgon$ . Dieser Fehler kann auch dadurch minimiert werden, daß das Meßprisma, wie im konkreten Fall, nicht zusammen mit der Ableseeinrichtung am Prüfling entlang, sondern zusammen mit dem Prüfling in Verlängerung der Teilung an der fest positionierten Ableseeinrichtung vorbeigeführt wird.

## 2.2.8 Strahlwegfehler des Meßprismas

Durch Führungsungenauigkeiten der Meßbahn kommt es generell zu Fehlern im Strahlengang des Meßprismas. [MAURER 1983] unterscheidet zwischen dem Strahlwegfehler innerhalb und außerhalb des Prismas. Bei den verwendeten Tripelprismen handelt es sich um reguläre, dreiseitige Glaspyramiden (siehe Abbildung 2.5). Sie entstehen durch diagonale Halbierung eines Glaswürfels senkrecht zu einer Würfeldiagonalen. Der Durchstoßpunkt der Diagonalen durch die Halbierungsebene wird als Zentralpunkt Z bezeichnet. Die Hälfte der Diagonalen ist definiert als Dicke D des Prismas. Aus Gewichtsgründen werden die drei übrigen Prismenecken abgetrennt.



Abb. 2.5: Strahlengang im Tripelprisma

Trifft ein Lichtstrahl lotrecht auf die Prismenoberfläche auf, wird er an den übrigen Prismenflächen durch totale Reflektion parallel und symmetrisch zu Z versetzt. Bei schrägem Einfall unter dem Winkel  $\varepsilon$  gegen das Lot, wird er in Abhängigkeit von den Brechungskoeffizienten  $n_L$  und  $n_G$  für Luft bzw. Glas unter dem Winkel

 $\varepsilon'$  gebrochen. Er wird zwar parallel, aber asymmetrisch zu Z reflektiert. Der dann gültige Symmetriepunkt Z' zwischen beiden Strahlen, entfernt sich mit zunehmendem  $\varepsilon$  von Z.

Innerhalb des Prismas beträgt der zurückgelegte Strahlweg nach [MAURER 1983] im ersten Fall  $s_P = 2 \cdot D$ und im zweiten Fall  $s'_P = 2 \cdot D / \cos \varepsilon'$ . Mit wachsendem Winkel  $\varepsilon$  bzw.  $\varepsilon'$  wird der Strahlweg im Glas also länger. Der daraus, unter Berücksichtigung von  $n_L \approx 1$  und  $n_G$  resultierende innere Strahlwegfehler

$$ds_i = s'_P - s_P = 2 \cdot n_G \cdot D \cdot \left(\frac{1}{\cos \varepsilon'} - 1\right) \quad . \tag{2.19}$$

ist direkt von der Größe des Glaskörpers abhängig.

Außerhalb des Prismas bezieht sich die gemessene Distanzänderung des ungekippten Prismas auf den Abstand der zum Sendestrahl lotrecht stehenden Ebenen durch Z im Anfangs- und Endpunkt. Bei einer Verdrehung liegt der dann gültige Zentralpunkt Z' aber entweder vor oder hinter dieser Ebene. [MAURER 1983] gibt für den Abstand, der dem äußeren Strahlwegfehler entspricht, unter Vernachlässigung von  $n_L$  folgende Formel an:

$$ds_a = \Delta s' - \Delta s = -n_G \cdot D \cdot \tan \varepsilon' \cdot \sin \varepsilon' \quad . \tag{2.20}$$

Eine Berechnung der beiden Fehler liefert für gleiche Parameter dieselben Beträge, die sich nur in den Vorzeichen unterscheiden, d.h. sich insgesamt gegenseitig aufheben. So ergibt sich beispielsweise bei Annahme eines mittleren Brechungskoeffizienten von Glas  $n_G = 1, 5$ , einer Glasdicke von 16 mm und einem Winkel von  $\varepsilon = +0, 5 \text{ gon bzw. } \varepsilon' = +0, 3333 \text{ gon}$ , für  $ds_i$  ein Wert von  $+0,658 \mu m$  bzw.  $ds_a = -0,658 \mu m$ .

## 2.2.9 Zusammenfassung der Fehlereinflüsse

Fehler	Beschreibung	Maßnahmen
Abweichung von der Neonlinie	Abweichung der in Abhängigkeit von der Gas- zusammensetzung zur Messung ausgestrahl- ten Wellenlänge gegenüber der zur Berechnung verwendeten	Gerät regelmäßig kalibrieren
Frequenzinstabilität	Änderung der ausgestrahlten Frequenz als Funktion der temperaturabhängigen Resona- torlänge	Automatische Nachregelung der Resonator- länge; Klimatisierung des Meßlabors
Auflösungsunge- nauigkeit	Ungenauigkeit der optischen Signalauflösung in linearer Abhängigkeit von der Abtastfre- quenz der Photodioden	Vervielfachung der Photodiodenfrequenz
Refraktion	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Meßstrahls in Abhängigkeit von der Meteorologie entlang des Strahlwegs	Erfassung der Meteorologie und Reduktion der gemessenen Streckenänderung auf eine einheit- liche Bezugsatmosphäre; Klimatisierung des Meßlabors
Totweg	Unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkei- ten von Meß- und Referenzstrahl in Abhängig- keit von der Meteorologie entlang der jeweili- gen Strahlwege in der Anfangsmeßstellung	Gleicher Abstand von Meß- und Referenzpris- ma zum Interferometer in der Anfangsmeßstel- lung; siehe Refraktion
Cosinus-Fehler	Nichtparallelität von Laserstrahl und Verschie- bungsachse des Meßprismas in Abhängigkeit von der Justierungsgenauigkeit der Achsen bzw. der Temperaturausdehnung einzelner La- serkopfbauteile	Justierung des Meßstrahls zur Meßbahn; Akklimatisierung des eingeschalteten Gerätes vor Meßbeginn abwarten
ABBÉscher Fehler	Fehlerhafte Messung bei getrennter Ver- schiebung von Meßprisma und Teilung in Abhängigkeit von der Führungsungenauigkeit des Prismas und vom Abstand zwischen Pris- ma und Teilung	Kollineare Anordnung und gemeinsame Ver- schiebung von Meßprisma und Teilung
Strahlwegfehler des Meßprismas	Verkürzung des Strahlwegs im Meßprisma bzw. Verlängerung an der Prismenoberfläche durch geometrische Verschiebung des opti- schen Zentralpunkts in der Prismenoberfläche bei nicht senkrechtem Auftreffen des Laser- strahls	Beide Fehler eliminieren sich gegenseitig und sind daher vernachlässigbar

# 3. Kamera

Eine zentrale Komponente des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten neuen Systems zur Kalibrierung beliebiger Strichteilungen, d.h. vor allem Bar-Codes, ist eine CCD-Kamera mit Flächensensor. Der Flächensensor bildet verglichen mit einem Zeilensensor, einen größeren Abschnitt der Bildkante ab. Dadurch wird die Anfälligkeit der Messung gegenüber Beschädigungen, Verschmutzungen und Lichtreflektionen der Teilung vermindert. Die Kamera wird analog zu den Mikroskopen der bisherigen Systeme senkrecht zur Teilung ausgerichtet und beobachtet deren Verschiebung. Die Striche werden in den entstehenden Bildern nicht nur detektiert, sondern auch ausgemessen.

Bezüglich der Meßgenauigkeit im Rahmen des Gesamtsystems müssen Kamera und Bildauswertung hohen Anforderungen genügen. In diesem Kapitel wird die gerätetechnische Seite der Kamera behandelt, während die Bildauswertung in Kapitel 4 folgt. In Abschnitt 3.1 werden ausgehend von der allgemeinen Funktionsbeschreibung lichtempfindlicher Halbleiter, Möglichkeiten zum Transport der Ladung und deren Anwendung in verschiedenen Architekturen von CCD-Flächensensoren aufgezeigt. Den Abschluß bildet die Beschreibung von Schaltungen zum Auslesen der Ladung aus dem Sensor. Danach werden in Abschnitt 3.2 die an der Kamera auftretenden Fehler dargestellt.

# 3.1 Technische Grundlagen

# 3.1.1 Lichtempfindliche Halbleiter

Die Leitfähigkeit eines Körpers hängt davon ab, ob die Elektronen den Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband überwinden können (siehe Abschnitt 2.1.1). Dies kann durch Energiezufuhr von außen beeinflußt werden. So besitzen sogenannte "Halbleiter", die z.B. aus einem Silizium- oder Germanium-Kristallgitter bestehen, bei tiefen Temperaturen keine freien Ladungsträger, während deren Anzahl bei steigender Temperatur zunimmt. Gleichzeitig findet damit häufiger eine Rekombination zwischen den freien Elektronen und den ionisierten Atomen statt. Hierbei stellt sich ein von der Temperatur abhängiger Gleichgewichtszustand ein. Damit liegt die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern zwischen den Extremen Isolator und Metall. Die Bewegungsrichtung der freien Elektronen ist zufällig ausgerichtet. Wird eine Spannung an den Halbleiter angelegt, wandern die freien Elektronen zum Pluspol (Drift) und verursachen die Eigenleitung des Halbleiters. Um die Temperaturabhängigkeit zu minimieren und die Leitfähigkeit zu erhöhen, werden gezielt Fremdatome wie z.B. Gallium oder Arsenid als Störstellen in das Kristallgefüge des Halbleiterkörpers eingebaut, was als Dotierung bezeichnet wird.

Ein Fremdatom wird dann als Donator bezeichnet, wenn es mehr Valenzelektronen als die Atome des Halbleiters, mit denen es eine Bindung eingeht, besitzt und diese als Leitungselektronen abgibt. Weil in diesem Fall negative Ladungsträger erzeugt werden, wird der Halbleiter als n-Leiter bezeichnet, und die Dotierung als n-Dotierung. Besitzt das Fremdatom dagegen weniger Valenzelektronen als die Halbleiteratome, wird es als Rezeptor bezeichnet, der bei Nachbaratomen Elektronenlöcher erzeugt und sie positiv ionisiert. Im Austausch gegen Elektronen von anderen Nachbaratomen wandern diese Löcher regellos durch das Kristallgitter des Halbleiters. Weil sich die Löcher wie positive Ladungsträger verhalten, wird diese Dotierung als p-Dotierung und der Halbleiter als p-Leiter bezeichnet.

Durch Anlegen einer Spannung entsteht in beiden Fällen die sogenannte "Störstellenleitung", die allerdings immer durch die Eigenleitung überlagert ist. In jedem Halbleiter existieren aufgrund spontaner Erzeugung sowohl freie Elektronen als auch Löcher. Je nach Dotierungsart überwiegt aber eine Ladungsträgerart, die dann als Majoritätsträger, die andere entsprechend als Minoritätsträger bezeichnet wird. Damit sind in einem n-Leiter die Elektronen, in einem p-Leiter dagegen die Elektronenlöcher die Majoritätsträger. Während sich der temperaturabhängige Gleichgewichtszustand im Falle der Majoritätsträger sehr schnell (ca.  $10^{-13} s$ ) einstellt, läuft er bei Minoritätsträgern in Abhängigkeit von der Kristallqualität vergleichsweise langsam (ca.  $1 \mu s$  bis 1 ms) ab. Generell nimmt die Leitfähigkeit durch die Dotierung stark zu. Kommt beispielsweise ein Fremdatom auf  $10^5$  Halbleiteratome, so steigt die Leitfähigkeit im Vergleich zu einem reinen Halbleiterkristall um den Faktor 1000 [KUCHLING 1988].

Ein Halbleiter der räumlich zur einen Hälfte als p-Leiter und zur anderen als n-Leiter dotiert ist, wird als Halbleiterdiode (pn-Diode) bezeichnet. Es kommt zu einer entgegengerichteten, temperaturabhängigen Diffusion der jeweils freien Ladungsträger in das andere Halbleitermaterial hinein. Dies führt durch gegenseitige Rekombination zu einer an freien Ladungsträgern verarmten Grenzschicht, der sogenannten "Sperrschicht". Die zurückbleibenden ionisierten Atome verhindern durch elektromagnetische Abstoßung ein weiteres Eindringen der freien Ladungsträger aus der anderen Schicht. Wird eine äußere Spannung in der Art angelegt, daß der Minuspol mit dem p-Leiter und der Pluspol mit dem n-Leiter verbunden ist (Sperrichtung), verbreitert sich die Sperrschicht. Bei umgekehrter Polung verkleinert sich diese Schicht und letztendlich fließt Strom, d.h. die Diode wird in Durchlaßrichtung betrieben.

In der Sperrschicht kann es durch Energiezufuhr von außen zu einer paarweisen Bildung von freien Leitungselektronen und Löchern kommen, die dann den Sperrstrom bilden. In diesem Zusammenhang wird die Sperrschicht auch als Raumladungszone bezeichnet. Wird die Energie zugeführt, indem der Halbleiter beleuchtet wird, entstehen die freien Ladungsträger proportional zur Lichtintensität. Mit Hilfe einer angelegten Spannung lassen sich die entstehenden freien Ladungsträger "absaugen". Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Photon einen Ladungsträger erzeugt, wird als Quantenwirkungsgrad bezeichnet und liegt in der Regel zwischen 60% -80%. Aufgrund dieser Eigenschaften wurden lichtempfindliche Halbleitersensoren aus pn-Fotodioden oder Metal-Oxide-Semiconductor (MOS) Kondensatoren auf Siliziumbasis entwickelt.

Bei den Fotodioden bestrahlt das Licht unmittelbar den inselförmigen pn-Bereich (siehe Abbildung 3.1 a)). Sie weisen daher eine günstige spektrale Empfindlichkeit auf. Durch kurzzeitiges Anlegen einer Spannung in Sperrichtung über eine Aluminiumelektrode wird der pn-Bereich vollständig entladen und damit eine Kapazität aufgebaut. Das einfallende Licht baut diese Kapazität der Raumladungszone durch die erzeugten freien Ladungsträger ab. Die maximale Speicherkapazität hängt von der Größe der Raumladungszone und ihrer Dotierung ab. Ein Auslesen der gespeicherten Information geschieht beim Wiederaufbau der Kapazität. Fotodioden werden einzeln, eindimensional als Fotodiodenzeile oder zweidimensional als sogenannter "xyadressierter" Sensor verwendet. In jedem Fall ist eine unmittelbare Abfrage einzelner Dioden unabhängig von der Lage im Sensor möglich. Als großer Nachteil erweist sich der Spannungshub des Signals beim Auslesen von der sehr kleinen Speicherkapazität der Fotodiode auf die wesentlich größere Kapazität der Ausleseleitung, der zu einem schlechten Signal/Rausch-Verhältnis führt.



Abb. 3.1: Lichtempfindliche Halbleiter

MOS-Kondensatoren bestehen dagegen aus einem p- oder n-Halbleiter, der mit einer Oxid-Isolierschicht versehen ist und auf dessen Oberfläche eine Elektrode aus lichtdurchlässigem Polysilicium (Surface-Channel, SC) aufgebracht ist (siehe Abbildung 3.1 b)). Bei angelegter Spannung entsteht unterhalb der Elektrode ein sogenannter "Potentialtopf", d.h. eine Raumladungszone, in dem die erzeugten freien Ladungsträger gespeichert werden. Die Größe der Raumladungszone wird durch die Elektrode bestimmt. Diese Oberflächenbauweise kann durch Einfügen einer n- oder p-Halbleiterschicht zwischen der Oxid-Isolierschicht und dem p- bzw. n-Halbleiter modifiziert werden. Erzeugte freie Minoritätsträger sammeln sich jetzt nicht mehr unmittelbar an der Isolierschicht unter der Elektrode, sondern an der tiefer liegenden Grenzschicht der beiden Halbleiter (Burried-Channel, BC). Dadurch kann im Vergleich zur SC-Bauweise bei gleicher Spannung weniger Ladung gespeichert werden. Allerdings sind die Übertragungsverluste geringer und die Übertragungsgeschwindigkeit ist größer. Im Vergleich zu pn-Dioden weisen MOS-Kondensatoren generell eine wesentlich größere Signalausbeute auf. Sie besitzen aber eine selektive spektrale Empfindlichkeit, da das auftreffende Licht auf seinem Weg durch die einzelnen Schichten in die Halbleiterschicht gefiltert wird. Dieser Effekt läßt sich durch Verwendung anderer Elektrodenmaterialien anstelle von Polysilizium oder durch Belichtung des Sensors von der Seite des Halbleitermaterials her minimieren.

Wegen der im Vergleich zu pn-Dioden größeren Signalausbeute werden MOS-Kondensatoren in der Kameratechnik bevorzugt und zu Zeilen (Line-Sensor) oder Feldern (Array-/Area-Sensor) angeordnet. Die durch Belichtung im Sensor gespeicherte Information kann entweder durch Ladungsverschiebung (Charge-Coupled-Device, CCD) oder durch Ladungsinjektion (Charge-Injection-Device, CID) ausgelesen werden. Der prinzipielle Unterschied zwischen beiden Methoden besteht darin, daß ein CID wahlfreien Zugriff auf die einzelnen Kondensatoren gestattet, während bei einem CCD immer der gesamte Sensor ausgelesen werden muß. Aufgrund des besseren Signal/Rausch-Abstandes und der einfacheren Herstellung hat die CCD-Technik jedoch die größere Verbreitung am Markt gefunden.

# 3.1.2 Ladungstransport

Zum Verschieben der durch das einfallende Licht akkumulierten Ladung werden bei einem CCD-Sensor die Kondensatoren in Elemente (Picture Element; Pixel) und diese wiederum in Register zusammengefaßt. Die Elektroden der einzelnen Elementkondensatoren werden dabei in zwei, drei oder vier unterschiedlichen Phasen betrieben. Beim 2-Phasenmodus hat jedes Pixel vier Elektroden, von denen jeweils zwei miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 3.2 a)). Bei jedem Paar liegt eine Elektrode auf der Isolierschicht auf, während die andere in diese integriert ist und sich damit näher zum Halbleitermaterial befindet. Der Potentialtopf darunter reicht also tiefer in das Halbleitermaterial als der andere und die Ladung eines Pixels sammelt sich automatisch in ihm. Benachbarte Kondensatoren werden mit unterschiedlichen Phasen betrieben, wodurch die Ladungen dann von einem Kondensator zum nächsten weiterfließen. Ein Zurückfließen in den davorliegenden Kondensator wird durch die unterschiedlichen Potentialtiefen bis zur maximalen Füllung des tieferen Potentialtopfs verhindert.



Abb. 3.2: Phasenmodi

Der 3-Phasenmodus ist technisch am einfachsten zu realisieren. Jedes Pixel besitzt drei Elektroden mit jeweils unterschiedlicher Phasenlage, die auf der Isolierschicht aufliegen (siehe Abbildung 3.2 b)). Die unter einer Elektrode befindliche Ladung wird unter die nächste durch Anlegen des gleichen Potentials verschoben. Die Ladung verteilt sich nun über beide Töpfe gleichmäßig. Damit die restliche Ladung weiterfließt, erfolgt anschließend eine Zurückschaltung des Potentials an der ersten Elektrode. Um bei gleicher Elektrodengröße und Potentialtiefe mehr Ladung verschieben zu können, kann die Elektrodenanzahl pro Pixel auf 4 erweitert werden (4-Phasenmodus). Die Ladung wird bei dieser Bauweise unter jeweils zwei Elektroden gespeichert. Der Ladungstransport erfolgt analog zum 3-Phasenmodus.

# 3.1.3 CCD-Architekturen für Flächensensoren

Erfolgt die Ladungsverschiebung bei Flächensensoren unmittelbar aus den Pixeln des Bildregisters in das lichtgeschützte sogenannte "Ausleseregister", werden sie als Full-Frame-Sensor (FF) bezeichnet (siehe Abbildung 3.3 a)). Das Ausleseregister stellt die letzte Stufe an Kondensatoren dar, die der Umwandlung der Information von der analogen in die zur rechnergestützten Weiterverarbeitung notwendigen digitalen Form vorgeschaltet ist. Weil es den Inhalt eines Bildes nur zeilenweise aufnehmen kann, muß mit der Aufnahme eines neuen Bildes solange gewartet werden, bis der gesamte Bildinhalt ausgelesen wurde. Um die lange Ausleseregister (FT) wird die Information aus dem Bildregister zu vermeiden, gibt es zwei Möglichkeiten: Beim Frame-Transfer-Sensor (FT) wird die Information aus dem Bildregister zunächst in das lichtgeschützte Speicherregister und erst von dort zum Ausleseregister verschoben (siehe Abbildung 3.3 b)). Beim Interline-Transfer-Sensor (IT) wird das Speicherregister auf Kosten der Auflösung unmittelbar neben den Akkumulationskondensatoren des Bildregisters angeordnet (siehe Abbildung 3.3 c)). Die drei Sensortypen sind so dargestellt, wie sie mit Blick in eine Kamera ohne Objektiv zu sehen wären. Der erste ausgelesene Akkumulationskondensator links unten entspricht, aufgrund der Bilddrehung durch das Objektiv und der Seitenspiegelung durch die objektseitige Sicht, dem Punkt links oben im Bild.



Abb. 3.3: Sensorkonzepte

Damit es zwischen den einzelnen Registern nicht zu einem unbeabsichtigten Austausch von Ladung kommt, sind diese untereinander durch eine Dotierung des Halbleiters, die als statische Elektronenbarriere wirkt, voneinander getrennt (Channel-Stop). Die beabsichtigte Verschiebung der Ladung zu bestimmten Zeitpunkten, wird durch den Einbau sogenannter "Transfer-Gatter" (Transfer-Gates) zwischen die Register erreicht, die entsprechend elektrisch geschaltet werden.

Während der Verschiebung unterliegen die Pixel einer weiteren Belichtung, die das Bild umsomehr verfälscht, je länger es sich innerhalb des Bildregisters befindet. Durch den Einsatz eines Verschlußes (Shutter) läßt sich dieser Effekt vermeiden. Beim elektronischen Verschluß wird analog zum mechanischen die Belichtungszeit des Sensors verkürzt. Allerdings geschieht dies nicht durch Abdeckung, sondern durch Löschung (Reset) der bis kurz vor dem eigentlichen Auslesen gesammelten Ladung. Dazu wird auf Kosten der Auflösung neben dem Akkumulationskondensator ein Reset-Kondensator eingebaut, der die Ladung im Prinzip wie beim Ladungstransport ausliest. Um in der kurzen Zeitspanne zwischen erstem und zweitem Auslesen trotzdem ein brauchbares Bild zu erhalten, muß das Objekt einen ausreichenden Kontrast aufweisen.

Die Hersteller geben als Leistungsdaten meistens xy-Ausdehnung, Pixelanzahl, Pixelgröße (Pitch-Size) und den lichtempfindlichen Anteil (Aperture-Size) für den Akkumulationsbereich an. Je größer die Pixelanzahl ist und je kleiner die Pitch-Size ist, desto größer ist die Auflösung des Sensors und desto mehr Details lassen sich in einer Aufnahme erkennen. Bei der am Geodätischen Institut der TU München eingesetzten Kamera handelt es sich um das Modell CA-D4-1024A der Firma DALSA, mit 1024 × 1024 Pixel von je  $12 \times 12 \,\mu m^2$  Größe in FT-Anordnung. Damit gehört sie (derzeit) zu den hochauflösenden Kameras. Eine andere Möglichkeit die Auflösung zu steigern, bieten die Micro- bzw. Macro-Scan-Technik [LUHMANN 1991, R. LENZ u. U. LENZ 1993], die jedoch nur bei statischen Szenen einsetzbar sind.

# 3.1.4 Auslesen der Ladung

Die Helligkeitsverteilung eines Bildes erzeugt während der Aufnahme ein zeit- und ortsdiskretes Signal auf dem Sensor. Diese Ladungen werden anschließend bis an das Ende des Ausleseregisters verschoben und für die weitere Verarbeitung in elektronisch leichter zu handhabende proportionale Spannungen umgewandelt. Dazu ist an das Ende der phasengeschalteten Transportkondensatoren ein Kondensator (Output-Gate) angehängt, der die Funktion einer Schleuse übernimmt (siehe Abbildung 3.4).



Abb. 3.4: Ausleseschaltung

Für einen kurzen Moment läßt das Gate die Ladung vom letzten Transportkondensator in eine Auslese-Diode mit fest vorgegebener Kapazität passieren, in der die eigentliche Umwandlung stattfindet. In Abhängigkeit von der Ladung ergibt sich die Spannung zu

$$Spannung = \frac{Ladung}{Kapazit\ddot{a}t} \quad . \tag{3.1}$$

Anschließend wird die Kapazität wieder aufgebaut, indem die Ladung der Auslese-Diode von einer Reset-Diode durch "Absaugen" zurückgesetzt wird. Ein dazwischenliegender Kondensator (Reset-Gate) steuert diesen Vorgang. Um die Kapazität der Reset-Diode anschließend wieder aufzubauen, ist diese ihrerseits unmittelbar mit einer Spannungsquelle verbunden. Die Schaltung von Output- und Reset-Gate erfolgt in Abstimmung mit dem Phasentakt der Transportkondensatoren. Die Spannungen werden danach durch eine sogenannte "Sample-Hold-Schaltung" zu einem kontinuierlichen, stufenförmigen Analogsignal verbunden. Kameras mit analogem Ausgang fügen an dieses Bildsignal nach einer elektrischen Filterung noch Zeilenund Bild-Synchronimpulse an<sup>1</sup>. Diese definieren jeweils den Beginn einer neuen Zeile bzw. eines neuen Halb-/Vollbildes.

Die hier verwendete Kamera weist die Besonderheit auf, daß die linke bzw. rechte Bildhälfte des gesamten Sensors mit jeweils  $512 \times 1024$  Pixel in ein eigenes Ausleseregister ausgelesen wird. Noch in der Kamera werden beide Signale im sogenannten "Flash-Verfahren" [BEUTH 1993] Analog/Digital (A/D) gewandelt. Dabei wird die Analogspannung bei einer Auflösung von 8 Bit, in 8 Komparatoren mit entsprechend abgestuften bekannten Referenzspannungen verglichen. Wenn die Referenzspannung kleiner als die Analogspannung ist, liefert der jeweilige Komparator den Wert 1. Jeder Wert eines Komparators entspricht einer Stelle der digitalen Zahl im Dualsystem. Die Genauigkeit der Wandlung hängt von den Schalttoleranzen der Komparatoren und der Genauigkeit der Referenzspannungen ab. Nach der Wandlung werden beide Bildhälften auf zwei Kanälen parallel zum Rechner übertragen. Die parallele Art der Verarbeitung ermöglicht bei einer maximalen Ausgabedatenrate von 25 *MHz* eine Bildwiederholungsrate von 40 *Hz* im Vollbildmodus.

# 3.2 Fehlereinflüsse

In diesem Abschnitt werden die an der Kamera auftretenden Fehler systematisch dargestellt. Dazu wird das System, wie in der Videometrie üblich, bezüglich des geometrischen, radiometrischen und des systemtheoretischen Modells untersucht. Das geometrische Modell (Abschnitt 3.2.1) beschreibt den Ort auf dem Sensor, auf den ein Punkt im Raum durch das Objektiv abgebildet wird. Die Radiometrie (Abschnitt 3.2.3) umfaßt diejenigen Faktoren, die die Lichtempfindlichkeit des Systems und damit den Inhalt des Ortes auf dem Sensor bestimmen. Zwischen diesen beiden Modellen liegt die Systemtheorie (Abschnitt 3.2.2), die die Form des Signals auf dem Sensor darstellt. Unter der Bezeichnung Überstrahlung und Rauschen (Abschnitt 3.2.4 bzw. Abschnitt 3.2.5) sind weitere Themen zusammengefaßt, die sich keinem der drei Modelle eindeutig zuordnen lassen.

# 3.2.1 Geometrie

Das geometrische Modell hängt in erster Linie von der Projektionsbeziehung zwischen Objekt- und Bildraum durch das Objektiv ab, die numerisch durch Abbildungsparameter ausgedrückt wird. Eine Auswertung der Bilder ist erst möglich, wenn die Parameter oder die Beträge, bis zu denen sie vernachlässigt werden können, bekannt sind. Das Objektiv beeinflußt die Abbildung durch konvex- oder konkavförmige Verzeichnung gerader Linien über den gesamten Bildbereich des Sensors, aufgrund ungleichmäßiger Brechungseigenschaften der Objektivlinsen. Dabei wird für die Geometrie des Sensors hinsichtlich jedes Pixels und der Pixel untereinander eine orthogonale Struktur angenommen. Eine Abweichung davon ist theoretisch durch den Herstellungsprozeß oder durch Temperaturausdehnungen möglich. Bedingt durch elektrische Potentialschwankungen können unterschiedliche Zeilen- und Pixelfrequenzen, die beim Auslesen des Sensors und bei der Analog/Digital-Wandlung für die rechnergestützte Weiterverarbeitung verwendet werden, zu einer Verschiebung der Bildinformation in Zeilenrichtung führen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Eine Beschreibung des Analogsignals streng nach der CCIR-Fernsehnorm findet sich in [MÄUSL 1991].

### Projektionsbeziehung zwischen Objekt- und Bildraum

Der räumliche Zusammenhang zwischen dem Objektraum und dessen zentralperspektivem Abbild auf dem Sensor, d.h. dem Bildraum, kann mittels einer Transformation beschrieben werden. Die dafür notwendigen Parameter werden im klassischen Ansatz der Photogrammetrie in Parameter der inneren und der äußeren Orientierung unterteilt. Mit der äußeren Orientierung wird die Position und Ausrichtung der Kamera gegenüber dem Objekt in Form des Verhältnisses der Koordinatensysteme von Sensor und Objekt erfaßt. Sie wird meist durch die Objektkoordinaten  $X'_0, Y'_0$  und  $Z'_0$  des Projektionszentrums, sowie den drei Winkeln der Primär- $\omega'$ , Sekundär- $\varphi'$  und Tertiärdrehung  $\kappa'$  der Kamera ausgedrückt (siehe auch Abbildung 3.5). Die Primärdrehung entspricht im vorliegenden Fall einer Blickrichtung der Kamera von oben oder unten auf eine vertikal stehende Teilung, die Sekundärdrehung entsprechend von links oder rechts und die Tertiärdrehung einer Verkantung um die Normale des Sensors. Zusammengefaßt in einer Rotationsmatrix R, werden die Koordinatensysteme von Sensor und Objekt durch die Drehwinkel parallel zueinander ausgerichtet.



Abb. 3.5: Projektionsbeziehung

Die innere Orientierung beschreibt die Kamera mit Hilfe der Lage des Hauptpunktes  $H'(x'_0, y'_0)$  und der Kammerkonstante c'. Die allgemeinen Abbildungsgleichungen für die zentralprojektive Abbildung vom Objektraum in den Bildraum lauten:

$$\begin{aligned} x' &= x'_{0} - c' \frac{(X - X'_{0})r'_{11} + (Y - Y'_{0})r'_{21} + (Z - Z'_{0})r'_{31}}{(X - X'_{0})r'_{13} + (Y - Y'_{0})r'_{23} + (Z - Z'_{0})r'_{33}} \\ y' &= y'_{0} - c' \frac{(X - X'_{0})r'_{12} + (Y - Y'_{0})r'_{22} + (Z - Z'_{0})r'_{32}}{(X - X'_{0})r'_{13} + (Y - Y'_{0})r'_{23} + (Z - Z'_{0})r'_{33}} \end{aligned}$$

$$(3.2)$$

mit den Koordinaten eines Bildpunktes x', y' und den dazugehörigen Objektkoordinaten X, Y und Z. Die Koeffizienten  $r_{ij}$  sind Elemente einer Rotationsmatrix R und lauten mit den Winkeln im einzelnen

$$\begin{array}{rcl} r_{11}' &=& \cos \varphi' \cos \kappa' \\ r_{12}' &=& -\cos \varphi' \sin \kappa' \\ r_{13}' &=& \sin \varphi' \\ r_{21}' &=& \sin \omega' \sin \varphi' \cos \kappa' + \cos \omega' \sin \kappa' \\ r_{22}' &=& -\sin \omega' \sin \varphi' \sin \kappa' + \cos \omega' \cos \kappa' \\ r_{23}' &=& -\sin \omega' \cos \varphi' \\ r_{31}' &=& -\cos \omega' \sin \varphi' \cos \kappa' + \sin \omega' \sin \kappa' \\ r_{32}' &=& \cos \omega' \sin \varphi' \sin \kappa' + \sin \omega' \sin \kappa' \\ r_{33}' &=& \cos \omega' \cos \varphi' \end{array}$$

Zur Bestimmung der Parameter der Orientierung werden mehrere koordinatenmäßig bekannte Punkte aufgenommen und im Bild ausgemessen. Das sich aus Gleichung (3.2) ergebende, meist überbestimmte nichtlineare Gleichungssystem wird iterativ nach der Methode der kleinsten Quadrate [vv] = Min (Gauß-Markov-Modell) ausgeglichen. Sind von einem Objekt mehrere Aufnahmen von verschiedenen Standpunkten aus vorhanden, so lassen sich die Bilder über identische Punkte relativ zueinander durch eine sogenannte "Bündelausgleichung" miteinander verknüpfen. Zusammen mit der Zuordnung zum Objektkoordinatensystem ergibt sich die sogenannte "Bündelblockausgleichung". Übersichten zu zahlreichen weiteren Lösungsansätzen zur Bestimmung der Orientierung finden sich in [GERDES et al. 1993a, MELEN u. BALCHEN 1994, WESTER-EBBINGHAUS 1987].

Das bisher beschriebene geometrische Modell läßt sich im vorliegenden Fall aufgrund einiger Besonderheiten stark vereinfachen. Die von der zweidimensionalen (2D) Strichteilung aufgenommenen Bilder werden nicht als Bündelblockverband aufgefaßt, sondern unabhängig voneinander über die *gleichzeitig* gemessenen Längenänderungen des Interferometers, *bezogen* auf die willkürlich gewählte Laserposition zum Zeitpunkt des ersten Bildes, mit dem Objekt in Bezug gesetzt. Zur Angabe der Lage einer Strichkante im Sensorbild wird durch die von einem Filteroperator detektierten Kantenpixel zunächst eine ausgleichende Gerade der Form y = ax + b gelegt. Dabei liegt der Ursprung des Koordinatensystems in der Mitte des Sensors, dessen Spalten- bzw. Zeilenrichtung der x- bzw. y-Achse entsprechen. Die Sensorebene ist näherungsweise parallel zur Ebene der Strichteilung ausgerichtet, mit der x-Achse in Richtung der Längsachse der Strichteilung. Das gesuchte Maß ist dann der kürzeste Abstand d zwischen der Geraden und dem Ursprung des Sensorkoordinatensystems:

$$d = b \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}$$
 (3.3)

Das Maß ist invariant bezüglich der Kantung  $\kappa'$  zwischen Sensor und Teilung. Streng genommen wird bei dieser Meßanordnung das Abbésche Komparatorprinzip verletzt, weil Maß und Prüfling nicht notwendigerweise genau in einer Flucht liegen. Allerdings besteht zwischen dem Sensor und der Teilungsachse während der Messung ein als konstant anzunehmender Zusammenhang, so daß diese Fehlerquelle vernachlässigbar ist.

Das relative Pixelmaß d in Richtung bzw. parallel zur Längsachse der Strichteilung muß in das metrische System des Laserinterferometers transformiert werden, um mit diesem zusammen ein absolutes Maß im Objektkoordinatensystem berechnen zu können. Der notwendige Abbildungsmaßstab ließe sich durch das in [SCHMID 1995, TAKALO 1997] beschriebene Verfahren bestimmen. Dazu wird eine Kante mit i Verschiebungsschritten in Richtung der Teilungsachse am Sensor vorbei bewegt und zu jeder der i Aufnahmen die meteorologisch reduzierte Ablesung des Laserinterferometers  $s_i$  aufgezeichnet. Nach Ermittlung der  $d_i$  und der Reduktion der Laserwerte auf die Ablesung beim ersten Bild  $s_0$ , wird durch die Wertepaare  $(s_{red,i}, d_i)$ eine ausgleichende Gerade gelegt, deren Steigung dem gesuchten Maßstabsfaktor entspricht. Dieses Verfahren bezeichnet [SCHMIDT 1993] in leicht modifizierter Form als "Kalibrierung über einen Kalibrierfaktor", das nur bei näherungsweise verzeichnungsfreien Objektiven und Parallelität zwischen Objekt- und Sensorebene zulässig ist. Wie noch gezeigt wird, ist diese Voraussetzung für die Verzeichnung hier erfüllt. Eine durch die Primär- oder Sekundärdrehung verursachte Nichtparallelität zwischen der Sensor- und der Objektebene führt zu einem uneinheitlichen Bildmaßstab. Dieser Effekt läßt sich durch Verwendung eines telezentrischen Objektivs vermeiden, das durch die Anordnung der Blende in der bildseitigen Brennebene und gleichzeitig kleiner Blendenöffnung nur achsparallele Strahlen mit kleinem Zerstreuungskreis abbildet. Dadurch bleibt der Abbildungsmaßstab theoretisch über einen unendlichen großen Bereich konstant [SCHMIDT 1993, SCHUHMANN u. THÖNIB 1998]. Im weiteren wird gezeigt, daß die erforderliche Genauigkeit auch mit einem "zentralperspektiven" Objektiv ohne Problem erreicht werden kann.

Konkret wurde ein Macro-Objektiv der Firma RODENSTOCK, Modell MACRO-CCD-VARIO-LENS  $0, 8 \times -4 \times$ verwendet. Dieses Objektiv ist bei variabler Brennweite stufenlos auf Vergrößerungen zwischen  $0, 8 \times$  und  $4 \times$  bei annähernd konstantem Arbeitsabstand von  $98 mm \pm 4 mm$  einstellbar<sup>2</sup>. Für die Forderung nach Parallelität erfolgt an dieser Stelle eine Abschätzung. Dazu werden die Gleichungen (3.2) nach der Primärbzw. Sekundärdrehung abgeleitet. Die Differentialquotienten lauten [EBNER 1998]:

$$\begin{array}{ll} \frac{\partial x'}{\partial \omega'} &= & \left(y'-y'_0\right) \sin \varphi' - \cos \varphi' \left(c' \sin \kappa' + \frac{x'-x'_0}{c'} \left(\left(x'-x'_0\right) \sin \kappa' + \left(y'-y'_0\right) \cos \kappa'\right)\right) \\ \frac{\partial x'}{\partial \varphi'} &= & c' \cos \kappa' + \frac{x'-x'_0}{c'} \left(\left(x'-x'_0\right) \cos \kappa' - \left(y'-y'_0\right) \sin \kappa'\right) \\ \frac{\partial y'}{\partial \omega'} &= & -\left(x'-x'_0\right) \sin \varphi' - \cos \varphi' \left(c' \cos \kappa' + \frac{y'-y'_0}{c'} \left(\left(x'-x'_0\right) \sin \kappa' + \left(y'-y'_0\right) \cos \kappa'\right)\right) \\ \frac{\partial y'}{\partial \varphi'} &= & -c' \sin \kappa' + \frac{y'-y'_0}{c'} \left(\left(x'-x'_0\right) \cos \kappa' - \left(y'-y'_0\right) \sin \kappa'\right) \end{array}$$

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Alle Beobachtungen erfolgten bei maximaler Öffnung der stufenlosen Blende.

Für den Fall  $x_0' = y_0' = 0$  und  $\omega' = \varphi' = \kappa' = 0$  folgt daraus

$$\frac{\partial x'}{\partial \omega'} = -\frac{y'x'}{c'} \qquad (3.4) \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial \omega'} = -c'\left(1 + \frac{y'^2}{c'^2}\right) \qquad (3.6)$$
$$\frac{\partial x'}{\partial \varphi'} = -c'\left(1 + \frac{x'^2}{c'^2}\right) \qquad (3.5) \qquad \qquad \frac{\partial y'}{\partial \varphi'} = -\frac{y'x'}{c'} \qquad (3.7)$$

Abbildung (3.6) zeigt die prinzipiellen Wirkungsfiguren der Orientierungsänderungen. Strenggenommen sind die Vektorbilder für  $d\omega'$  und  $d\varphi'$  in der x- bzw. y-Richtung konvex verformt. Weil aber die jeweils andere Komponente im Vergleich dazu wesentlich stärker ins Gewicht fällt, wird der Verlauf zwischen den Bildrändern in dieser Richtung als gerade angenommen.



Abb. 3.6: Wirkungsfiguren

Beim Zusammenbau der Kamera wurden die Einzelkomponenten vom Hersteller zueinander justiert und das Kameragehäuse anschließend versiegelt. Daher wird im weiteren angenommen, daß das Kameragehäuse streng einem Quader entspricht, die Sensorebene parallel zum Kameragehäuse ausgerichtet ist und die Achse des montierten Objektivs senkrecht auf dem Kameragehäuse und damit der Sensorebene steht. Eine Abschätzung soll Aufschluß darüber liefern, wie stark die Kamera geneigt sein darf, bis es bei einem strengen Abbildungsmaßstab von 1:1 zu einer vermeintlichen Lageverschiebung von  $ds = \pm 1 \, \mu m$  für ein Abbild der Kante am oberen oder unteren Rand relativ zur Mitte des Sensors kommt. Die Ausdehnung des 1024×1024 Pixel großen Sensors berechnet sich, bezogen auf die Mitte, bei einer Pixelgröße von 12×12  $\mu m^2$  im metrischen Maß zu  $x' = y' = 512 \cdot 12 \, \mu m = 6$ , 144 mm. Die Kammerkonstante c lautet bei einem Abbildungsverhältnis von ca. 1:1 mit Hilfe der Brennweite c = 2f, wobei f auch einem Viertel des Abstandes zwischen Objekt-und Bildebene entspricht. Durch praktische Messung ergibt sich  $c \simeq 186 \, mm$ .

Da für die Primärdrehung  $d\omega'$  nur die dy'-Komponente zur Lageverschiebung in y'-Richtung beiträgt, lautet die Differenz der differentiellen Verschiebung zwischen dem oberen Rand und der Mitte mit Gleichung (3.6):

$$ds = -c\left(1 + \frac{y_{512}'}{c^2}\right)d\omega' - \left(-c\left(1 + \frac{y_0'^2}{c^2}\right)d\omega'\right) \quad . \tag{3.8}$$

Umgestellt ergibt sich für die zulässige Primärverdrehung zusammen mit obigen Daten und einem angenommenen Längenmeßfehler von  $ds = 1 \ \mu m$ 

$$d\omega' = -\frac{c'}{y_{512}'^2} ds \simeq 0,314 \, gon \quad . \tag{3.9}$$

Umgerechnet in das im Maschinenbau verwendete relative Längenmaß bedeutet dies  $d\omega' \simeq \pm 0.31 gon \simeq \pm 4.9 \frac{mm}{m}$ . Durch sorgfältigen Aufbau des Gesamtsystems kann diese Genauigkeitsanforderung in der Feinwerktechnik erreicht werden.

Eine Sekundärdrehung  $d\varphi'$  bildet aufgrund der Fluchtpunktperspektive eine Kante schräg im Bild ab (dy'-Komponente) und führt zu einem Cosinus-Fehler der Lotlänge. Gleichzeitig wird die Kante durch die dx'-Komponente parallel aus der Sensormitte verschoben, wodurch das Lot zusätzlich verkürzt wird. Da es für kleine Neigungen aber immer relativ nahe an der vertikalen Mitte bleibt, ist der Einfluß der differentiellen dx'-Komponente zu vernachlässigen. Der Ansatz für die Längenänderung lautet

$$ds = y'_{512} - y'_{512} \cos\beta \quad , \tag{3.10}$$

wobei  $\beta$  dem eingeschlossenen Winkel zwischen der Spaltenrichtung des Sensors und dem Lot auf die "schräge" Kante entspricht. Unter Verwendung von Gleichung (3.7) ergibt sich daraus nach der Dreiecksauflösung zusammen mit obigen Werten

$$d\varphi' = \frac{c'}{y'_{512}} \sqrt{\frac{y'^2_{512}}{(y'_{512} - ds)^2} - 1} \simeq 34,776 \, gon \quad , \tag{3.11}$$

d.h. der Fehler der Sekundärdrehung  $d\varphi'$  ist auf jeden Fall zu vernachlässigen. Aufgrund dieser Ergebnisse läßt sich zusammenfassend sagen, daß eine gesonderte Kalibrierung zur Elimination eventueller Schiefstellungen der Kamera gegenüber der Teilung nicht notwendig ist.

#### Verzeichnung

Bei einem fehlerfreien Objektiv gilt bei schief einfallenden Strahlen für die Winkel zwischen den konjugierten Hauptstrahlen der Ein- bzw. Austrittspupille und der optischen Achse die Beziehung

$$\frac{\tan\tau}{\tan\tau'} = const. \tag{3.12}$$

Eine Abweichung davon wird als Verzeichnung bezeichnet, die meist rotationssymmetrisch zum Bildhauptpunkt  $H'(x'_0, y'_0)$  in radialer Richtung wirkt. Unvermeidliche Zentrierfehler des Objektivs bei der Herstellung führen jedoch zu einer Asymmetrie gegenüber H' [RüGER et al. 1987, LENHARDT 1997]. Daneben existiert eine tangentiale Komponente, die aber im allgemeinen eine Zehnerpotenz kleiner als die radiale und daher meist zu vernachlässigen ist. Die radiale Verzeichnung verursacht eine konvex- oder konkavförmige Abbildung einer geraden Kante der Strichteilung. Das hat zur Folge, daß die ausgleichende Gerade durch diese Kante einen Versatz gegenüber einer verzeichnungsfrei abgebildeten "geraden" Kante erfährt. Bei bekannter Verzeichnung kann die Bildgeometrie rechnerisch korrigiert werden. Die Bestimmung erfolgt im allgemeinen durch eine geometrische Kalibrierung oder aber auch bei der Bestimmung der Orientierung durch die Einführung zusätzlicher Gleichungen. Dazu bieten sich trigonometrische Ansätze oder ausgleichungstechnisch leichter zu handhabende Potenzreihen an. [LENZ 1988] berichtet für Potenzreihen, daß eine Modellierung mit Termen bis dritter Ordnung völlig ausreicht und sich darüberhinaus keine nennenswerte Genauigkeitsverbesserung ergibt, sondern vielmehr eine "Übermodellierung" in instabilen Koeffizienten resultiert.

#### Sensorgeometrie

Die Angabe von Koordinaten oder daraus abgeleiteten Maßen in der Größeneinheit [Pixel] setzt implizit voraus, daß sowohl jedes Pixel für sich, als auch die Pixel zueinander orthogonal sind. Abweichungen von dieser orthogonalen Struktur können theoretisch sowohl lokal als auch global vorhanden sein. Der Fehler ist vergleichbar mit einem Filmverzug in der konventionellen Photogrammetrie. Eine fehlerfreie Zuordnung zwischen dem Objektraum und seinem Abbild ist nur durch eine entsprechende Transformation zu erreichen. Die notwendigen Parameter könnten durch eine aufwendige Kalibrierung des Sensors von Seiten des Herstellers oder durch Anwendung der einfacher zu handhabenden RESEAU-Technik zur Verfügung gestellt werden. Letzteres ist in der hochpräzisen digitalen Bildmeßtechnik, wenn auch aus anderen Gründen, weit verbreitet [WESTER-EBBINGHAUS 1987, LUHMANN 1988, UFFENKAMP 1995]. Untersuchungen durch [LENZ 1989] zeigen jedoch, daß der Prozeß zur Herstellung von Sensoren geometrisch ausgezeichnet beherrscht wird. So konnten mit Hilfe von Moıré-Mustern, was eine Meßgenauigkeit von  $\frac{1}{100}$  der Pixelgröße ermöglichte, bei einem IT-Sensor noch keine signifikanten Abweichungen von der idealen rechtwinkligen Struktur festgestellt werden. Dies gilt auch nach Ausdehnung des Sensors bei verschiedenen Temperaturen. Da die Produktion im Zuge fortschreitender Miniaturisierung immer größere Anforderungen an die Geometrie der Halbleiterstrukturen stellt, ist in Zukunft eher mit einer noch höheren Genauigkeit zu rechnen. Ein Fehler in der Geometrie des Sensors kann daher vernachlässigt werden.

#### Frequenzunterschiede

Zur rechentechnischen Weiterverarbeitung wird das nach dem Auslesen der Ladung (siehe Abschnitt 3.1.4) vorliegende analoge Signal durch einen Frame-Grabber im Rechner in digitale Form umgewandelt. Der Frame-Grabber besteht aus einem Pufferspeicher und dem A/D-Wandler. Die Synchronimpulse für Zeile und Bild werden nach der Abspaltung vom Analogsignal durch Vergleich mit einem konstanten Bezugspotential detektiert. Gleichzeitig mit dem Zeilensynchronsignal wird für jede Zeile die A/D-Wandlung gestartet. Unterliegt das Bezugspotential oder das Synchronsignal einer Potentialänderung, wird der Zeilenbeginn zu früh oder zu spät erkannt. Alle nachfolgenden Signale unterliegen bis zum nächsten Synchronimpuls systematisch demselben zeitlichen Versatz, dem sogenannten "Jitter". Die Größe dieses Fehlers beträgt bis zu  $\pm \frac{1}{2n}$  Pixel,

wobei *n* sich meistens im Bereich zwischen 4 und 16 bewegt [LENZ 1988]. Der resultierende sägezahnförmige Verlauf des Versatzes ist eine Funktion der Zeilennummer [BEYER 1987] und wird auch von der Temperatur beeinflußt [DÄHLER 1988].

Zusätzlich zum Jitter entsteht innerhalb jeder Zeile ein Maßstabsfehler, wenn eine konstante Differenz zwischen dem Takt  $f_S$ , mit dem der Sensor ausgelesen wurde und dem der A/D-Wandlung  $f_W$  vorliegt. Daher ist strenggenommen zwischen Sensorelementen (Sels) und Bildelementen (Picture-Elements, Pels) zu unterscheiden [LENZ 1988]. Der Fehler läßt sich bei bekanntem Rasterabstand s der Sels durch einen Skalierungsfaktor p nach

$$p = \frac{f_S}{f_W} \cdot s \tag{3.13}$$

bei der geometrischen Kalibrierung berücksichtigen. Problematischer ist dagegen die Tatsache, daß die beiden Takte innerhalb einer Zeile relativ frei zueinander laufen. Für eine pixelsynchrone A/D-Wandlung sind daher Kamera und Grabber, soweit möglich, über entsprechende Anschlußbuchsen zu synchronisieren.

Die geschilderte Problematik ist für den Einsatz von analogen Kameras in der Bildmeßtechnik von großer Bedeutung und war bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [LUHMANN u. WESTER-EBBINGHAUS 1987, LENZ 1988, DÄHLER 1988, BEYER 1992, RENYAN 1993, SCHIRMER 1994]. Bei Verwendung einer digitalen Kamera werden alle Fehlerquellen vermieden. In diesem Fall wird das Analog-Signal noch vor der elektrischen Filterung mit dem Takt der Kamera (Master-Clock) A/D gewandelt und in dieser Form an den Kameraausgang gelegt.

## 3.2.2 Lineare Systemtheorie

Das bei einer Bildaufnahme verwendete Objektiv verändert nicht nur, wie bereits gezeigt, den Ort eines Signals auf dem Sensor, sondern, durch Linsenfehler und die Effekte Tiefenschärfe und Beugung, die Auflösung und damit auch die Form des Signals. Der Verlust von Ladung beim Transfer in den CCD-Elementen des Sensors hängt neben der Taktfrequenz und der Elektrodengröße auch von der Transferanzahl ab, ist damit also ortsabhängig und gehört eigentlich in den Bereich der Radiometrie. Aufgrund der sich sehr langsam mit dem Ort verändernden Signale ist nach [LENZ 1988] eine lokale Beschreibung mit linearer Systemtheorie aber zulässig. Eine weitere Verminderung der Auflösung findet bei der geometrische Filterung, d.h. Diskretisierung des kontinuierlichen Objektsignals durch das Pixelraster des Sensors und bei der elektronischen Tiefpaßfilterung zur Minderung der Rauschanteile des ausgelesenen Sensorsignals statt.

#### Tiefenschärfe, Beugung und Linsenfehler

Im Idealfall schneiden sich die von einem Objektpunkt im Abstand g von der Linsenebene ausgehenden wirksamen Strahlen in der im Abstand b zur Linsenebene befindlichen Bildebene und genügen damit der Linsengleichung  $\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$ . Bei einer Verschiebung des Objektes oder der Bildebene parallel zur optischen Achse entstehen durch die noch konvergierenden bzw. bereits divergierenden Strahlen in der Bildebene unscharfe Zerstreuungskreise (Defokussierung). Die Tiefenschärfe T ist derjenige Bereich, in dem die Unschärfekreise so klein sind, daß sie nicht aufgelöst werden können. Dementsprechend wird zwischen objekt- und bildseitigem Tiefenschärfenbereich unterschieden. Bei einem System mit fester Brennweite und Bildebene ist allerdings nur der objektseitige von Bedeutung. Durch eine Verkleinerung der Blende wird der Bereich der wirksamen Abbildungsstrahlen und damit auch der Durchmesser der Unschärfekreise verkleinert und der Tiefenschärfenbereich vergrößert. RODENSTOCK gibt für das verwendete Objektiv als maximalen Bereich  $T = \pm 0, 4 mm$ an. Im vorliegenden Fall wird dieser Wert mit einer gemessenen Änderung des Abstandes zwischen Teilung und Objektiv von  $\pm 0, 1 mm$  eingehalten.

Jeder optischen Abbildung ist das Phänomen der Beugung überlagert, das sich aus dem HUYGENSSchen Prinzip ableitet. Demzufolge wird jeder von einer Wellenbewegung erfaßte Punkt eines Mediums selbst zum Ausgangspunkt einer neuen sogenannten "Elementarwelle". In einem Objektiv erfolgt die Beugung an den Rändern von Blende und Linsenfassungen. Die entstehenden Wellen interferieren derart, daß für ein punktförmiges Objekt auf der optischen Achse ein von mehreren konzentrischen Kreisringen umgebenes Unschärfescheibchen (AIRY-Scheibchen) entsteht. Weil auf die Fläche des Scheibchens 85% der Strahlung entfällt, werden die äußeren Ringe vernachlässigt [LENHARDT 1997]. Außeraxiale Punkte erzeugen Ellipsen, die umso mehr von der Kreisform abweichen, je weiter sie von der Achse entfernt sind. Diese Tatsache ist allerdings für die meisten Anwendungen nur bei Weitwinkelobjektiven zu berücksichtigen. Der Durchmesser des Unschärfescheib<br/>chens ergibt sich mit Hilfe der Wellenlänge $\lambda$ und der effektiven Blendenzahl<br/>  $k_e$ nach

$$d = 2,44 \cdot \lambda \cdot k_e \quad . \tag{3.14}$$

Dabei folgt die effektive Blendenzahl bei einem Abbildungsmaßstab von 1:1 aus der Blendenzahl k nach  $k_e = 2k$ . Für  $\lambda = 550 nm$  und k = 6 ergibt sich  $d \approx 16 \mu m$ . Daher deckt eine Kante einen Bereich von zwei Pixeln (12  $\mu m$  Kantenlänge) ab, die eine Interpolation der Kantenposition mit Sub-Pixel-Genauigkeit erst ermöglicht. Bei konstanter Beleuchtung wächst die Beugung mit größer werdender Blendenzahl und das Grauwertprofil einer Kante wird wegen der abnehmenden Strahlungsintensität pro Flächeneinheit immer stärker geglättet, d.h. immer flacher abgebildet [LENHARDT 1997].

Aus der Beugung wird das maximale Auflösungsvermögen abgeleitet. Es ist als der kleinste Abstand definiert, den zwei Objektpunkte haben dürfen, damit die beiden Beugungsbilder noch voneinander unterschieden werden können. Dieser Wert hängt zusätzlich noch von der Qualität der Optik ab, die durch die Linsenfehler bestimmt wird. Zu den Linsenfehlern, die die Form und nicht den Ort des Signals beeinflussen, zählen sphärische und chromatische Aberration, Bildfeldwölbung, Astigmatismus und Koma. Generell nimmt das Auflösungsvermögen von der Bildmitte zum Rand hin ab und wird wie bei der Verzeichnung in eine radiale und eine tangentiale Komponente aufgeteilt. Die Güte der in Einzelanfertigung hergestellten MACRO-VARIO-Objektive ist sehr gut: RODENSTOCK gibt als mittleres Auflösungsvermögen am Objekt 17  $\mu m$  an. Dieser Wert entspricht dem Einfluß der Beugung, d.h. die Linsenfehler sind zu vernachlässigen.

Maßgeblich für den Schärfeneindruck ist jedoch nicht das Auflösungsvermögen, sondern eine möglichst hohe Kontrastwiedergabe über den gesamten Ortsfrequenzbereich. Als Maß dafür dient die Modulations-Transfer-Funktion (MTF), die das Verhältnis zwischen Objekt- und Bildkontrast in Abhängigkeit von der Frequenz im Ortsraum wiedergibt. MTF-Kurven werden z.B. für einzelne Punkte oder für ausgewählte Ortsfrequenzen über die Bildhöhe, ausgehend von der Bildmitte, dargestellt. Für das verwendete Objektiv konnten bei RODENSTOCK keine MTF-Daten in Erfahrung gebracht werden. Im konkreten Fall ist ohnehin nur die Komponente in Richtung der Sensorspalten relevant, weil die Kanten der Strichteilung in grober Näherung parallel zur Zeilenrichtung ausgerichtet sind und es keine Rolle spielt, wo auf der Kante beobachtet wird. Die von Defokussierung, Beugung und Linsenfehler erzeugten Unschärfen in der Abbildung können ebenso wie die Bewegungsunschärfe während einer dynamischen Messung als Teil der für einen Kantenfilter zur Eliminierung von verschiedenen Arten von Rauschen notwendigen Glättung angesehen werden (siehe Abschnitt 4.1).

## Ladungstransferverluste

Das Auslesen eines CCD-Sensors stellt hohe Anforderungen an die Ansteuerung der Kondensatoren. Einerseits ist die Verschiebung der einzelnen Ladungspakete nur in endlicher Zeit von einem Pixel zum nächsten möglich. Die Taktung der einzelnen Elektroden muß zu diesem Zweck exakt aufeinander abgestimmt sein (siehe Abschnitt 3.1.2). Ein Potential darf aber auch nicht zu schnell abgebaut werden, weil die Ladung sonst durch den "Schwung" über etwaige Potentialsperren hinweg diffundieren kann. Schließlich müssen die Potentiale groß genug sein, um die Ladung vollständig aufnehmen zu können. Je tiefer das Potential unter der Elektrode in das Halbleitermaterial hineinreicht, desto länger dauert es, bis es vollständig abgebaut ist. Bildlich ausgedrückt steigt der Boden des Potentialtopfs dabei von unten nach oben, wenn die Elektrodenspannung zurückgenommen wird. Demzufolge werden die Elektronen, die sich am nächsten zur Elektrode befinden, als letzte übertragen. Sie verhalten sich träge und können von der Elektrode "festgehalten" werden, weshalb dieser Effekt auch als Trapping bezeichnet wird. Er ist bei der SC-Bauweise (siehe Abschnitt 3.1.1) an der horizontalen Grenze zwischen Halbleiter und Isolator vor allem bei Taktfrequenzen von mehr als 20 MHz zu beobachten. Als Gegenmaßnahme erhält jeder Potentialtopf eine gewisse standardmäßige Grundfüllung (Fat-Zero), so daß der durch Lichteinfall erzeugte Ladungszugewinn auf jeden Fall übertragen wird. Bei der BC-Bauweise ist das Trapping hingegen zu vernachlässigen, weil sich das Potential nicht direkt unter der Elektrode befindet, sondern sich über einen größeren vertikalen Bereich in der darunterliegenden Grenzschicht zwischen n- und p-Halberleiter erstreckt. Der Trapping-Fehler führt zu einer Verschmierung des Signals und hat eine direkte Auswirkung auf die Auflösung. Als Maßzahl dient die Charge-Transfer-Efficiency (CTE), die den Prozentsatz der in einem Takt verschobenen Ladungen bezogen auf die gesamte Ladungsmenge im Sensor wiedergibt. Sie hängt unmittelbar von der Taktfrequenz, der Transferanzahl und der Größe der Elektroden ab. Hersteller geben Werte von 99,9998% [PHOTOMETRICS 1989] und besser an. Nach [LENZ 1988] kann der Effekt bis zu  $1024 \times 1024$  Pixeln, also auch im vorliegenden Fall, praktisch vernachlässigt werden.

#### Geometrische und elektronische Filterung

Das Bild eines kontinuierliches Objekts wird bei der Abbildung auf den CCD-Sensor durch das Raster der Pixel abgetastet, d.h. diskretisiert. Dies entspricht einer geometrischen Filterung analog zur Begrenzung der Auflösung durch das Objektiv und führt dann zu einem Verlust an Information, wenn das ursprüngliche Signal nicht wieder rekonstruiert werden kann. Voraussetzung für eine Rekonstruktion ist, daß die Frequenz der Abtastung, also die Größe und der Abstand der lichtempfindlichen Sensorelemente, das Nyquist-Theorem einhält. Dazu muß sie mindestens doppelt so groß wie die höchste im Objektraum vorkommende Frequenz sein, die für die Anwendung von Interesse ist. Alle Objektfrequenzen oberhalb der Abtastfrequenz unterliegen einer Unterabtastung, d.h. sie werden auf niedrigere Objektfrequenzen zurückgefaltet (Aliasing).

Eine elektronische Filterung tritt an mehreren Stellen im Kamerasystem auf. Am Ausgang des Ausleseregister wird das Sensorsignal durch eine Sample-Hold-Schaltung zu einem treppenförmigen Signal verbunden, das anschließend durch eine elektronische Tiefpaßfilterung geglättet wird. Dies dient dazu, alle Frequenzen oberhalb der NYQUIST-Frequenz zu filtern, weil dort durch elektronische Verstärkung ansonsten ein störender Rauschanteil am Signal entsteht.

## 3.2.3 Radiometrie

In der Radiometrie werden die lichtempfindlichen Eigenschaften des Kamerasystems beschrieben, die sich aus ortsabhängigen und ortsunabhängigen Phänomenen zusammensetzen. Zu den ortsabhängigen gehört neben einer ungleichmäßigen Beleuchtung auch die natürlich und mechanisch bedingte Vignettierung, die durch die Linsen bzw. Blenden des Objektivs zu einem Helligkeitsabfall im Bildraum führt. Als ortsunabhängig ist der Fehler bei der Quantisierung zu betrachten, bei der unter Umständen aufgrund fehlerhafter Referenzspannungen der Nullpunkt der Quantisierungsskala falsch festgelegt wird. Zusätzlich können die Nullpunkte von unterteilten Sensoren mit jeweils eigener Quantisierung Unterschiede aufweisen. Weil die Sensorempfindlichkeit einerseits das fertigungstechnisch bedingte unterschiedliche Ansprechverhalten einzelner Pixel, andererseits auch das generelle spektrale Verhalten des gesamten Sensors umfaßt, läßt sie sich sowohl als ortsabhängig als auch als ortsunabhängig bezeichnen. Nach [LENZ 1988] ist allen Phänomenen die Tatsache gemeinsam, daß es sich um lediglich die Signalamplitude beeinflussende Punktoperationen handelt. Im Gegensatz zu Flächenoperationen existiert keine gegenseitige Beeinflussung örtlich benachbarter Werte.

#### Beleuchtung

Durch die optimale Abstimmung der Beleuchtung auf das aufzunehmende Objekt lassen sich die Anforderungen an die anderen am Kamerasystem beteiligten Komponenten deutlich reduzieren. Dazu muß durch die Variation der Bestrahlungsstärke für eine ausreichende Signalhöhe gesorgt werden, die gleichzeitig bei optimalem Signal/Rausch-Verhältnis homogen über das Objekt verteilt ist. Um den spektralen Empfindlichkeitsbereich des Sensors zwischen 500 und 700 nm auszunutzen, wird Halogenlicht verwendet, das diesen Bereich kontinuierlich abdeckt. Die Strahlung der Lampe mit einer Leistung von 150 W wird über ein Glasfaserkabel als Kaltlicht nach außen geführt und endet in einem zum Objektiv konzentrisch angebrachten Ringlicht. Die Verwendung der Glasfaser hat den Vorteil, daß keine Temperaturabstrahlung durch die Lampe in der Nähe des Prüflings, bzw. der Meßmittel stattfindet. Am Gehäuse läßt sich die Lichtintensität bei konstanter Farbtemperatur durch eine stufenlose mechanische Sichelblende manuell regeln. Weil eine objektive Einstellung der Intensität nicht möglich ist, wird als Kriterium die relative Einstellung bezogen auf den Sensor definiert. Der durch das Licht erzeugte mittlere Grauwert 255 (weiß) aller Pixel des gesamten Sensors entspricht 100% relativer Beleuchtungsintensität, der mittlere Grauwert 0 (schwarz) entspricht 0%. Die am Ringlicht austretende Strahlung hat die Form eines Kegels, der in Abhängigkeit vom Arbeitsabstand durch die ebene Strichteilung abgeschnitten wird. Dadurch entsteht ein zeitlich stabiler Lichtkreis dessen Intensität symmetrisch von innen nach außen abnimmt. Der hellste Bereich kann durch Exzentrizität und Verkippung des Ringlichts gegenüber der Achse des Objektivs aus der Bildmitte verschoben sein.

#### Vignettierung

Die Vignettierung eines Objektivs bewirkt, daß für ein gleichmäßig ausgeleuchtetes Objekt in der Bildebene die Helligkeit zum Rand hin abnimmt. Dabei ist zwischen natürlicher und mechanischer Vignettierung zu unterscheiden. Nach dem Gesetz von LAMBERT fällt bei der natürlichen Vignettierung die Helligkeit eines Bildes von der Mitte  $H_0$  in Abhängigkeit vom Bildwinkel w nach außen hin mit der vierten Potenz des Cosinus ab [Rüger et al. 1987]:

$$H = H_0 \cos^4 w \quad . \tag{3.15}$$

Dieser Effekt kann durch die Verzeichnung und unterschiedliche Größen der Eintrittspupille unter verschiedenen Bildwinkeln (Pupillen-Koma) verändert werden [LENHARDT 1997]. Bei der mechanischen Vignettierung werden die einfallenden Strahlenbündel zusätzlich an den Rändern der Linsenfassungen beschnitten. Durch Abblenden kann dies zu Lasten der einfallenden Lichtmenge verringert werden. An dieser Stelle ist anzumerken, daß Macro-Objektive, wie auch das verwendete, für die Verwendung bei maximal geöffneter Blende optimiert sind.

## ${\bf Sensorempfindlichkeit}$

Lichtempfindliche Sensorelemente weisen fertigungstechnisch bedingt bei gleichmäßiger Beleuchtung untereinander ein unterschiedliches Ansprechverhalten auf. Als Maßzahl für die Sensorempfindlichkeit wird der Quantenwirkungsgrad angegeben. Er ist definiert als das Verhältnis der Anzahl einfallender Photonen zur erzeugten Ladung und beträgt in der Regel zwischen 60 und 80%. Für die Bildmeßtechnik sollte zwischen der Bestrahlung und der Amplitude des Meßsignals ein linearer Zusammenhang bestehen, was durch den sogenannten "Gamma-Wert"  $\gamma = 1$  ausgedrückt wird. Manche Kameras bieten die Möglichkeit der Gamma-"Korrektur" über einen frei einstellbaren Fix-Wert. Dieser stammt noch aus der Zeit der Aufnahmeröhren, um das Bild bezogen auf die nichtlineare Empfindlichkeit des menschlichen Auges zu korrigieren. Andere Geräte passen sich durch Automatic-Gain-Control (AGC) dynamisch an die Beleuchtung an. Da dies später aber nicht reproduzierbar ist, wird eine radiometrische Korrektion zum Teil unmöglich gemacht, denn die lineare Umkehrung einer stark nichtlinearen "Korrektion" kann zu Artefakten im Bild führen. Bei der verwendeten Kamera ist jedoch keine Korrektur vorgesehen.

Neben der ortsabhängigen Empfindlichkeit und dem linearen Verhalten spielt auch die spektrale Empfindlichkeit der Sensorelemente eine Rolle. Die Polysilizium-Elektrode eines MOS-Kondensators ist zwar generell lichtdurchlässig, trotzdem werden aber vermehrt die Blauanteile des Lichts gefiltert, während Rotanteile fast ungehindert passieren. Zusätzliche Filter stellen das Schutzplättchen an der Sensoroberfläche und die Optik dar, die aber beide für Meßzwecke außerhalb des Infrarot-Bereichs zu vernachlässigen sind. Restreflektionen in der Optik können durch Vergütung, d.h. Bedampfung der Linsenoberflächen mit dünnen Schichten, vermindert werden.

# Quantisierung

Die Festlegung, welche Spannung bei der A/D-Wandlung dem kleinsten Digitalwert zuzuordnen ist, wird aus dem Spannungspegel optisch abgedeckter Referenzelemente abgeleitet, die zusätzlich auf dem Sensor angeordnet sind. Durch fehlerhaft eingestellte Referenzspannungen wird der Nullpunkt (Offset) der Skala falsch festgelegt. Die verwendete Kamera besteht aus zwei parallel nebeneinanderliegenden Sensoren, von denen jeder 20 Spalten am Außenrand des Akkumulations- und Ausleseregisters als eigene Referenz benutzt. Der Offset beider Sensorhälften kann deswegen unterschiedlich sein. Dieser Effekt konnte im Zusammenhang mit der Untersuchung des Schwarzrauschens (siehe Abschnitt 3.2.5) beobachtet werden. Er ist betragsmäßig kleiner als 0,1 Graustufen und daher vernachlässigbar. Das kontinuierliche Signal wird in Bezug auf diesen Nullpunkt meistens mit 8-Bit durch einen A/D-Wandler diskretisiert. Der Dezimalwert 0 entspricht danach Schwarz und 255 Weiß. Dabei entsteht ein Auflösungsfehler von  $2^{-8} = 0, 4\%$ , der nach [LENZ 1988] als Nichtlinearität jedoch vernachlässigbar ist. Er schlägt stattdessen vor, diesen Fehler, wenn unbedingt nötig, als ein dem Signal überlagertes Quantisierungsrauschen zu modellieren.

# 3.2.4 Überstrahlungseffekte

In diesem Abschnitt sind die Effekte Blooming, Smearing und Tailing zusammengefaßt, die in Abhängigkeit von der Lichtempfindlichkeit des Systems auf einer Überbelichtung des Sensors basieren. Dadurch wird die Form des Signals auf dem Sensor verändert, d.h. es sind sowohl Radiometrie als auch lineare Systemtheorie betroffen. Da die lineare Systemtheorie aber zwischen der Geometrie und der Radiometrie steht, lassen sich die Effekte keinem der drei Modelle eindeutig zuordnen.

# Blooming

Dies entsteht bei einer Überbelichtung des CCD-Sensors. Die erzeugte Ladungsmenge übersteigt dann das Speichervermögen der Potentialtöpfe im Akkumulationsregister und läuft in die noch nicht gefüllten umliegenden Akkumulationstöpfe über. Durch einen aufblühenden Punkt (Spot) wird lokal die Auflösung des Sensors vermindert. Zur Verhinderung dieses Effekts stehen passive und aktive Verfahren zur Verfügung. Als aktives Verfahren bietet sich einerseits der Einbau eines Antiblooming-Kondensators horizontal neben jedem Akkumulationskondensator an. Beide sind durch ein Control-Gate getrennt, mit dem das Antiblooming gesteuert werden kann. Die überschüssige Ladung fließt dann unter dem Gate hindurch und wird unter dem Antiblooming-Kondensator gesammelt. Diese Schaltung ist zwar regulierbar, hat allerdings eine niedrigere Auflösung zur Folge. Die zweite aktive Möglichkeit besteht im Einsatz eines mechanischen oder elektronischen Shutters, dessen Prinzip in Abschnitt 3.1.3 erläutert wird.

## Smearing

Smearing entsteht durch sehr helle Objekte beim Auslesen des Sensors. Die Ladungspakete unterliegen bei FT- und FF-Sensoren (siehe Abschnitt 3.1.3) während der Verschiebung durch die Sensorelemente in Richtung des Ausleseregisters weiterhin einer Belichtung. Erzeugt das aufgenommene Objekt helle Spots oder Flächen, entstehen helle Linien in der vertikalen Ausleserichtung, d.h. das Bild wird orts- und zeitabhängig verfälscht. Abhilfe bietet in diesem Fall nur der Einsatz eines mechanischen Shutters oder einer Stroboskop-Beleuchtung. Letzteres ist allerdings eine Frage der Aufnahmefrequenz und der Lichtintensität. IT-Sensoren verschieben die Ladung unmittelbar aus dem Akkumulationskondensator in die lichtgeschützten Transportkondensatoren und sind für dieses Phänomen unempfindlich.

## Tailing

Die Erscheinung des Tailing wurde zuerst von [DÄHLER 1987] beobachtet, als es bereits bei einer Belichtung, bei der noch kein Blooming vorhanden war, zu einer Verformung aufgenommener Ziele kam. Diese äußerte sich bei kreisförmigen retroreflektierenden Marken in Form eines kleinen Kometenschweifs. Die Ursache wird im Ausleseregister des CCD-Chips oder in der Elektronik vermutet.

## 3.2.5 Rauschen

Bei jeder Verarbeitung oder Übertragung von elektromagnetischen Signalen entstehen unkontrollierte Störungen, die das Signal überlagern und zusammenfassend als Rauschen bezeichnet werden [BLUM 1996]. Weil es an sich nicht zu beseitigen ist, wird versucht, zumindest die Auswirkungen durch die Verwendung geeigneter Bauelemente und Schaltungen zu beeinflussen. Das Signal/Rausch-Verhältnis (Signal/Noise-Ratio, SNR) dient in diesem Zusammenhang als Maßzahl für die Rekonstruierbarkeit des Ausgangssignals. Trotz nachgewiesener Existenz sind die Ursachen der verschiedenen Rauschquellen nicht immer bekannt. Für die digitale Bildverarbeitung ist aber festzustellen, daß kein Sensor in Bezug auf seinen Typ oder seine Architektur einen eindeutigen Vorteil bietet [Collet et al. 1986]. Verschiedene Rauschquellen können zu gleichartigen Auswirkungen führen. Unter dem Begriff Schrot-Rauschen (Shot-Noise) sind beispielsweise alle Schwankungen der zum Strom beitragenden Ladungsträgerdichte zusammengefaßt. Im folgenden wird das Rauschen soweit möglich in der Reihenfolge des Auftretens im Kamerasystem behandelt.

#### Photonenrauschen

Dieses Rauschen wird auch als optisches oder Quanten-Rauschen bezeichnet. Es entsteht durch zufallsverteilte räumliche und spektrale Schwankungen der Photonen und schlägt sich letztendlich im Rauschen der Grauwerte nieder. Zur Verbesserung des SNR bietet sich entweder eine Verlängerung der Belichtungszeit oder eine Vergrößerung der lichtempfindlichen Fläche bei gleichzeitigem Auflösungsverlust an. Einige Sensoren besitzen die Möglichkeit, mehrere nebeneinanderliegende Pixel horizontal und vertikal elektrisch zusammenzuschalten (Binning). Im allgemeinen spielt das Photonenrauschen aber nur bei Aufnahmesituationen mit schwachem Licht, z.B. bei Himmelsbeobachtungen, eine Rolle und ist damit für die anvisierte Anwendung zu vernachlässigen.

#### ${\bf Schwarzrauschen}$

Die Erzeugung freier Ladungsträger in einem Halbleiter erfolgt unabhängig von der Art der zugeführten Energie (siehe Abschnitt 3.1.1). Freie Ladungsträger werden daher auch bei völliger Abdeckung des Sensors gegen äußere Beleuchtung durch thermische Effekte erzeugt. Dieses Schwarz- oder Dunkelstrom-Rauschen ist proportional zur Temperatur und zur Integrationszeit. So bewirkt eine Temperaturerhöhung um 8 bis  $10^{\circ}K$ eine Verdopplung des Schwarzrauschens [THOMSON 1995]. Neben diesem Effekt, der prinzipiell den ganzen Sensor gleichmäß betrifft, kann es zusätzlich noch zu einer ungleichmäßigen Verteilung (Fixed-Pattern) kommen. Diese hat ihre Ursache in der ungleichmäßigen Dotierung des Halbleitermaterials bei der Herstellung. Um das Dunkelstrom-Rauschen niedrig zu halten, muß bereits beim Produktionsprozeß auf die Auswahl der Materialien und die Reinheit der Halbleiterkristalle geachtet werden. Der Anwender kann später nur noch durch eine Kamerakühlung Einfluß nehmen. Für die angestrebte Anwendung ist das Schwarzrauschen zu vernachlässigen.

#### Einfangs-, Ladungstransfer-, Diffusions- und Durchsatzrauschen

Der Übergangsbereich unterschiedlicher Materialien im Halbleiter übt auf freie Ladungsträger eine Anziehungskraft durch elektromagnetische Wechselwirkung aus. Diese verursacht einen zufallsverteilten Ladungsverlust, der allgemein als Einfang-Rauschen (Trapping-Noise) bezeichnet wird. Derselbe zufallsverteilte Effekt tritt auch während des Transfers der angesammelten Ladung von einem Potentialtopf zum nächsten auf. Dieses Rauschen ist abhängig von der Anzahl der Transferschritte, die benötigt wird, um eine Ladung aus dem Akkumulationsbereich zum Auslesegate des Sensors zu verschieben. Es ist bei der BC-Bauweise deutlich geringer als bei der SC-Bauweise (siehe Abschnitt 3.1.1), weil weniger sogenannte "Haftstellen" vorhanden sind. Bei der Eingabe des Fat-Zero zur Verminderung des Fehlers in SC-CCD entsteht eine ungleichmäßige Füllung, das sogenannte "Diffusions-Rauschen". Darüberhinaus trägt jede Gate-Schaltung, die die Ladung beim Transport im Sensor passiert, zum Gesamtrauschen durch einen als Durchsatz-Rauschen bezeichneten Fehler bei.

#### Rauschen der Ausgangsstufe

Die Schaltung zum Auslesen der Ladung aus dem Sensor besteht aus einer Auslese-Diode mit entsprechender Verstärkungsschaltung und einer Reset-Diode (siehe Abschnitt 3.1.4). Beide tragen zum Rauschen der Ausgangsstufe bei. Das Verstärker-Rauschen hängt im wesentlichen von der Kapazität der Schaltung ab. Darüberhinaus besteht ein Zusammenhang zur Frequenzbandweite des Verstärkers, zur Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung, zum Eingangswiderstand und zur Temperatur. Durch Verwendung einer kleinen Kapazität kann das Rauschen so gering gehalten werden, daß es sich nur bei geringen Beleuchtungsstärken weit unterhalb der Sättigung auswirkt. Leider wird dieses Verhalten durch das  $\frac{1}{I}$ - oder auch Funkel-Rauschen kompensiert, daß sich reziprok zur räumlichen Größe des Verstärkers verhält. Obwohl nach [BLUM 1996] das Funkel-Rauschen seit über 60 Jahren bekannt ist, gibt es bis heute keine physikalische Theorie, die diese Erscheinung umfassend beschreiben kann. Es ist die in der Natur am häufigsten auftretende Rauscherscheinung, die im Bereich der Elektronik in allen Bauelementen auftritt. Der Name leitet sich von der erstmaligen Beobachtung eines Funkelns in Transistorröhren ab. Es führt zu zeitlichen Schwankungen eines Ausgangssignals.

Das Reset-Rauschen führt zu ebensolchen zeitlichen Signalschwankungen und tritt immer dann auf, wenn eine Kapazität auf eine Referenzspannung aufgeladen oder entladen wird. Daher ist es auch beim Betrieb eines elektronischen Shutters vorhanden. Die Ursache liegt in der thermischen Bewegung der Ladungsträger beim Öffnen oder Schließen der Verbindung zur Referenzspannung. Weil sich die in einem Kondensator enthaltene Ladung q in Abhängigkeit von der Temperatur T und der Eingangskapazität C nach  $q^2 = kTC$ mit k als BOLTZMANN-Konstante berechnet, wird das Rauschen auch als kTC-Rauschen bezeichnet wird.

Wegen der gemeinsamen Abhängigkeit von der Temperatur, werden beide Rauschquellen in der Literatur uneinheitlich gemeinsam oder einzeln als thermisches Rauschen bezeichnet. Durch sorgfältiges Design des Sensors, geeignete Materialauswahl und besondere Reinheit bei der Herstellung wird dieser Einfluß minimiert.

## ${f Quantisierungsrauschen}$

Bei der in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Umwandlung der Spannungen in Zahlenwerte, d.h. der Quantisierung, kann es zu Fehlern kommen, die nach [LENZ 1988] als Teilkomponente des Gesamtrauschens betrachtet werden können. Ähnlich wie dieses sogenannte "Quantisierungsrauschen" verhält sich auch das sogenannte "Clock-Noise", das am Sample-Hold-Ausgang des CCD entsteht und durch eine besondere Schaltungstechnik (Correlated Double Sampling) gut beherrschbar ist [PRICE u. PRZYBYLA 1988, PRZYBYLA 1989].
Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier
Geometrie			
Projektionsbeziehung	Zentralperspektive Abbil- dung des Objektraumes auf den Sensor durch das Objektiv mit unbekannten Parametern	Ermittlung der Parameter durch Kalibrierung z.B. über Paßpunkte; Verwendung eines telezentri- schen Objektivs für konstan- ten Abbildungsmaßstab	Ermittlung des als kon- stant angenommenen Ab- bildungsmaßstabes durch Kalibrierung z.B. nach [SCHMIDT 1993]; Bei sorgfältigem Systemauf- bau keine Bestimmung der Drehwinkel zwischen Sensor- und Objektkoordinatensy- stem notwendig
Verzeichnung	Konvex- oder konkavförmige Abbildung gerader Kanten über den gesamten Bildbe- reich aufgrund ungleichmäßi- ger Brechungseigenschaften der Objektivlinsen	Mathematische Modellierung zusammen mit der geome- trischen Kalibrierung durch Einführung zusätzlicher Glei- chungen	Vernachlässigt, da bei Über- prüfung definitiv nicht fest- stellbar
Sensorgeometrie	Lokale und globale Abwei- chung einzelner Pixel oder der Pixel untereinander von der orthogonalen Struktur, bedingt durch den Herstel- lungsprozeß oder aufgrund von Temperaturausdehnun- gen	Kalibrierung der Sensorgeo- metrie	Vernachlässigt aufgrund von Untersuchungsergebnissen Dritter
Frequenzunterschiede	Unterschiedliche Zeilen- und Pixelfrequenzen bei der A/D- Wandlung und dem Ausle- sen des Sensors aufgrund von elektrischen Potentialschwan- kungen	Analogkamera mit Frequenz- synchronisation; Digitalkamera verwendet prinzipiell nur eine einzige Frequenz	Verwendung einer Digitalka- mera
Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier
$Lineare \ System theorie$			
Tiefenschärfe	Bildbereich, in dem die Zer- streuungskreise der Objekt- strahlen trotz ihrer Konver- genz bzw. Divergenz entspre- chend der Linsengleichung nicht mehr vom Objektiv auf- gelöst werden können	Verkleinerung der Blende be- wirkt Vergrößerung des Tie- fenschärfenbereichs; Unschärfe in gewissem Um- fang zur Sub-Pixel-Interpo- lation im Bild notwendig	Abstand der Strichteilung va- riiert gegenüber dem Objek- tiv maximal in dem vom Hersteller angegebenen Tie- fenschärfenbereich; Wahl eines entsprechenden Kantenfilters bei der Auswer- tung des Bildes
Beugung	In das Objektiv einfallen- de Strahlen rufen an den Rändern der Blende und den Linsenfassungen Wellen her- vor, die sich von jedem Punkt aus konzentrisch ausbreiten und zu unscharfen Scheib- chen überlagern	Öffnung der Blende verklei- nert die Beugungsscheibchen; Unschärfe in gewissem Um- fang zur Sub-Pixel-Interpo- lation im Bild notwendig	Blende maximal geöffnet; Wahl eines entsprechenden Kantenfilters bei der Auswer- tung des Bildes
Linsenfehler	Beeinflußung des Auflösungs- vermögens durch sphärische und chromatische Aberation, Bildfeldwölbung, Astigmatis- mus und Koma der verwende- ten Linsen	Hohe Vergütung der Linsen; Unschärfe in gewissem Um- fang zur Sub-Pixel-Interpo- lation im Bild notwendig	Verwendung eines Spezialob- jektivs mit hoher Linsen- vergütung; Wahl eines entsprechenden Kantenfilters bei der Auswer- tung des Bildes
Ladungstransferverluste	Verminderung der Auflösung durch Anziehung von La- dungsträgern beim Transfer im Übergangsbereich unter- schiedlicher Sensormateriali- en aufgrund elektomagneti- scher Wechselwirkungen in Abhängigkeit von Taktfre- quenz, Transferanzahl und Elektrodengröße	Minimierung durch BC- Bauweise des Sensors oder durch Fat-Zero bei Sensoren in SC-Bauweise, so- wie entsprechende Wahl von Taktfrequenz, Transferanzahl und Elektrodengröße	Aufgrund von Untersu- chungsergebnissen Dritter vernachlässigbar bis zu ca. 1000 Transferschritten

# 3.2.6 Zusammenfassung der Fehlereinflüsse

Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier
Lineare Systemtheorie			
Geometrische Filterung	Verminderung der Auflösung aufgrund der Diskretisierung des kontinuierlichen Objekt- signals durch das Pixelraster des Sensors	Abstimmung des Abbil- dungsmaßstabs gemäß dem NYQUIST-Theorem	Angabe einer Kantenposition im Bild leitet sich aus der ge- samten Kante ab, die quer dazu immer systematisch von dem Effekt betroffen ist
Elektronische Filterung	Elektronische Tiefpaßfilte- rung des treppenförmigen Sensorsignals nach der Sample-Hold-Schaltung, um Rauschanteile zu mindern	Werkseinstellung der elektro- nischen Filterstärke so, daß die eigentlichen Signale noch eindeutig definiert bleiben	Keine weiteren Maßnahmen

Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier
Radiometrie			
Beleuchtung	Ungleichmäßige Ausleuch- tung schlägt sich entspre- chend in den Signalinten- sitäten nieder	Hellfeldbeleuchtung; Radiometrische Korrektur	Radiometrische Korrektur
Vignettierung	Natürlicher Helligkeitsabfall im Bild zum Rand hin, bei gleichmäßiger Ausleuchtung des Objektraumes und me- chanisch bedingt bei schief in das Objektiv einfallenden Strahlen sowie an der Objek- tivfassung	Minimierung der natürlichen Vignettierung durch hohe Vergütung der Linsen; Minimierung der mechani- schen Vignettierung durch Abblenden; Radiometrische Korrektur	Verwendung eines Spezialob- jektivs mit hoher Linsen- vergütung; Radiometrische Korrektur
Sensorempfindlichkeit	Fertigungstechnisch beding- tes unterschiedliches An- sprechverhalten der Sensor- elemente	Minimierung durch radiome- trische Korrektur	Radiometrische Korrektur
Quantisierung	Fehlerhafte Festlegung des Nullpunktes der Quantisie- rungsskala bei der A/D- Wandlung aufgrund fehler- hafter Referenzspannungen; Unterschiedliche Nullpunkte bei unterteilten Sensoren mit jeweils eigener Quantisierung	Radiometrische Korrektur	Radiometrische Korrektur; Nullpunktsunterschiede auf- grund von Untersuchungen vernachlässigbar

Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier
$\ddot{U} berstrahlungs effekte$			
Blooming	Verminderung der Auflösung bei Überbelichtung, verur- sacht durch überfließende er- zeugte Ladung aus bereits gefüllten benachbarten CCD- Elementen	Beseitigung der überfließen- den Ladung durch entspre- chende passiv oder aktiv wir- kende Sensorschaltungen; Elektronischer Shutter	Minimierung durch entspre- chende Einstellung der Be- leuchtungsintensität
Smearing	Überbelichtung während des Auslesens führt bei FT- oder FF-Sensoren führt zu hellen Streifen in Spaltenrichtung	IT-Sensor mit abgedeckten Transportelementen; Mechanischer Shutter; Stroboskop-Beleuchtung	Minimierung durch entspre- chende Einstellung der Be- leuchtungsintensität
Tailing	Scheinbare Zielverformung bereits bei geringer Beleuch- tungsintensität vermutlich im Ausleseregister oder durch die Elektronik erzeugt	Keine Maßnahmen bekannt	Nicht berücksichtigt

Fehler	Beschreibung	Maßnahmen allgemein	Maßnahmen hier	
Rauschen				
Photonenrauschen	Zufallsverteilte räumliche und spektrale Schwankungen des Photonenflußes	Verlängerung der Belich- tungszeit; Vergrößerung der lichtemp- findlichen Fläche	Nicht berücksichtigt, da nur bei schwach beleuchteten Szenen relevant	
Schwarzrauschen	Lokale und globale Erzeu- gung freier Ladungsträger im Sensor durch thermische Ef- fekte	Kamerakühlung	Kamerakühlung durch Mon- tage an einem temperaturlei- tendem Material und Einsatz eines Gebläses	
Einfangsrauschen	Anziehung freier Ladungs- träger im Übergangsbereich unterschiedlicher Sensorma- terialien durch elektromagne- tische Wechselwirkungen	Minimierung durch BC- Bauweise des Sensors; Grundfüllung bei Sensoren in SC-Bau- weise	Sensor in BC-Bauweise	
Ladungstransferrauschen	Anziehung von Ladungsträ- gern beim Transfer im Über- gangsbereich unterschiedli- cher Sensormaterialien auf- grund elektromagnetischer Wechselwirkungen	Minimierung durch BC-Bau- weise des Sensors oder durch Fat-Zero bei SC-Bauweise	Sensor in BC-Bauweise	
Diffusionsrauschen	Ungleichmäßige Füllung bei Sensoren in SC-Bauweise zur Minimierung des Einfangs- und Ladungstransferrau- schens	Keine Maßnahmen bekannt	Nicht berücksichtigt	
Durchsatzrauschen	Ungleichmäßiger Ladungs- transfer in den Gate-Be- reichen des Sensors	Keine Maßnahmen bekannt	Nicht berücksichtigt	
Verstärkerrauschen	Rauschen beim Verstärken der aus dem Sensor ausgelese- nen Ladung in Abhängigkeit von Schaltungskapazität, Frequenzbandweite, Diffe- renz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung, Eingangswiderstand und Temperatur	Minimierung durch Verwen- dung einer kleinen Kapazität	Keine weiteren Maßnahmen	
Reset-Rauschen	Zeitliche Schwankung eines Signals aufgrund thermischer Bewegung der Ladungs- träger, wenn die Kapazität von Reset- und Auslese-Di- ode für den nächsten Takt aufgeladen oder entladen wird	Minimierung durch sorgfälti- ge Auslegung der Pixelstruk- tur, besondere Auswahl und Reinheit des Materials	Keine weiteren Maßnahmen	
Funkelrauschen	Zeitliche Schwankung aller Ausgangssignale ohne physi- kalische Begründung	Minimierung durch sorgfälti- ge Auslegung der Pixelstruk- tur, besondere Auswahl und Reinheit des Materials	Keine weiteren Maßnahmen	
Quantisierungsrauschen	Rauschen bei der Umwand- lung der Spannungen in Zah- lenwerte	Mathematische Modellierung	Nicht berücksichtigt	
Clock-Noise	Rauschen bei der Ver- knüpfung der einzelnen Spannungen am Sample- Hold-Ausgang	Minimierung durch Verwen- dung entsprechender Schal- tungstechniken	Keine weiteren Maßnahmen	

# 4. Kantenextraktion

Entsprechend der allgemeinen Zielsetzung soll der Maßstabsfehler einer Strichteilung sowie die Abweichung einzelner Striche aus den Mitten der dunklen Striche abgeleitet werden. Weil die Striche wegen der variierenden Dicke im allgemeinen Fall einer Barcode-Teilung für ein festgelegtes Abbildungsverhältnis nicht mit beiden Kanten, d.h. hell-dunkel und dunkel-hell Übergang, gleichzeitig in einem Bild enthalten sein müssen, ist eine direkte Detektion der Strichmitten nicht immer möglich. Unabhängig von der Dicke läßt sich die Mitte immer in Verbindung mit den Laserwerten aus zwei Bildern berechnen, in denen jeweils eine der beiden Kanten eines Striches abgebildet ist. Ziel der Bildverarbeitung sind daher die Kantenextraktion, bei der die Kanten sowohl zuverlässig detektiert als auch in ihrer Position exakt lokalisiert werden sollen.

Abschnitt 4.1 behandelt zunächst die Grundlagen der Kantenextraktion. In Abschnitt 4.2 folgt die detaillierte Darstellung mehrerer vergleichbarer Lösungswege zur Kantendetektion mit einer Auflösung von einem Pixel. Die verwendeten Operatoren unterscheiden sich im Prinzip durch den Differentiationsgrad einer mehr oder weniger ähnlichen GAUß-Funktion. Zusätzlich wird der sogenannte "Difference-of-Boxes"-Operator beschrieben, der als Zwischenschritt bei der Entwicklung der meisten anderen Operatoren angesehen werden kann. Zur Steigerung in den Sub-Pixel-Bereich werden in Abschnitt 4.3 verschiedene Interpolations-Verfahren vorgestellt. Dabei werden entweder die Grauwerte im Pixelraster des Ausgangsbildes oder die diskreten Faltungswerte der Kantendetektion interpoliert. In der Praxis wird wegen der schnelleren Verarbeitung meistens die zweite Vorgehensweise angewendet.

# 4.1 Grundlagen

Im Rahmen der Grundlagen werden zunächst die bei der Kantenextraktion grundsätzlich auftretenden Probleme Glättung und Rauschen anschaulich dargestellt. Als Lösung bietet sich die Faltung des Bildes mit einem Kantenoperator an, der sich im Prinzip aus einer GAUß-Funktion und einer Differentiation der Grauwertfunktion des Bildes zusammensetzt. Für den praktischen Fall sind Bild und Operator von der kontinuierlichen in die diskrete Form zu überführen. Anschließend folgt eine kurze Beschreibung der Strategien zur Bestimmung der Kantenpixel bei Verwendung der ersten bzw. zweiten Ableitung. Da eine Strichkante im Bild geradlinig und fast senkrecht zur Spaltenrichtung verläuft und sich die gesamte Kante durch Aneinanderreihung der einzelnen, spaltenweise gefundenen Pixel ergibt, erfolgen alle Formulierungen nur eindimensional. Das Ansprechverhalten eines Kantenoperators auf die im Bild enthaltenen Frequenzen läßt sich aus einer FOURIER-Transformation des Operators ableiten.

## Probleme bei der Kantendetektion

Die auf einer Strichteilung vorhandenen Kanten entsprechen dem Typ einer sogenannten "Stufen-Kante" (Step-Edge), wie sie im Ideal in Abbildung 4.1 dargestellt ist.





Abb. 4.1: Ideale Stufen-Kante

Abb. 4.2: Profil einer idealen Stufen-Kante

Das Grauwertprofil  $g_0(x)$  um die Stelle  $x_0$  der Kante in Abbildung 4.2 hat mathematisch ausgedrückt die Form

$$g_0(x) = \begin{cases} c & \text{für } x < x_0 \\ c+h & \text{für } x \ge x_0 \end{cases},$$
(4.1)

wobei c einen Offset und h die Stufenhöhe der Kante in Grauwerten bezeichnet. In  $x_0$  weist die Funktion eine Unstetigkeit auf. Die Form dieser idealen Kante wird durch zwei Effekte verändert. Zum einen verursachen

Fehler, die der linearen Systemtheorie (siehe Abschnitt 3.2.2) zuzuordnen sind, eine Glättung des Bildes (siehe Abbildung 4.3). Dementsprechend gilt für das Profil der Kante dann  $g_0(x) \mapsto g(x)$  und die Unstetigkeit verschwindet (siehe Abbildung 4.4). Solange das Profil dabei nicht die Form einer Gerade annimmt, bleibt die Kante eindeutig definiert. Der stetige Funktionsverlauf besitzt den Vorteil, daß er mathematisch einfacher zu modellieren ist.



Abb. 4.3: Geglättete Stufen-Kante



Überlagert wird die Glättung durch das in Abschnitt 3.2.5 beschriebene Rauschen:

(

$$q_r(x) = g(x) + r(x)$$
 . (4.2)

Dadurch entstehen zeitlich und örtlich unsystematisch verteilte Veränderungen im Bild. Je stärker die Unstetigkeiten sind, desto unzuverlässiger und ungenauer läßt sich die Position der Kante angeben. Wegen der unsystematischen Änderungen kann es nicht deterministisch modelliert werden und stellt damit das Hauptproblem der Kantendetektion dar. Die Abbildungen 4.5 bzw. 4.6 stellen diesen Effekt als eine Momentaufnahme für das Bild bzw. Profil der geglätteten Kante dar.



#### Allgemeiner Lösungsweg

Um eine Kante durch das Rauschen hindurch zuverlässig und exakt zu detektieren, wird  $g_r(x)$  vor der eigentlichen Kantensuche durch eine Funktion f(x) gefiltert. Ziel ist es, das Rauschen möglichst vollständig zu beseitigen. Aufgrund der Unkenntnis des Rauschverhaltens lassen sich g(x) und r(x) aber nicht exakt voneinander trennen. Die Unstetigkeiten von  $g_r(x)$  werden daher durch eine Glättung lediglich pauschal eingeebnet, d.h. der Funktionsverlauf von g(x) wird nur näherungsweise erreicht. f(x) ist dabei so an r(x) anzupassen, daß der Einfluß auf g(x) minimal bleibt. Zahlreiche Untersuchungen deuten, von unterschiedlichen Ansätzen aus, auf die Eignung der GAUB-Funktion

$$f_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma^2}}$$
(4.3)

hin, deren Glättungsintensität von der Größe des Parameters  $\sigma$  abhängt. In der geglätteten Grauwertfunktion kann die Kante anschließend durch Differentiation entweder als Extremum der ersten Ableitung oder als Nullstelle der zweiten Ableitung gefunden werden. Glättung und Differentiation lassen sich zu einem Kantenoperator k(x) zusammenfassen, beispielsweise der ersten Ableitung der GAUß-Funktion. Die Faltung lautet dann, zusammen mit der Laufvariablen t, allgemein

$$k(x) * g_r(x) = \int_{-\infty}^{\infty} k(t) g_r(x-t) dt \quad .$$
(4.4)

Da die GAUß-Funktion und deren Ableitungen achsensymmetrisch sind, entspricht dies einer Kreuzkorrelation.

#### Diskretisierung

Das Bild der Kante liegt in der digitalen Bildverarbeitung aufgrund der Pixelstruktur des Sensors in diskreter Form vor, d.h. die kontinuierliche Grauwertfunktion wird abschnittsweise dargestellt. Abbildung 4.7 zeigt das diskretisierte Profil der rauschfreien Kante aus Abbildung 4.4.



Abb. 4.7: Profil der diskreten, geglätteten Kante

Die kontinuierliche Funktion des Kantenoperators wird analog dazu, in einer sogenannten "Maske" mit der Schrittweite  $\Delta x = 1$  digitalisiert. Auf Probleme und verschiedene Vorgehensweisen wird in [LINDEBERG 1994] näher eingegangen. Die Ausdehnung der Maske wird meist symmetrisch von der Mitte der Funktion aus bis dorthin beschränkt, wo die Funktionswerte einen vordefinierten Schwellwert unterschreiten. Die Maske besitzt folglich eine endliche Ausdehnung, die mit M = 2m + 1 Stützwerten im allgemeinen geringer als die des Bildes ist. Bei der Kantendetektion wird die Maske schrittweise über alle Bildpixel verschoben und für jede Verschiebung die diskrete Faltung

$$y(x) = k(x) * g_r(x) = \sum_{t=-m}^{+m} k(t) g_r(x-t)$$
(4.5)

berechnet. Dort wo die Maske über  $g_r(x)$  hinausragt, müssen anstelle der fehlenden Grauwerte konstante oder extrapolierte Werte verwendet werden.

Masken endlicher Ausdehnung besitzen den entscheidenden Nachteil, daß bei einer Faltung die Anzahl der Rechenoperationen von der Anzahl der Stützwerte abhängt. Einige Funktionen lassen sich jedoch durch einen rekursiven Algorithmus näherungsweise so implementieren, daß trotz unendlicher Ausdehnung der Maske, die Anzahl der Rechenoperationen immer gleich bleibt. Der Algorithmus besteht aus einem symmetrischen Differenzen-Gleichungssystem, das allgemein wie folgt lautet:

$$y^{+}(x) = a g_{r}(x-1) - \sum_{t=1}^{L} b_{t}y^{+}(x-t) , \quad \text{für } x = 1, \dots, N$$
  

$$y^{-}(x) = a g_{r}(x+1) - \sum_{t=1}^{L} b_{t}y^{-}(x+t) , \quad \text{für } x = N, \dots, 1$$
  

$$y(x) = c(y^{+}(x) - y^{-}(x)) , \quad \text{für } x = 1, \dots, N .$$
(4.6)

Für  $y^+$  und  $y^-$  sind entsprechende Startwerte zu definieren. Der Wert von L bestimmt den Ordnungsgrad der Rekursion. Die Koeffizienten a und  $b_t$  werden mit Hilfe einer sogenannten "Z-Transformation" der Funktion des Kantenoperators berechnet. Koeffizient c ist eine Konstante, die sich aus  $y^+$  und  $y^-$  gemeinsam bestimmen läßt.

#### Angabe des Kantenpixels

Einer Kante an der Stelle  $x_0$  entspricht im gefalteten Bild je nach dem ob die erste oder zweite Ableitung verwendet wird, ein Extremum oder eine Nullstelle (siehe Abbildung 4.8 a) bzw. b)).



Abb. 4.8: Profile der diskreten Ableitungen einer geglätteten Stufen-Kante

Für die Angabe *des* Kantenpixels für die erste Ableitung wird üblicherweise der Faltungsbetrag berechnet und die Kantenpixel dann durch Schwellwertbildung bestimmt. Meist wird darauf anschließend noch das Verfahren der sogenannten "Non-Maximum-Supression" (NMS) angewandt. Jedes Pixel wird mit den angrenzenden Pixeln verglichen. Besitzt eines davon einen größeren Faltungswert, wird das Pixel als Maximum abgelehnt, ansonsten wird es angenommen. Die Größe der verwendeten Nachbarschaft bestimmt hierbei den Bereich, in dem schwächere Kanten unterdrückt werden. Meist findet die NMS nur senkrecht zur Kantenrichtung statt, d.h. es werden nur parallele Kanten unterdrückt.

Im Anschluß an die NMS kann auch noch das sogenannte "Hysteresis-Threshold"-Verfahren verwendet werden [CANNY 1986]. Bei diesem wird jedes Kantenpixel aus der NMS zunächst mit einem festgelegten "oberen" Schwellwert verglichen. Ist der Faltungswert größer als der Schwellwert, wird das Pixel als sicheres Kantenpixel akzeptiert. Andernfalls wird das Pixel mit einem festgelegten "unteren" Schwellwert verglichen. Ist der Faltungswert noch kleiner als dieser, wird das Pixel als Kantenpixel definitiv abgelehnt. Liegt der Faltungswert zwischen den beiden Schwellwerten, wird das Kantenpixel nur dann akzeptiert, wenn es mit einem sicheren Kantenpixel über einen Pfad aus ebensolchen "potentiellen" Kantenpixeln verbunden werden kann. Die Länge des Pfades darf dabei einen definierten maximalen Wert nicht übersteigen. Ein nicht sofort akzeptiertes Pixel kann also unter dem Einfluß seiner Umgebung doch noch akzeptiert werden.

Im Falle der zweiten Ableitung werden zur Bestimmung der Nullstelle (Zero-Crossing) paarweise aneinandergrenzende Pixel auf einen Vorzeichenwechsel der Faltungswerte hin untersucht. Liegt ein solcher vor, wird das Pixel mit dem kleinsten Betrag als Kantenpixel detektiert.

#### Ansprechverhalten von Filtern

Die einem Kantenoperator zugrunde liegende kontinuierliche Funktion der Ausdehnung T kann als allgemeine FOURIER-Reihe (siehe [MEYBERG u. VACHENAUER 1997])

$$k(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^n a_i \cos(i \, 2\pi f_0 \, x) + \sum_{i=1}^n b_i \sin(i \, 2\pi f_0 \, x) \tag{4.7}$$

mit der sogenannten "Grundfrequenz"  $f_0 = \frac{1}{T}$  dargestellt werden. Das gesamte Spektrum der auftretenden Frequenzen ergibt sich aus den mit dem Faktor *i* multiplizierten ganzzahligen Vielfachen von  $f_0$ . Die in einem Bildausschnitt übereinstimmenden Frequenzen der Grauwertfunktion werden bei einer Faltung entsprechend ihrer Amplitudengröße verstärkt. Damit kann das Ansprechverhalten des Operators charakterisiert werden. Die Amplituden lassen sich mit Hilfe einer FOURIER-Transformation des Operators vom Orts- in den sogenannten "Frequenzbereich" übertragen. Das Auflösungsvermögen des Frequenzspektrums hängt von der Grundfrequenz und damit von der Ausdehnung des Operators ab. Die Transformation des Operators geschieht durch Berechnung der sogenannten "FOURIER-Koeffizienten"  $a_i$  und  $b_i$  nach

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{p=0}^{N-1} k(p) \cos(i \, 2\pi f_0 \, p) \quad , \qquad b_i = \frac{2}{N} \sum_{p=0}^{N-1} k(p) \sin(i \, 2\pi f_0 \, p) \quad , \qquad p = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \quad . \tag{4.8}$$

Daraus folgt das Amplituden-Spektrum der bestimmten Frequenzen  $u = i \cdot f_0$ , das auch als "FOURIER-Spektrum" bezeichnet wird, mit dem sich das Verhalten der Operatoren im Frequenzbereich beschreiben läßt:

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$$
 ,  $i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$  . (4.9)

Stattdessen kann auch das sogenannte "Power-Spektrum" verwendet werden:

$$P_i = A_i^2$$
 ,  $i = 1, 2, \dots, \frac{N}{2}$  . (4.10)

# 4.2 Operatoren

## 4.2.1 Difference-of-Boxes

Eine Grauwertfunktion weist an der Stelle einer Kante eine maximale Änderung der Funktionswerte auf, was sich am einfachsten mit Hilfe der ersten Ableitung der Grauwertfunktion beschreiben läßt:

$$\frac{\partial g_r(x)}{\partial x} = g'_r(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{g_r(x) - g_r(x - \Delta x)}{\Delta x} \quad . \tag{4.11}$$

Im diskreten Fall mit  $\Delta x = 1$  Pixel entspricht dies einer Berechnung der Differenzen zwischen den Grauwerten benachbarter Pixel:

$$g'_r(x) = g_r(x) - g_r(x-1) \quad . \tag{4.12}$$

Daraus folgt für die Faltungsmaske

$$K = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$$
 .

Um die Asymmetrie der Maske bezüglich des zu faltenden Pixels zu beseitigen, wird K modifiziert:

$$K = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad . \tag{4.13}$$

Abbildung 4.8 a) zeigt das Ergebnis der Faltung für eine geglättete, rauschfreie Stufenkante an der Stelle  $x_0$ . Als Maßnahme gegen das Rauschen schlugen [NALWA u. BINFORD 1986] vor, die Ableitung mit einer Berechnung des Mittelwerts der Pixel zu kombinieren. Dadurch wird die Faltungsmaske relativ zur Mitte symmetrisch mit  $\pm m$  Werten von -1 bzw. +1 ausgedehnt.

Je größer die Maske ist, desto stärker wird das Rauschen herausgemittelt und die Detektionszuverlässigkeit nimmt zu. Gleichzeitig nimmt aber die Lokalisierungsgenauigkeit ab, weil auch das gesuchte Kantensignal der Glättung unterliegt. Für einen Kompromiß zwischen beiden Kriterien muß daher die Maskengröße empirisch angepaßt werden. Abbildung 4.9 stellt den Funktionsverlauf

$$k_{D \circ B}(x) = \begin{cases} +1, & \text{für} & -m \le x < 0\\ -1, & \text{für} & 0 < x \le +m\\ 0, & \text{sonst} & . \end{cases}$$
(4.14)

in kontinuierlicher Form dar. Wegen der Differenzbildung kastenförmiger Bereiche wird der Operator als "Difference-of-Boxes" (DoB) bezeichnet. Das Ansprechverhalten des DoB-Operators ist in Abbildung 4.10 mit normierten Amplituden und Signalfrequenzen dargestellt. Er ist im wesentlichen ein Bandpaß vor allem für tiefe Frequenzen, der allerdings durch die Verstärkung bestimmter hoher Rauschfrequenzen Pseudokantensignale erzeugen kann.



### 4.2.2 CANNY-, SHEN- und DERICHE-Operator

#### **CANNY-Operator**

In [CANNY 1986] wird ein Kantenoperator dargestellt, der sich optimal bezüglich der drei mathematisch formulierten Kriterien Zuverlässigkeit, Lokalisierungsgenauigkeit und Eindeutigkeit der Kantendetektion verhält.

Die Zuverlässigkeit (ZUV) wird als das Verhältnis zwischen dem Signal- und dem Rauschanteil der gefalteten kontinuierlichen Grauwertfunktion im Intervall [-w, +w] definiert:

$$ZUV = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} k(x)g(x_0 - x)dx \right|}{\sigma_r \sqrt{\int_{-w}^{+w} k^2(x)dx}} \quad .$$
(4.15)

Dabei entspricht der Parameter  $\sigma_r$  der Standardabweichung des Rauschens. Ein großer Wert für ZUV, d.h. ein großes Signal/Rausch-Verhältnis bedeutet, daß Kantenpunkte mit hoher Wahrscheinlichkeit als solche detektiert bzw. alle anderen zurückzugewiesen werden.

Die Lokalisierungsgenauigkeit drückt sich durch die Varianz des Abstandes zwischen dem gefundenen und dem wahren Kantenort  $x_0$  aus. Da der Kantenort durch den Operator als Maximum im gegebenen Intervall [-w, +w] bestimmt werden soll, wird zunächst die Nullstelle der in einer TAYLOR-Reihe entwickelten ersten Ableitung der Faltung bestimmt. CANNY verwendet als Genauigkeitskriterium (*GEN*) den Kehrwert der Varianz, weil eine Änderung dieser Maßzahl sich analog zur Lokalisierungsgenauigkeit verhält:

$$GEN = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} k'(x)g'(x_0 - x)dx \right|}{\sigma_r \sqrt{\int_{-w}^{+w} k'^2(x)dx}} \quad .$$
(4.16)

Gesucht ist nun derjenige Filter, der gleichzeitig ZUV und GEN maximiert. Zu diesem Zweck wird das Produkt  $ZUV \cdot GEN$  gebildet. Die alleinige Optimierung eines Kriteriums hätte eine entsprechende Verschlechterung des anderen zur Folge. Mit Hilfe der Ungleichungen von CAUCHY-SCHWARZ-BUNJAKOWSKI

$$\left| \int_{-w}^{+w} k(x)g(x_0 - x)dx \right|_{2}^{2} \leq \int_{-w}^{+w} |k(x)|^2 dx \int_{-w}^{+w} |g(x_0 - x)|^2 dx$$
(4.17)

$$\left| \int_{-w}^{+w} k'(x)g'(x_0 - x)dx \right|^2 \leq \int_{-w}^{+w} |k'(x)|^2 dx \int_{-w}^{+w} |g'(x_0 - x)|^2 dx \quad , \tag{4.18}$$

läßt sich die obere Grenze des Produktes als sogenannte "CANNYsche Unschärferelation" [RADIG 1993] festlegen:

$$ZUV \cdot GEN \le \frac{1}{\sigma_r} \sqrt{\int_{-w}^{+w} g^2(x_0 - x) dx} \cdot \frac{1}{\sigma_r} \sqrt{\int_{-w}^{+w} g'^2(x_0 - x) dx} \quad .$$
(4.19)

 $ZUV \cdot GEN$  erreicht sein Maximum genau dann, wenn  $k(x) = g(x_0 - x)$  gilt. Das bedeutet, daß der optimale Kantenoperator in Hinblick auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit, bei Vernachlässigung der Glättung, die Form einer idealen Stufenkante und damit eines DoB-Operators hat.

CANNY erweiterte die beiden Kriterien durch die Forderung der Eindeutigkeit des Ergebnisses, weil die mathematische Formulierung der Detektionszuverlässigkeit dies nicht explizit beinhaltet. Ist das Signal nämlich stark verrauscht, tendiert ein DoB-Operator dazu, hohe Frequenzen in der Umgebung [-w, +w] der Kante als Pseudokanten auszugeben. Dabei ist keine definitive Aussage darüber möglich, welches der Signale die eigentliche Kante darstellt. Mathematisch wird die Eindeutigkeit (*EIN*) mit Hilfe des Theorems von RICE über den Abstand von Nulldurchgängen der ersten Ableitung k'(x) hergeleitet zu

$$EIN = \frac{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} k'^2 (x - x_0) dx}}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} k''^2 (x - x_0) dx}} \quad .$$
(4.20)

CANNY optimiert diese Nebenbedingung und das Produkt  $ZUV \cdot GEN$  gemeinsam durch Variationsrechnung mit Hilfe LAGRANGEscher Multiplikatoren und erhält als allgemeine Lösung:

$$k_C(x) = a_1 e^{\alpha x} \sin \omega x + a_2 e^{\alpha x} \cos \omega x + a_3 e^{-\alpha x} \sin \omega x + a_4 e^{-\alpha x} \cos \omega x + c \quad , \tag{4.21}$$

wobei  $a_1, a_2, a_3, a_4, c, \alpha$  und  $\omega$  konstante Parameter sind. Die konkrete Lösung dieses Gleichungssystems ist wegen der Komplexität nur numerisch möglich. Es zeigt sich, daß der nach CANNY optimale Filter für eine Stufenkante näherungsweise der ersten Ableitung einer GAUß-Funktion

$$k_C(x) \approx -\frac{x}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma^2}}$$
(4.22)

entspricht, wie sie in Abbildung 4.11 dargestellt ist. Bestätigt wird dieses Ergebnis in [TORRE u. POGGIO 1986, TAGARE u. DEFIGUEIREDO 1990, LUNSCHER u. BEDDOES 1986a, LUNSCHER u. BEDDOES 1986b]. In der Praxis wird der Funktionsverlauf aufgrund empirischer Abschätzungen in einer Maske der Ausdehnung *M* diskretisiert. Der CANNY-Operator ist bezüglich seines Ansprechverhaltens ein Bandpaß, der vor allem tiefe Frequenzen durchläßt und im Gegensatz zum DoB-Operator keine Pseudokantensignale erzeugt (siehe Abbildung 4.12). 44



#### SHEN-Operator

Ein ebenfalls auf der mathematischen Formulierung von qualitativen Kantenkriterien basierender Operator wird in [SHEN u. CASTAN 1992] dargestellt. Im Vergleich zur Lösung von CANNY werden die beiden Kriterien ZUV und GEN allerdings anders definiert und außerdem die Nebenbedingung EIN bei der Optimierung des Produkts nicht berücksichtigt. Das Produkt lautet unter Annahme einer zentrierten Stufenkante ( $x_0 = 0$ ) der Stufenhöhe h:

$$ZUV \cdot GEN = \frac{h\left|\int_{-\infty}^{0} k(x)dx\right|}{\sigma_r \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} k^2(x)dx}} \cdot \frac{h\left|k'(0)\right|}{\sigma_r \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} k'^2(x)dx}} \quad .$$
(4.23)

Der dann im Anschluß an eine Modifizierung dieses Produkts durch Variationsrechnung gefundene Operator mit dem LAGRANGEschen Multiplikator  $\alpha$  hat die Form

$$k_{S}(x) = \begin{cases} \frac{\alpha^{2}}{2}e^{\alpha x} & \text{für } x < 0\\ 0 & \text{für } x = 0\\ -\frac{\alpha^{2}}{2}e^{-\alpha x} & \text{für } x > 0 \end{cases}$$
(4.24)

Je kleiner der Wert von  $\alpha$  ist, desto stärker wird das Rauschen beseitigt. Durch ein Differenzen-Gleichungssystem 1. Ordnung (L = 1, siehe Formel (4.6)) läßt sich der Operator rekursiv implementieren [SHEN u. CASTAN 1992]. Die auftretenden Koeffizienten lauten

$$a = (1 - e^{-\alpha}), \quad b_1 = e^{-\alpha}, \quad c = 1$$
, (4.25)

wobei an den Rändern gilt:

$$g_r(0) = g_r(N+1) = 0$$
,  $y^+(0) = y^-(N+1) = 0$ . (4.26)

Abbildung 4.13 zeigt die Form in kontinuierlicher Darstellung des Operators und Abbildung 4.14 sein Ansprechverhalten. Es fällt auf, daß neben den tiefen Frequenzen auch noch die höheren, wenn auch im Verhältnis dazu stark abnehmend, verstärkt werden. Im Vergleich zum DoB-Operator geschieht dies durchgehend, d.h. nicht selektiv in Form einzelner Bänder.



#### **DERICHE-Operator**

Wird zusätzlich zum Ansatz von SHEN nach Gleichung (4.23) noch die Eindeutigkeit des Ergebnisses nach Gleichung (4.20) berücksichtigt, liefert die Variationsrechnung nach [DERICHE 1990] den Operator

$$k_D(x) = -\frac{\alpha^2 + \beta^2}{\beta} e^{-\alpha |x|} \sin(\beta x) \quad , \tag{4.27}$$

mit den beiden LAGRANGEschen Multiplikatoren  $\alpha, \beta > 0$ . Durch entsprechende Wahl der Multiplikatoren kann ein optimales Ergebnis in Hinblick auf das Produkt  $ZUV \cdot GEN$  oder die Eindeutigkeit EIN erreicht werden. Der erste Fall (D1) gilt für  $\alpha \ll \beta$  und der Operator lautet:

$$k_{D1}(x) = -\frac{(1 - e^{-\alpha})^2}{e^{-\alpha}} x e^{-\alpha |x|} \quad .$$
(4.28)

Für die rekursive Faltung mit Formelsystem (4.6) gelten die Parameter

$$L = 2$$
,  $a = 1$ ,  $b_1 = -2e^{-\alpha}$ ,  $b_2 = e^{-2\alpha}$ ,  $c = -(1 - e^{-\alpha})^2$  (4.29)

mit den Randbedingungen

$$g_r(0) = g_r(N+1) = 0$$
,  $y^+(0) = y^+(-1) = y^-(N+1) = y^-(N+2) = 0$ . (4.30)

Diese Variante des DERICHE-Operators ist in Abbildung 4.15, sein Ansprechverhalten in Abbildung 4.16 dargestellt. Letzteres liegt zwischen dem des Operators nach CANNY und dem nach SHEN.



Wird für die Optimierung der Eindeutigkeit des Ergebnisses  $\alpha = \beta$  gewählt, folgt

$$k_{D2}(x) = -\frac{1 - 2e^{-\alpha}\cos\alpha + e^{-2\alpha}}{e^{-\alpha}\sin\alpha} e^{-\alpha|x|}\sin(\alpha x)$$
(4.31)

und für die Rekursion

$$L = 2 , \quad a = 1 , \quad b_1 = -2\cos(\alpha)e^{-\alpha} , \quad b_2 = e^{-2\alpha} , \quad c = -(1 - 2\cos(\alpha)e^{-\alpha} - e^{-2\alpha})^2 \quad .$$
(4.32)

Für die Randbedingungen gilt wiederum (4.30). Nach [RADIG 1993] werden für diese Variante (siehe auch Abbildung 4.17) in der Praxis die besseren Resultate erreicht. Dies wird auch bei Betrachtung des Ansprechverhaltens (siehe Abbildung 4.16) im Vergleich zur ersten Variante deutlich, weil die Verstärkung höherer Frequenzen nicht so stark ausfällt.



Abb. 4.17: DERICHE2-Operator



Abb. 4.18: FOURIER-Spektrum des DERICHE2-Operators

### 4.2.3 Laplacian-of-Gaussian

Die in den vorhergehenden zwei Abschnitten beschriebene Kantendetektion auf Grundlage der Extrema der ersten Ableitung entspricht bei Verwendung der zweiten Ableitung einer Bestimmung von Nullstellen bzw. von Vorzeichenwechseln. Bei der Wahl von  $\Delta x = 1$  lautet die zweite Ableitung im diskreten Fall

$$\frac{\partial^2 g_r(x)}{\partial x^2} = g_r''(x) = g_r'(x+1) - g_r'(x)$$

$$= (g_r(x+1) - g_r(x)) - (g_r(x) - g_r(x-1))$$

$$= g_r(x+1) - 2g_r(x) + g_r(x-1) \quad . \tag{4.33}$$

Für die Faltungsmaske folgt daraus

$$K_x = \left[ \begin{array}{ccc} 1 & -2 & 1 \end{array} \right]$$

Abbildung 4.8 b) zeigt das Ergebnis der Faltung für eine geglättete, rauschfreie Stufenkante an der Stelle  $x_0$ .

Zur Rauschbeseitigung wurde in einer biologisch motivierten Untersuchung [MARR u. HILDRETH 1980] die zweite Ableitung mit der GAUß-Funktion aus Gleichung (4.3) kombiniert:

$$k_{L\circ G}(x) = f_{\sigma}''(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{1}{\sigma^4} (x^2 - \sigma^2) e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma^2}} \quad .$$
(4.34)

MARR und HILDRETH erweiterten ihren Ansatz anschließend durch Verwendung des LAPLACE-Operators auf den zweidimensionalen Fall:

$$k_{LoG}(x,y) = \Delta f_{\sigma}(x,y) = \nabla_x^2 f_{\sigma}(x,y) + \nabla_y^2 f_{\sigma}(x,y) \quad . \tag{4.35}$$

Der Operator wird daher "Laplacian-of-Gaussian" (LoG) genannt. Er stellt nach der Untersuchung in [LUNSCHER u. BEDDOES 1986a] im wesentlichen eine Annäherung an den im Frequenzraum arbeitenden Filter aus [SHANMUGAM et al. 1979] dar. Weil der LoG-Operator sich nicht rekursiv implementieren läßt, muß in der Praxis eine Maske mit der empirisch gefundenen Ausdehnung M für die Faltung verwendet werden. Abbildung 4.19 zeigt einen eindimensionalen Schnitt durch den Operator, der wegen seiner charakteristischen Form auch als "Mexican-Hat-Operator" bezeichnet wird. Das FOURIER-Spektrum des LoG (siehe Abbildung 4.20) zeigt, daß hochfrequente Signalanteile vollständig gefiltert werden.



Näherungsweise kann der Funktionsverlauf des LoG-Operators auch durch die Differenz zweier GAUß-Funktionen, "Difference-of-Gaussians" (DoG) mit den Parametern  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  dargestellt werden:

$$k_{LoG}(x) \approx k_{DoG}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_2^2}} \quad .$$
(4.36)

Zwischen  $\sigma_1$  bzw.  $\sigma_2$  und  $\sigma_{LoG}$  besteht der Zusammenhang

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{LoG}}{\sqrt{-2\ln\left(\frac{1}{\sigma_f}\right)\frac{1}{\sigma_f^2 - 1}}} \quad , \qquad \sigma_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_f} \quad , \qquad (4.37)$$

wobei sich aufgrund empirischer Untersuchungen  $\sigma_f = 1, 6$  als zweckmäßig erwiesen hat.

Operator	${f Mathematische  Beschreibung}$	${f Anwendungs form}$
Difference-of-Boxes	$k_{D \circ B}(x) = \begin{cases} +1, & \text{für} & -m \le x < 0\\ -1, & \text{für} & 0 < x \le +m\\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$	Maske
Canny	$k_C(x) pprox -rac{x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3}e^{-rac{1}{2}rac{x^2}{\sigma^2}}$	${f M}{f aske}$
Shen	$k_S(x) = \begin{cases} \frac{\alpha^2}{2} e^{\alpha x} & \text{für } x < 0\\ 0 & \text{für } x = 0\\ -\frac{\alpha^2}{2} e^{-\alpha x} & \text{für } x > 0 \end{cases}$	Rekursion
Deriche1	$k_{D1}(x) = -\frac{(1-e^{-\alpha})^2}{e^{-\alpha}} x e^{-\alpha  x }$	Rekursion
Deriche2	$k_{D2}(x) = -\frac{1 - 2e^{-\alpha} \cos \alpha + e^{-2\alpha}}{e^{-\alpha} \sin \alpha} e^{-\alpha  x } \sin (\alpha x)$	Rekursion
Laplacian-of-Gaussian	$k_{L \circ G}(x) = rac{1}{\sqrt{2 \pi \sigma}} rac{1}{\sigma^4} (x^2 - \sigma^2) e^{-rac{1}{2} rac{x^2}{\sigma^2}}$	${ m Maske}$
Difference-of-Gaussians	$k_{D \circ G}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} e^{-\frac{1}{2}\frac{x^2}{\sigma_2^2}}$	Maske

## 4.2.4 Zusammenstellung der Operatoren

# 4.3 Sub-Pixel-Genauigkeit

### Interpolation der Faltungwerte

Hierbei wird ein kontinuierlicher Funktionsverlauf der diskreten Faltungswerte angenommen, der durch Stützwerte in einem symmetrischen Bereich um das Zentrum  $x_0$  des pixelgenauen Maximums parametrisiert wird. In dieser Form lassen sich die Nullstellen der ersten und der zweiten Ableitung und damit die Kantenposition mit der gewünschten höheren Genauigkeit interpolieren. Sowohl die Interpolationsfunktion als auch die Stützwertanzahl können frei gewählt werden. Eine Auflösung weniger hundertstel Pixel ist dabei allerdings unter Umständen kritisch, weil diese sich dann im Bereich der optischen Wellenlängen bewegt, für den die nicht zu modellierenden Beugungseffekte der Abbildung größer sind [PROFOS u. PFEIFER 1992].

In [SEITZ 1988] sind direkte Interpolationsformeln für das Sub-Pixel-Maximum der ersten Ableitung in einem Bereich von  $\pm 1$  Pixeln um das pixelgenaue Maximum  $x_0$  auf Grundlage des relativen Schwerpunkts (S), einer Parabel- (P) und einer GAUß-Funktion (G) angegeben. Mit den Faltungswerten  $y_i$  an den entsprechenden Positionen um  $x_0$  (siehe auch Abbildung 4.8) ergibt sich im "Interpolationsfenster":

$$\Delta x_{S} = \begin{cases} \frac{y_{-1} - y_{+1}}{2y_{+1} - y_{0} - y_{-1}}, & \text{für } y_{+1} < y_{-1} \\ \frac{y_{-1} - y_{+1}}{2y_{-1} - y_{0} - y_{+1}}, & \text{für } y_{+1} \ge y_{-1} \end{cases}$$
(4.38)

$$\Delta x_P = \frac{y_{+1} - y_{-1}}{2(2y_0 - y_{+1} - y_{-1})} \tag{4.39}$$

$$\Delta x_G = \frac{q-1}{2(q+1)}, \quad \text{wobei} \quad q = \frac{\log(y_0) - \log(y_{-1})}{\log(y_0) - \log(y_{+1})} \quad . \tag{4.40}$$

In Formel (4.38) wird der kleinste der drei Werte als "Referenzwert" angesehen, um den die beiden anderen Werte zunächst reduziert werden bevor aus ihnen der Schwerpunkt berechnet wird. Die allgemeine Formel für die Verwendung von  $\pm N$  Werten im Bildkoordinatensystem wird in [SEITZ u. RAYNOR 1989] angegeben zu

$$x_{S} = \frac{1}{h} \sum_{i=-N}^{+N} y_{i} \cdot x_{i} \quad , \tag{4.41}$$

mit h =Sprunghöhe der Kante.

Durch Faltung mit einer GAUß-Funktion kann nach [SEITZ 1988] das gleiche Differenzsignal zusätzlich geglättet werden, was einer gewichteten Schwerpunktbestimmung entspricht. Wenn die GAUß-Funktion so

gewählt wird, daß der Einfluß der Gewichte zu beiden Seiten des Zentralwertes rasch abfällt, ist dabei nur ein Bereich von  $i = \pm 2$  Pixeln nötig:

$$f(u) = \sum_{i=-2}^{+2} y_i e^{-\frac{\pi}{4}(u-i)^2} \quad .$$
(4.42)

Der Maximalwert dieser aus der Summe von fünf Termen gebildeten Funktion der Variablen u, berechnet sich iterativ durch die Methode der Intervallhalbierung.

Bei Verwendung von mehr als drei Differenzsignalen kann die Funktion durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. In [SCHMID 1995] wird beispielsweise durch das Ergebnis der eindimensionalen Faltung mit dem CANNY-Operator ein Polynom zweiten Grades gelegt, dessen Extremwert  $x_P$  aus der Ableitung folgt:

$$y(x) = ax^2 + bx + c (4.43)$$

$$x_P = -\frac{b}{2a} \tag{4.44}$$

In [HUERTAS u. MEDIONI 1986] wird die gleiche Funktion im zweidimensionalen Fall für die Modellierung der Oberfläche des mit dem LoG-Operator gefalteten Bildes verwendet. Weitere Stützstellen lassen sich entsprechend der gewünschten Auflösung interpolieren. Anschließend erfolgt in dem verfeinerten Raster eine erneute Bestimmung der Zero-Crossings.

In [STEGER 1998a, STEGER 1998b] wird die Tatsache ausgenutzt, daß das Profil der ersten Ableitung einer Kante dem einer Linie entspricht. Die Linienmitte, die der Kantenposition entspricht, läßt sich durch einen Operator zur Linienextraktion detektieren. Zu diesem Zweck wird das Kantenbild jeweils mit einer GAUß-Funktion und deren ersten und zweiten Ableitungen gefaltet. Dies entspricht an der Stelle *i* dann  $y_i, y'_i$  bzw.  $y''_i$ . Diese Terme modellieren, eingesetzt in ein TAYLOR-Polynom zweiten Grades, abschnittsweise den Verlauf des Ableitungsbildes, das an der Stelle der gesuchten Kantenposition eine Nullstelle der ersten Ableitung besitzt:

$$r(x) = \frac{1}{2}y''_{i}x^{2} + y'_{i}x + y_{i}$$
(4.45)

$$x_{Steger} = -\frac{y_i}{y_i'} \qquad (4.46)$$

Die verwendete Bereichsweite hängt vom  $\sigma$  der GAUß-Funktion ab.

#### Interpolation der Grauwerte

Bei diesem Verfahren werden die ursprünglichen Grauwerte des Bildes jeweils in kleinen Bereichen mit Hilfe eines Oberflächenmodells (Facet-Model) durch Ausgleichung interpoliert. Aufbauend auf dem Ansatz nach [HARALICK 1984], der eine cubische Splinefunktion verwendet und nur Pixelgenauigkeit erreicht, wird in [NALWA u. BINFORD 1986] noch eine tanh-Funktion für die Subpixelgenauigkeit nachgeschaltet. Das Verfahren hat den Vorteil, daß durch die Modellierung gleichzeitig implizit die Kante detektiert wird und somit die Ableitung entfällt. Wegen der Nichtlinearität der Ausgleichung ist es allerdings sehr rechenzeitintensiv. Schneller, aber nicht wissenschaftlich fundiert, ist die Detektion mit Hilfe von Grauwertmomenten im Ausgangsbild. Dies ähnelt einer Bestimmung des Schwerpunkts. So ermitteln [TABATABAI u. MITCHELL 1984] die Kantenposition innerhalb eines Suchfensters mit Hilfe der ersten drei Momente der darin enthaltenen Grauwerte. Das im Bild enthaltene Rauschen wird durch einfache Mittelbildung reduziert.

# 5. Untersuchungen zur Kantenextraktion

In diesem Kapitel sind alle Untersuchungen zusammengefaßt, die durchgeführt wurden, um unter praktischen Gesichtspunkten die Einflüsse der verschiedenen Hard- und Software-Komponenten auf die Auswertung der bei der Kalibrierung von Strichteilungen aufgenommenen digitalen Bilder aufzudecken. Abschnitt 5.1 stellt zusammenfassend den Einfluß des Rauschens des Kamerasystems dar, das nicht vollständig durch Maßnahmen in der Hardware beseitigt werden kann und jedem Bild unabhängig von der aufgenommenen Szene überlagert ist. In Abschnitt 5.2 wird nachgewiesen, daß die Verzeichnung des verwendeten Objektivs als einzige theoretisch bedeutsame geometrische Fehlerquelle im vorliegenden Fall vernachlässigbar ist. Abschnitt 5.3 präsentiert zunächst die Untersuchung des homogenen lichtempfindlichen Verhaltens der aus einem linken und rechten Teil bestehenden Sensorarchitektur in der eingesetzten Kamera. Dazu kommt eine Inhomogenität im oberen Teil der Kamera, die aber zusammen mit anderen Faktoren aufgrund ihres systematischen Charakters mit Hilfe einer Kalibrierung korrigiert werden können. Abschnitt 5.4 zeigt die Deformierung der Kanten im Bild durch Überstrahlungseffekte im Sensor aufgrund der verwendeten Objektbeleuchtung. Die Überstrahlungseffekte spielen auch in Abschnitt 5.5 eine große Rolle, dort steht jedoch die qualitative und vor allem quantitative Beurteilung der verschiedenen Kantenoperatoren durch den Vergleich mit Referenz-Laserwerten im Vordergund.

# 5.1 Systemrauschen

Um den Einfluß aller in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen elektronischen Rauschquellen des Kamerasystems abschätzen zu können, wurden drei verschiedene Meßreihen mit abgedecktem Sensor, bei einer mittleren Umgebungstemperatur von ca. 20°C, einem Aufnahmetakt von 8 Sekunden über einen Zeitraum von einer Stunde und einer Belichtungszeit von  $\frac{1}{40}$ s durchgeführt. Die Kühlung der sich beim Betrieb erwärmenden Kamera geschah in der ersten Meßreihe passiv über die Umgebungsluft, in der zweiten über eine Metallplatte an die das Kameragehäuse sensorseitig montiert war, und als Standardfall in der dritten Meßreihe zusätzlich über den Luftsog eines Gebläses. Der Verlauf der Mittelwerte jedes Bildes ist in den Abbildungen 5.1, 5.2 und 5.3 dargestellt.



 ${\bf Abb. \ 5.1:} \ \ {\rm System rauschen \ Me{\it Breihe \ 1: \ W{\ddot a}rmeable itung \ \ddot uber \ Umgebungsluft}$ 



Abb. 5.2: Systemrauschen Meßreihe 2: Wärmeableitung über Metallplatte



Abb. 5.3: Systemrauschen Meßreihe 3: Wärmeableitung über Metallplatte und Gebläse

In den ersten fünf Minuten weisen alle drei Meßreihen eine mehr oder minder starke Überkompensation auf. In Meßreihe 1 rührt sie vermutlich von der kälteren Unterlage her, auf die die Kamera seitlich gelegt werden mußte. Das Niveau ist im Vergleich zu den beiden anderen Meßreihen aber um ca. 0,1 Graustufen höher. Danach steigt die Erwärmung und damit das Rauschen bis ca. 30 Minuten nach dem Einschalten linear an, flacht dann ab und bleibt ab ungefähr der 50. Minute konstant. Das bedeutet, daß temperaturbedingte Einlaufeffekte erst nach dieser Zeitspanne abgeschlossen sind, sofern keine Maßnahmen zur Wärmeableitung getroffen werden. Für die anderen beiden Meßreihen beträgt diese Zeitspanne höchstens 10 Minuten. Danach liegen die Werte der Meßreihe 3 aufgrund der besseren Kühlung um ca. 0,05 Graustufen unterhalb der Meßreihe 2.

Um etwaige unterschiedliche systematische Effekte des Sensors zu beobachten, wurde aus den Bildern zwischen der fünften und dreißigsten Minute für jedes Pixel der Mittelwert des Rauschens berechnet (siehe Abbildung 5.4). Zur besseren Visualisierung wurde das Histogramm des Bildes durch Grauwert-Äqualisation aufgespreizt [ABMAYR 1994]. Dunkle Bereiche in Abbildung 5.4 bedeuten einen niedrigeren mittleren Grauwert als helle Bereiche. Deutlich zu erkennen sind vertikale Streifenmuster, die die Pixel-Clock verursacht. Durch das spiegelsymmetrische Auftreten in beiden Sensorhälften wird die Tatsache bestätigt, daß beide Sensoren mit einer einzigen Clock betrieben werden. Die horizontalen Streifen weisen eine scheinbar longitudinale Verteilung auf, was auf die Überlagerung durch verschiedene weitere Ursachen schließen läßt. Der obere Bereich des Sensors ist unempfindlicher, was vermutlich beim Herstellungsprozeß verursacht wird. Daneben fällt optisch der Unterschied zwischen der linken und rechten Sensorhälfte auf (siehe Abschnitt 3.2.4). Das mittlere Maß für die unterschiedlichen Grauwerte in beiden Hälften beträgt -0,12 Graustufen (siehe Abbildung 5.5). Insgesamt ist allerdings festzustellen, daß sowohl die zeitlichen als auch die örtlichen Differenzen des Systemrauschens maximal 1 Promille der gesamten nutzbaren Skala von ca. 250 Grauwerten betragen und daher zu vernachlässigen sind. Um die Kamera zu schonen, sollte die starke Erwärmung zumindest über eine Metallplatte abgeleitet werden.



Abb. 5.4: Mittelwerte des Systemrauschens (Grauwerte äqualisiert)





# 5.2 Geometrische Verzeichnung

Für die Untersuchung der geometrischen Verzeichnung durch das Objektiv (siehe Abschnitt 3.2.1) wurde eine planparallele Glasplatte mit einem Gitter von  $9 \times 9$  Linien aus aufgedampftem Chrom als Sonderanfertigung der Firma LEICA verwendet. Laut Firmenangabe beträgt der Maschenabstand  $2 mm \pm 1 \mu m$  und die Toleranz über die Gesamtlänge  $\pm 3 \mu m$ . Die Strichstärke selbst beträgt  $3 \mu m \pm 0, 5 \mu m$ .

Die Maschenweite wurde mit Hilfe eines ZEISS PLANICOMP P1 am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München (LPF-TUM) überprüft, der zu diesem Zweck als Monokomparator verwendet wurde. Der Bildwagen, auf dem die Platte wegen der Beobachtung von unten gitterseitig aufliegt, wird auf einem Kreuzschlitten mit mechanischer Präzisionsführung verfahren. Die Präzisionsmeßspindeln zum Abgriff der Koordinaten besitzen eine Auflösung von  $1 \mu m$ . Als mittlere Koordinatenmeßgenauigkeit für Gittermessungen gibt ZEISS  $\pm 2 \mu m$  an. Um die homogene Meßgenauigkeit des Systems über das gesamte Gitter später leichter überprüfen zu können, wurde die Gitterplatte in der Mitte des Bildwagens möglichst parallel zu den Meßspindeln ausgerichtet. Anschließend wurden der Reihe nach alle Kreuzungspunkte elfmal mit Hilfe einer Punktmarke (ø30  $\mu m$ ) eingestellt. Die mittleren Koordinaten wurden durch eine überbestimmte 6-Parametertransformation (affine Abbildung) in die Sollkoordinaten des 2 mm-Rasters überführt. Für die Maßstabsfaktoren ergab sich in x-Richtung  $m_x = 1,000039$  und in y-Richtung  $m_y = 0,999964$ . Abbildung 5.6 zeigt die Restklaffungen in den einzelnen Punkten. Eine überbestimmte 4-Parametertransformation lieferte entsprechend keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse.



Abb. 5.6: Restklaffungen Affintransformation PLANICOMP-Soll

Eine weitere Überprüfung dieser Ergebnisse erfolgte durch Messungen mit dem HP-Laserinterferometer. Auf einer Werkbank wurden Gitter und Meßprisma hintereinander ausgerichtet und unter Beobachtung mit einem stationären, senkrecht darüber stehenden optischen Meßmikroskop linienweise von einem Kreuz zum nächsten manuell verschoben. Weil das Mikroskopfadenkreuz ca. dreißigmal dicker als die Gitterstriche ist, wurde es für eine möglichst exakte Einstellung der Schnittpunkte um ca.  $45^{\circ}$  verdreht. Für die Messung senkrecht zueinander stehender Linien war eine Umsetzung des Gitters um 90° notwendig. Jeder Gitterpunkt wurde insgesamt fünfmal in einer Linienrichtung gemessen und gemittelt. Beim Vergleich der Differenzen aus Laserwerten gegenüber denen aus Soll-Positionen (2*mm*-Raster) konnten keine signifikanten Abweichungen zum ersten Verfahren festgestellt werden. Das heißt, Meßspindeln und Laserinterferometer verhalten sich homogen zueinander und beide Meßverfahren sind als qualitativ gleichwertig einzustufen. Die maximale Genauigkeit der Positionsbestimmung der einzelnen Gitterkreuze lag somit bei  $\pm 2\mu m$ .

Zur Bestimmung der Verzeichnung des Objektivs wurde das Gitter direkt auf die Teilung aufgelegt und 25 sichtbare Gitterpunkte im rechten oberen Bereich der Gitterplatte angemessen. Weil eine automatische subpixelgenaue Bestimmung der nur einen Pixel breiten Gitterkreuze kurzfristig nicht realisierbar war, kam in manueller Form der sogenannte "Ring-Operator" [LUHMANN 1986] stark vereinfacht zur Anwendung: Zwei visuell eindeutig identifizierbare Linienpunkte, die symmetrisch zu einem Gitterpunkt liegen, definieren in horizontaler bzw. vertikaler Richtung eine Gerade. Anschließend erfolgte eine Affin-Transformation der Schnittpunktkoordinaten der Geradenpaare in die Koordinaten der PLANICOMP-Messung. Für die Maßstabsfaktoren ergab sich in x-Richtung  $m_x = 1,006748$  und in y-Richtung  $m_y = 1,006709$ . Abbildung 5.7 zeigt die Restklaffungen der auf dem Sensor abgebildeten Punkte.



Abb. 5.7: Restklaffungen Affintransformation Sensor-PLANICOMP

Trotz des einfachen Verfahrens zur Bestimmung der Schnittpunkte, liegen die Restklaffungen mit ca.  $2\,\mu m$ 

im Bereich der Genauigkeit der Schnittpunkte selber. Es ist auch keine Systematik in der Ausrichtung der Rasterpunkte sichtbar. Eine Verzeichnung kann daher nicht festgestellt werden und ist somit auch nicht weiter zu berücksichtigen.

# 5.3 Radiometrie

## 5.3.1 Sensorempfindlichkeit

Da der Sensor aus zwei Teilen besteht (siehe Abschnitt 3.1.4) wurde die linke und rechte Hälfte auf ein unterschiedliches Ansprechverhalten hin untersucht. Dazu wurde das Objektiv durch eine ca. 2mm dicke homogene weiße Plexiglasscheibe ersetzt und frontal mit dem Ringlicht (siehe Abschnitt 3.2.3) angestrahlt. Zur Ausschaltung etwaiger systematischer Bestrahlungseffekte dienten mehrere als Diffusor zwischen Ringlicht und Plexiglas eingebrachte Lagen Pergamentpapier. Mit der Sichelblende der Beleuchtung ließ sich die relative Intensität in 10%-Schritten von 10% bis 90% und zusätzlich noch bei 5% und 95% einstellen. Um Einlaufeffekte der Kamera auszuschalten, begann die eigentliche Messung 5 Minuten nach dem Einschalten von Kamera und Beleuchtung. Bei jeder Beleuchtungsstufe wurden in 5 Minuten 300 Bilder aufgnommen. Die anschließenden Auswertung lieferte getrennt für die linke und rechte Sensorhälfte die mittleren Grauwerte und die Varianzen der Einzelwerte, deren Differenzen über die 300 Bilder die Gesamtmittel ergaben.

Abbildung 5.8 zeigt den Verlauf der Meßreihe für die Differenz der Mittelwerte (Output Gain Mismatch). Für die linke Sensorhälfte ist ein überproportional starker Anstieg bis 50% der relativen Bestrahlungsstärke gegenüber der rechten Hälfte festzustellen. Danach nimmt die Differenz fast symmetrisch wieder ab. Der Maximalwert beträgt ca. 2,2 Graustufen. Näherungsweise symmetrisch verhalten sich auch die Differenzen der Standardabweichungen der Einzelwerte in Abbildung 5.9. Die Extremwerte liegen hier aber bei 40% bzw. 60% der relativen Bestrahlungsstärke. Das heißt, obwohl die Differenz der Mittelwerte bei 50% erst ihr Maximum erreicht, hat die Differenz des Rauschens im Sensor dort schon ihren Höhepunkt überschritten. Quantitativ liegt die Differenz der Mittelwerte bei weniger als der Hälfte des nach DALSA zulässigen Wertes von ca. 4,6 Graustufen und das, obwohl die Messung vom Rauschen der Kameraelektronik überlagert ist. Folglich ist dieser Unterschied vernachlässigbar.



Abb. 5.8: Differenzen der Mittelwerte



### 5.3.2 Radiometrische Korrektur

Aufgrund der in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Effekte, Beleuchtung, Vignettierung, Sensorempfindlichkeit und Quantisierung, weisen die Grauwertprofile von Kanten je nach Lage im Bild ein unterschiedliches Steigungsverhalten auf. Der Grauwertverlauf bestimmt aber in Abhängigkeit vom Kantenoperator das Detektionsergebnis. Zur Beseitigung dieser systematischen Effekte existieren zahlreiche Lösungsansätze [LENZ 1988, BEYER 1992, MAAS 1993, PHOTOMETRICS 1989]. Von diesen wurde das auf der radiometrischen Kalibrierung beruhende Verfahren nach [BEYER 1992] ausgewählt. Dazu wird für jedes Pixel ein Gain und Offset nach

$$gain(x_i, y_i) = \frac{r_h - r_d}{g_h(x_i, y_i) - g_d(x_i, y_i)}$$
(5.1)

offset
$$(x_i, y_i) = r_d - g_d(x_i, y_i)$$

$$(5.2)$$

bestimmt, mit denen sich die Korrektur durch

$$g(x_i, y_i) = r_d + gain(x_i, y_i) \cdot (g'(x_i, y_i) + offset(x_i, y_i) - r_d)$$
  
=  $r_d + \frac{r_h - r_d}{g_h(x_i, y_i) - g_d(x_i, y_i)} \cdot (g'(x_i, y_i) - g_d(x_i, y_i))$  (5.3)

berechnet. Dabei bedeuten

 $\begin{array}{lll} x_i, y_i & \text{Bildspalte bzw. -zeile} \\ g & \text{Grauwert in korrigiertem Bild} \\ g' & \text{Grauwert in originalem Bild} \\ g_d & \text{Grauwert in dunklem Referenzbild} \\ g_h & \text{Grauwert in hellem Referenzbild} \\ r_d & \text{Konstanter dunkler Referenzwert} \end{array}$ 

 $r_h$  Konstanter heller Referenzwert

Zur Ermittlung des dunklen Referenzbildes wurde vor das Objektiv eine lichtundurchlässige schwarze Kunststoffscheibe geschoben und anschließend das Mittel aus 11 nacheinander aufgenommenen Dunkelbildern abgespeichert. Die Aufnahme des hellen Referenzbildes erfolgte nach dem Austausch der Kunststoffscheibe gegen einen Metallring mit aufgeklebtem Pergamentpapier analog. Mit der Sichelblende der Beleuchtung wurde die relative Bestrahlungsstärke zuvor auf ca. 80% eingestellt, da der Sensor ab diesem Wert erste Sättigungserscheinungen aufweist. Der konstante dunkle bzw. helle Referenzwert ergibt sich als der Mittelwert des jeweiligen Referenzbildes.

Abbildung 5.10 zeigt ein Bild mit dem vorgeschobenen Pergamentpapier bei 75% relativer Beleuchtungsstärke. Das Grauwertprofil von Spalte 350 aus diesem Bild ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Der Helligkeitsabfall zum Sensorrand hin ist deutlich zu erkennen. In den Zeilen von 0 bis ca. 100 weist der Sensor jedoch ein untypisches gegenläufiges Verhalten auf, das in allen Sensorspalten an derselben Stelle vorliegt und vermutlich herstellungstechnisch bedingt ist. Nach der radiometrischen Korrektur sind alle Fehlereinflüsse korrigiert und das Bild in Abbildung 5.12 weist die beabsichtigte gleichmäßige Signalintensität auf, die für ein homogenes Ansprechen der Kantenfilter über den gesamten Sensor notwendig ist. Abbildung 5.13 zeigt dies wieder für die Spalte 350.



Abb. 5.10: Unkorrigiertes Bild



Abb. 5.12: Korrigiertes Bild



Abb. 5.11: Profil Spalte 350 unkorrigiert



Abb. 5.13: Profil Spalte 350 korrigiert

# 5.4 Überstrahlungseffekte

54

Die Signalintensität eines Bildes hängt bei konstanter Beleuchtung vom Reflexionsvermögen des angestrahlten Objektes ab. Bei der Herstellung der Strichteilung wird auf das blanke Invarband zunächst eine schwarze und anschließend eine gelbe Lackschicht aufgebracht. Die schwarzen Striche entstehen durch Wegbrennen der gelben Schicht mit Hilfe eines Lasers. Die gelbe Schicht weist ein bedeutend stärkeres Reflexionsverhalten als die schwarze auf. Die Grundeinstellung der Beleuchtung muß daher so gewählt werden, daß einerseits Teilungsabschnitte mit überwiegendem Schwarzanteil ("gelbe Striche") nicht unterbelichtet werden, d.h. daß sie ein gutes Signal/Rausch-Verhältnis liefern, und andererseits Abschnitte mit überwiegendem Gelbanteil ("schwarze Striche") keine Überbelichtung durch starke Reflexion produzieren.

Im weiteren werden anhand eines mit ca. 95% relativer Beleuchtungsstärke absichtlich überbelichteten Kantenbildes (siehe Abbildung 5.14), die bei der praktischen Anwendung auftretenden Probleme illustriert. Im Bereich der hellen Kanten unterliegen die Pixel des Sensors am stärksten dem Blooming (siehe Abschnitt 3.2.4). Da die Beleuchtung kegelförmig auf die Strichteilung trifft, tritt dieser Effekt verstärkt zur Bildmitte hin auf. Gleichzeitig wird der Inhalt des Sensors im Bild nach oben hin ausgelesen, so daß eine Hell/Dunkel-Kante (H/D, von oben nach unten im Bild) in die bereits überquellenden Pixel hineinläuft und dadurch "eingedellt" wird. Bei einer Dunkel/Hell-Kante (D/H) können die "dunklen" Pixel zwischen Kante und Ausleseregister noch Ladung aufnehmen, so daß die Kante nur durch das Blooming der noch weiter vom Ausleseregister entfernten angrenzenden hellen Fläche zur Strichmitte hin deformiert wird, vor der sie quasi "davonläuft". Generell kommt es in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke zu einer immer stärkeren Deformation der eigentlich "geraden" Kanten.



Abb. 5.14: Kantendeformation durch Blooming und Smearing

Zur Bestätigung dieses Sachverhalts wurde dieselbe Szene wie in Abbildung 5.14 über einen Bereich von 5% bis 95% relativer Beleuchtungsstärke in 5%-Schritten mit jeweils 10 Bildern aufgenommen, die anschließend gemittelt wurden. Nach der Faltung dieser Bilder mit einem Kantenoperator wurden durch die detektierten Kantenpixel ausgleichende Geraden gelegt und deren kürzester Abstand gegenüber dem Sensorkoordinatensystem nach Formel (3.3) aus Abschnitt 3.2.1 berechnet. Dabei wurden nur Kanten verwendet, die durchgehend vom linken bis zum rechten Bildrand detektiert wurden. Aus diesem Grund sind in den Abbildungen 5.15 und 5.16 nur für Beleuchtungsstärken zwischen 20 und 75% Werte vorhanden. Die scheinbaren Verschiebungen der beiden Kanten sind auf den Wert bei 50% Beleuchtungsstärke zentriert. Bei wachsender Beleuchtungsstärke wandert die ausgleichende Gerade der H/D-Kante durch die Deformation erwartungsgemäß im Bild nach unten. Im Helligkeitsbereich zwischen 30 und 70% verläuft die scheinbare Verschiebung fast linear und beträgt ca. -0,5 Pixel, was bei einer Pixelgröße von  $12 \,\mu m$  und einem Abbildungsmaßstab von ca. 1:1, 6  $\mu m$  entspricht. Gleichzeitig wandert die D/H-Kante im Bild scheinbar um ca. 0,2 Pixel, oder  $pprox 2,5\,\mu m$  linear nach oben. Diese Zunahme erfolgt analog zur Theorie schwächer als die Abnahme der H/D-Kante. Ab 70% Bestrahlungsstärke ist bei beiden Kanten ein überproportionaler Versatz festzustellen. Daher sollte die Bestrahlungsstärke vor Beginn der Messung in einem gelben Bereich ohne Striche auf diesen Wert justiert werden. Weil dieser Bereich die maximale Reflexion aufweist, ist sichergestellt, daß die relative Beleuchtungsstärke bei konstanter Einstellung während der Messung 70% nicht überschreitet. Interessant wäre in diesem Zusammenhang auch eine weitere Untersuchung der Überstrahlungseffekte bei einer um 90° um die Objektivachse gedrehten Kamera. Theoretisch dürften die Strichkanten dann nur noch vom Blooming betroffen sein, weil das Smearing näherungsweise parallel zu den Kanten erfolgt.

Eine gleichmäßige Verteilung des Lichts läßt sich beleuchtungstechnisch durch Verwendung eines Konverters mit Teilerspiegel am Objektiv erreichen, der die Nutzung des ausgestrahlten Lichts ohne Verlust ermöglicht. Er wird anstelle des Standardkonverters am Objektiv montiert und besitzt einen Adapter zur Aufnahme ei-



Abb. 5.15: Scheinbare Verschiebung einer H/D-Kante

Abb. 5.16: Scheinbare Verschiebung einer D/H-Kante

nes Glasfaserkabels. Das Licht wird dann als sogenannte "Hellfeldbeleuchtung" achsparallel in den Beobachtungsstrahlengang des Objektivs zur schattenfreien Beobachtung eingespiegelt. Umfassende Darstellungen zum Thema Beleuchtung finden sich in [FRISCHKNECHT 1989, LENHARDT 1997].

# 5.5 Kantenschrittfehler

Um die qualitativen und vor allem quantitativen Eigenschaften der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Kantenoperatoren bei der praktischen Anwendung auf Strichkanten beurteilen zu können, wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. Sowohl eine H/D-Kante als auch eine D/H-Kante wurde im Vertikalkomparator in 0.25 mm-Schritten parallel verschoben und jeweils durch ein Bild der Kamera beobachtet, das radiometrisch nach dem oben vorgestellten Verfahren korrigiert wurde. Jeweils vor und nach einer Bildaufnahme wurden die als Referenz höherer Ordnung vom Laserinterferometer beobachteten Verschiebungsbeträge zur Ausschaltung eventueller dynamischer Abklingeffekte der Motorsteuerung registriert, anschließend gemittelt und meteorologisch korrigiert (siehe Abschnitt 2.2.4). Um die Kanten aus den Bildern zu extrahieren, wurden sowohl pixelgenaue Operatoren (siehe Abschnitt 5.5.1), als auch subpixelgenaue Operatoren (siehe Abschnitt 5.5.2) angewandt. Der kürzeste Abstand einer Kante gegenüber dem Sensorkoordinatensystem ergab sich nach dem in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Verfahren auf der Grundlage einer ausgleichenden Geraden. Zur Umrechnung des Abstandes vom Pixelmaß in das metrische System des Laserinterferometers, wurde der Abbildungsmaßstab für jede Kantenart und jeden Operator zunächst mit Hilfe des in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Verfahrens bestimmt. Ein Vergleich gegenüber dem Sollwert von 12  $\frac{\mu m}{Pixel}$  für den theoretischen Abbildungsmaßstab von 1:1 zeigte keine signifikant unterschiedlichen Ergebnisse, so daß dieser Maßstab einheitlich verwendet wurde. Aus den zentrierten und horizontierten Differenzen zwischen den metrischen Abstandsmaßen der Bilder und der Laserwerte folgen dann für jeden Kantentyp und Kantenoperator charakteristische Fehlerbilder. Da sich bei der Untersuchung der pixelgenauen Operatoren ein starker Einfluß der Beleuchtung auf das Ergebnis bemerkbar machte, wurde dies gesondert untersucht. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.5.3 dargestellt.

## 5.5.1 Pixelgenaue Kantenoperatoren

In einer ersten Untersuchungsreihe wurden die Kanten mit den pixelgenauen Operatoren DoB, CANNY, SHEN, DERICHE1, DERICHE 2, LoG und DoG extrahiert. Damit die Ergebnisse sich gegeneinander vergleichen lassen, wurden die jeweiligen Steuerparameter zur Beseitigung des Rauschens so gewählt, daß die Kanten durch die Operatoren mit der gleichen Zuverlässigkeit detektiert wurden. Streng genommen ist die mathematische Formulierung dieser Größe nur für die Operatoren von CANNY, SHEN und DERICHE möglich. Sie lautet nach [RADIG 1993] folgendermaßen:

$$ZUV'_{\text{CANNY}} = \frac{\sqrt{2\sigma_C}}{\sqrt[4]{\pi}} , \qquad ZUV'_{\text{SHEN}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_S}} ,$$

$$ZUV'_{\text{DERICHE1}} = \sqrt{\frac{2}{\alpha_{D1}}} , \qquad ZUV'_{\text{DERICHE2}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_{D2}}} .$$
(5.4)

Um eine kontinuierliche Detektion der Kanten vom linken bis zum rechten Bildrand in allen Bildern zu gewährleisten, wurde zunächst für den CANNY-Operator der Wert  $\sigma_C = 5$  empirisch bestimmt. Daraus folgt

mit Hilfe obiger Formeln für die anderen Operatoren  $\alpha_S = 0, 18, \alpha_{D1} = 0, 35$  und  $\alpha_{D2} = 0, 18$ . Da sich der LoG nach [RADIG 1993] nicht mit diesem Kriterium ausdrücken läßt, wurde nach visueller Inspektion  $\sigma_C = \sigma_{LoG} = 5$  gewählt. In Verbindung mit  $\sigma_f = 1, 6$  folgt daraus für den DoG-Operator nach Formel (4.37)  $\sigma_{DoG1} = 6, 4$  und  $\sigma_{DoG2} = 4, 0$ . Problematisch ist in diesem Zusammenhang der DoB-Operator, da er über keinen "internen" Parameter verfügt sondern das Rauschen nur gemäß seiner räumlichen Ausdehnung beseitigt. Die Maskenausdehnung wurde empirisch unter Berücksichtigung von Rauschbeseitigung und Verarbeitungsgeschwindigkeit zu 31 Pixel gewählt.

Die nach dem oben beschriebenen Verfahren bestimmten charakteristischen Fehlerbilder der verschiedenen Operatoren für beide Kantenarten, sind in den Abbildungen 5.17 bis 5.30 dargestellt. Für beide Kantenarten fällt bei allen Kantenoperatoren der "schüsselförmige" Verlauf des Fehlerbildes auf. Die Krümmung der Kurven ist jeweils entgegesetzt und entspricht damit der Verformung der Kanten in Richtung der Strichmitte. Die Schüssel-Form der Fehlerbilder ist prinzipbedingt und wird durch die Beleuchtung verursacht (siehe Abschnitt 5.4). Weil die D/H-Kante nur dem Blooming unterliegt, ist die Verformung des Fehlerbildes weniger stark ausgeprägt als für eine H/D-Kante, die zusätzlich noch dem Smearing unterliegt. Bei allen Operatoren variieren die Fehler visuell geschätzt mit Ausnahme des DoB im Bereich von weniger als  $\pm 2 \,\mu m$ , was  $\pm 0, 17 Pixel$  entspricht. Dieses Detektionsrauschen läßt sich beim DoB-Operator auf Kosten der Verarbeitungszeit durch eine Ausdehnung der Maske weiter verringern. Für alle Operatoren gilt aber, daß bereits bei Anwendung eines pixelgenauen Kantenoperators eine subpixelgenaue Bestimmung der Kantenposition durch die Berechnung einer ausgleichenden Gerade der detektierten Kantenpixel möglich ist.



Abb. 5.17: Fehlerbild DoB-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.19: Fehlerbild CANNY-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.21: Fehlerbild SHEN-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.18: Fehlerbild DoB-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.20: Fehlerbild CANNY-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.22: Fehlerbild SHEN-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.23: Fehlerbild DERICHE1-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.25: Fehlerbild DERICHE2-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.27: Fehlerbild LoG-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.29: Fehlerbild DoG-Operator, H/D-Kante



Abb. 5.24: Fehlerbild DERICHE1-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.26: Fehlerbild DERICHE2-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.28: Fehlerbild LoG-Operator, D/H-Kante



Abb. 5.30: Fehlerbild DoG-Operator, D/H-Kante

Um die Qualität der Detektion auch numerisch ausdrücken zu können, wurde für jedes Fehlerbild der beiden Kantenarten ein ausgleichendes Polynom mit willkürlich gewähltem Grad 2 berechnet (siehe Tabelle 5.1). Der daraus abgeleitete mittlere Gewichtseinheitsfehler  $\hat{\sigma}_0$  stellt eine Maßzahl für die Konsistenz des Fehlerbildes dar. Je kleiner dieser Wert ist, desto besser wird der "schüsselförmige" Verlauf realisiert. Unter der Berücksichtigung, daß die Steuerparameter der Operatoren teilweise unabhängig voneinander gewählt wurden, schneiden diejenigen Operatoren besser ab, die für die Kantenextraktion die erste Ableitung einer GAUß-Funktion verwenden.

Kantenoperator	$\hat{\sigma}_0  {f H}/{f D}  [\mu m]$	$\hat{\sigma}_0 \mathbf{D}/\mathbf{H} \ [\mu m]$
DoB	1,2687	$1,\!3893$
Canny	0,3756	$0,\!3983$
Shen	0,3785	0,4216
Deriche1	0,4017	$0,\!3778$
Deriche2	0,3558	$0,\!3985$
LoG	0,4499	$0,\!6323$
DoG	0,4349	$0,\!5168$

Tab. 5.1:Mittlere Gewichtseinheitsfehler der ausgleichenden Polynomezweiten Grades für die Fehler pixelgenauer Kantenoperatoren

## 5.5.2 Subpixelgenaue Kantenoperatoren

Da sich eine subpixelgenaue Detektion bereits mit pixelgenauen Algorithmen erreichen läßt, ist bei Verwendung von Subpixel-Algorithmen nur noch eine Verkleinerung des Detektionsrauschens und damit von  $\hat{\sigma}_0$  zu erwarten. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden die Kanten in einer weiteren Untersuchungsreihe mit dem Verfahren von STEGER (siehe Abschnitt 4.3) unter Verwendung der Operatoren von CANNY und DE-RICHE bearbeitet. Die Abbildungen 5.31 bis 5.36 und die Tabelle 5.2 für die mittleren Gewichtseinheitsfehler der ausgleichenden Polynome bestätigen diese Vermutung.



Kantenoperator	$\hat{\sigma}_0   \mathbf{H/D}  \left[ \mu m  ight]$	$\hat{\sigma}_0 \mathbf{D}/\mathbf{H} \ [\mu m]$
Steger/Canny	0,2330	0,3185
Steger/Deriche1	0,2209	0,3009
Steger/Deriche2	0,2856	0,3574

 Tab. 5.2:
 Mittlere Gewichtseinheitsfehler der ausgleichenden Polynome zweiten Grades für die Fehler subpixelgenauer Kantenoperatoren

Da alle Operatoren nach den bisher gezeigten Ergebnissen eine ähnliche Genauigkeit im Subpixel-Bereich liefern, kann für die Wahl des bei der Kalibrierung von Strichteilungen einzusetzenden Kantenoperators keine eindeutige Entscheidung getroffen werden. Diese hängt somit in erster Linie von der Verarbeitungsgeschwindigkeit im Anwendungsfall ab, die von der Hard- und Software des eingesetzten Bildverarbeitungssystem beeinflußt wird. Zu diesem Zweck wurden die ersten 242 Kanten einer LEICA-Barcodelatte jeweils mit einem Bild aufgenommen, was einem Lattenabschnitt von ca. 1,1 m vom Lattenfuß aus entspricht. Um Chancengleichheit zu gewähren, wurde der DoB-Operator aus der Wertung genommen, weil die HALCON-Bildverarbeitungssoftware in diesem Fall nicht wie bei den anderen Operatoren die Möglichkeit bietet, H/Dund D/H-Kanten in einem einzigen Verarbeitungsschritt zu detektieren. Die Zeitmessung beschränkte sich auf die Detektion der Kanten und ergab unter dem verwendeten INTEL PENTIUM II-400-Prozessor folgende Werte für die einzelnen Operatoren:

Kantenoperator	Zeit $[s]$	
Pixel-Genauigkeit		
Canny	105	
Shen	104	
Deriche1	106	
Deriche2	106	
LoG	179	
DoG	102	
Sub-Pixel-Genauigkeit		
Steger/Canny	121	
Steger/Deriche1	111	
Steger/Deriche2	110	

Tab. 5.3: Vergleich der Verarbeitungsgeschwindigkeiten

Die Untersuchungen zeigen, daß bei den pixelgenauen Verfahren der nichtrekursiv implementierbare Operator nach CANNY genauso schnell ist, wie die rekursiven SHEN- und DERICHE-Operatoren. Diese Homogenität gilt jedoch nicht mehr im Subpixelbereich. LoG- und DoG-Operator liefern die Extremwerte des Vergleichs. Während der LoG gegenüber den anderen mit Abstand am meisten Zeit benötigt, ist der DoG sogar noch geringfügig schneller als die zuvor genannten pixelgenauen Operatoren. Wird der Unterschied zwischen den pixel- und subpixelgenauen Verfahren mit Beteiligung des DERICHE-Operators vernachlässigt, stellt sich unter Berücksichtigung der oben aufgeführten mittleren Gewichtseinheitsfehler der STEGER/DERICHE1-Operator insgesamt am günstigsten dar.

Zur Steigerung der Verarbeitungsgeschwindigkeit in Richtung Online-Auswertung der Bilder bietet sich unter anderem an, dem Rechner in Zukunft mehr RAM-Arbeitsspeicher zur Verfügung zu stellen. Dadurch können die Bilder zur anschließenden Auswertung gleich im Arbeitsspeicher verbleiben und die Schreib- bzw. Lesezugriffe auf die Festplatte während einer Meßfahrt bzw. Auswertung entfallen. Zusätzliche Leistung bringt auch die Verwendung von höher getakteten Prozessoren, deren neueste Generation allerdings immer unverhältnismäßig teuer ist. Preiswerter ist dagegen die Verwendung eines zweiten Prozessors, einen entsprechenden Steckplatz im Rechner vorausgesetzt, wofür aber eine aufwendige sogenannte "Multi-Threaded"-Programmierung erforderlich ist, um beide Prozessoren parallel zu verwenden.

## 5.5.3 Uberstrahlungseffekte beim Kantenschrittfehler

Blooming und Smearing nehmen wegen der kegelförmigen Beleuchtung der Striche zum Bildrand hin ab. Wird die gesamte Kante abschnittsweise betrachtet, nimmt die Krümmung der Fehlerbilder theoretisch umso mehr ab, je näher die Abschnitte zum linken bzw. rechten Bildrand liegen. Diese Annahme wurde praktisch dadurch bestätigt, daß jeweils 256 Spalten des Sensors zu einem Abschnitt zusammengefaßt und mit Hilfe des STEGER/DERICHE1-Operators durch das zuvor beschriebene Verfahren ausgewertet wurden. Die Abbildungen 5.37 bis 5.44 zeigen die Fehlerbilder für jeden Abschnitt und Kantenart. Da für eine Messung möglichst viele Kantenpixel verwendet werden sollen, bietet sich als Gegenmaßnahme einerseits die nachträgliche rechnerische Korrektur anhand einer zuvor durchgeführten Kalibrierung an, oder die Beschränkung auf die Verwendung von Kanten innerhalb eines definierten Bildausschnitts.



Abb. 5.37: Fehlerbild H/D-Kante, Spalte 1-256



Abb. 5.39: Fehlerbild H/D-Kante, Spalte 257-512



Abb. 5.41: Fehlerbild H/D-Kante, Spalte 513-768



Abb. 5.43: Fehlerbild H/D-Kante, Spalte 769-1024



Abb. 5.38: Fehlerbild D/H-Kante, Spalte 1-256



Abb. 5.40: Fehlerbild D/H-Kante, Spalte 257-512



Abb. 5.42: Fehlerbild D/H-Kante, Spalte 513-768



Abb. 5.44: Fehlerbild D/H-Kante, Spalte 769-1024

# 6. Praktische Anwendung

Aufbauend auf die bis hierhin vorgestellten Untersuchungen wurde am Geodätischen Institut der Technischen Universität München ein hybrides Meßsystem zur Kalibrierung von Nivellierlattenteilungen in vertikaler Gebrauchsstellung konfiguriert. Es handelt sich um einen Prototypen, der zur praktischen Überprüfung des Meßprinzips im Rahmen des Gesamtsystems dient und in Hinblick auf Automatisierung und Bedienerfreundlichkeit noch weiterer Verbesserungen bedarf. Abschnitt 6.1 beschreibt den prinzipiellen Ablauf einer Messung von der Vorbereitung über die Meßfahrt bis zur Auswertung. Die numerischen Ergebnisse der Auswertung sind in Abschnitt 6.2 zusammengefaßt.

# 6.1 Meßablauf

### Vorbereitung

Vor Beginn einer Kalibrierung müssen Meßsystem und Prüfling zur Ausschaltung temperaturabhängiger Effekte, die das Meßergebnis beeinflussen, auf ein ausreichend konstantes Temperaturniveau akklimatisiert werden. Dazu gehört die Aufheizung aller elektronischen Komponenten durch rechtzeitige Inbetriebnahme vor der Messung und die Klimatisierung von Meßraum und Prüfling durch eine selbstregulierende Klimaanlage. Am Geodätischen Institut beträgt diese Zeitspanne bei Nivellierlatten aufgrund empirischer Erfahrungen ca. 2 Stunden.

Beim Einlegen der Latte in das U-Profil des Komparators durch einen geübten Operateur kann der Lattenkörper auf seiner gesamten Länge mit einer maximalen seitlichen Abweichung von  $\pm 1 mm$  bezüglich eines Fixpunktes ausgerichtet werden. Da die Führungsnut im Lattenkörper ein seitliches Spiel von  $\pm 1 mm$ zuläßt, richtet sich die Teilung bei unbeschädigten Latten in der vertikalen Position nach der Schwerkraft aus. Um auch Latten mit starken Gebrauchsspuren, z.B. einer Knickung des Lattenkörpers, kalibrieren zu können, kann durch seitliche Klemmschrauben am U-Profil bis zu einem gewissen Grad ein Zwang auf den Lattenkörper ausgeübt werden. Für diese "zurechtgebogenen" Latten kann natürlich von einer objektiven Kalibrierung in Gebrauchsstellung keine Rede mehr sein. Auch können von einem derart "mißhandelten" Präzisionsmeßzeug keine hochgenauen Ergebnisse mehr erwartet werden. Gegenwärtig wird eine Latte dann noch kalibriert, wenn die Abweichungen gegenüber einer unbeschädigten Latte nicht größer als 2 mm sind.

Für das Kamerasystem ist vor der Messung die in Abschnitt 5.3 beschriebene Kalibrierung zur radiometrischen Korrektur der aufgenommenen Bilder durchzuführen. Danach ist die Bestrahlungsstärke gegenüber einem Abschnitt der Teilung ohne schwarze Striche zur Vermeidung überproportionaler Überstrahlungseffekte während der Messung durch die Sichelblende der Beleuchtung auf ca. 70% einzustellen (siehe Abschnitt 5.4). In dieser Einstellung erfolgt anschließend die Bestimmung des Abbildungsmaßstabs zur Umrechnung der Pixelmaße in metrische Längeneinheiten über das in Abschnitt 3.2.1 dargestellte Verfahren. Zuletzt wird die Latte für die Meßfahrt über elektrische Endschalter am oberen und unteren Anschlag des Verfahrbereichs positioniert und der kontinuierliche Bildeinzug am PC gestartet.

### Meßfahrt

Nach dem Start der Meßfahrt über das Schnittstellenmodul IFC an der HP-Workstation (siehe Abschnitt 1.3), sendet der Endschalter beim Offnen einen elektronischen Impuls an den PC, der daraufhin die eingelesenen Bilder grob auf die Existenz von Kanten hin untersucht. Während der "Hinfahrt" wandern die Kanten vom Ausleseregister des Sensors weg, d.h. vom oberen zum unteren Bildrand. Um Verarbeitungszeit einzusparen, wird nur eine einzige Spalte in der Bildmitte betrachtet. Damit die Kantenpositionen in allen Bildern annähernd immer demselben Überstrahlungseffekt unterliegen, kann die Anzahl der verwendeten Spaltenpixel in Abhängigkeit von der Verfahrgeschwindigkeit, des Abbildungsmaßstabs und der Systemgeschwindigkeit des PCs, d.h. der Zahl der verarbeitbaren Bilder pro Zeiteinheit, verringert werden. Für den verwendeten Rechner ergab sich bei einer Verfahrgeschwindigkeit von ca.  $4.25 \frac{mm}{m}$  ein Bereich von minimal 150 Pixeln. Nach der Binarisierung der Grauwerte mit Hilfe eines fest programmierten, empirisch festgelegten Schwellwerts, wird eine Kante aufgrund des Zahlenwechsels erkannt. In diesem Fall wird das gesamte Bild auf der Festplatte gespeichert und ein Impuls an das Laserinterferometer zur Ausgabe eines Wertes an das IFC abgesetzt. Liegt im Bild dagegen keine Kante vor, wird das Bild verworfen. Die Speicherung erfolgt für die gesamte Meßfahrt ohne Kompression fortlaufend im Binärformat der Kamera, weil sich dadurch die maximale Schreibgeschwindigkeit der Festplatte ausnutzen läßt. Da das IFC über eine eigene Logik verfügt, können die verschiedenen meteorologischen Sensoren am Komparator parallel zur Speicherung der übertragenen Laserwerte elektronisch abgefragt werden. Das gesamte Registrierungsverfahren findet solange statt, bis

bei Erreichen des Endschalters am anderen Ende der Meßbahn ein Impuls an den PC und das IFC gesendet wird. Abschließend überträgt das IFC alle erfaßten Laser- und Meteorologiewerte zur HP-Workstation.

Um den Umfang der Kalibrierung zu vergrößern, ist zukünftig auch noch der Lattennullpunktsfehler zu bestimmen. Dazu muß der Meßbereich so vergrößert werden, daß die Kamera auch die auf dem Adapter (siehe Abschnitt 1.3) angebrachten Striche beobachten kann. Da der Abstand zwischen diesen Strichen und der Kugeloberkante des Adapters bekannt ist, läßt sich der gesuchte Abstand zwischen der Aufsatzfläche der Latte und dem Bezugsstrich auf der Teilung und damit die Abweichung gegenüber dem Soll berechnen. Problematisch ist, daß der Lattenfuß und die in diesem Bereich befindliche Schraube zur Einstellung der Zugspannung der Teilung bei der Verschiebung während der Meßfahrt zahlreiche falsche Kantensignale mit entsprechenden Bildern erzeugen.

### Auswertung

62

Die meteorologische Reduktion der Laserwerte nach Abschnitt 2.2.4 erfolgt auf der HP-Workstation parallel zur Bildverarbeitung auf dem PC. Aus den nach Abschnitt 5.3.2 radiometrisch korrigierten Bildern wird mit Hilfe des bereits bei der Messung verwendeten Schwellwerts zunächst eine Binärmaske mit verbreiterten Kantenbereichen erzeugt, wie dies in Abbildung 6.1 und 6.2 für ein unabhängig von der Kalibrierung aufgenommenens Bild dokumentiert ist.



Abb. 6.1: Radiometrisch korrigiertes Bild



Abb. 6.2: Binärmaske mit verbreiterten Kantenbereichen

Die Extraktion von Kanten aus dem korrigierten Bild mit dem eigentlichen Kantenoperator erfolgt nur noch im verbreiterten Bereich, der durch die zentralen 150 Pixel geht. Dieses Vorgehen ist für alle Operatoren schneller als die Faltung des gesamten Bildes. Beschädigte Kanten lassen sich durch den Vergleich benachbarter Maskenpixel in Zeilenrichtung leicht erkennen, da der Kantenverlauf dann entweder wellenförmige Deformationen oder sogar Lücken aufweist. Der Auswertealgorithmus sollte daher bei der Weiterentwicklung des Systems so verfeinert werden, daß versucht wird, diese beschädigten Kanten trotzdem auszuwerten. Dazu muß ein Kriterium gefunden werden, mit dem alle im Bild eventuell vorhandenen "Kantenbruchstücke" einander eindeutig, korrekt und zuverlässig zugeordnet werden können. Ein weiteres Kriterium muß darüber entscheiden, wie stark die Kanten deformiert sein dürfen bzw. welcher Abstand zwischen zwei Bruchstücken zulässig ist, damit die Kante trotzdem berücksichtigt wird. Durch die detektierten Kantenpixel wird eine ausgleichende Gerade gelegt und analog zu Formel (3.3) in Abschnitt 3.2.1 der kürzeste Abstand zum Ursprung des Sensorkoordinatensystems berechnet. Über den Abbildungsmaßstab ergibt sich der Abstand im metrischen System des Laserinterferometers. Die korrigierten Laserwerte werden zum PC übertragen und dort mit den ermittelten Abständen verknüpft. Nach der Zuordnung der Kanten gegenüber den Sollpositionen lassen sich die Kantenfehler bzw. aus dem Mittel je zweier Kanten die Strichpositionen und deren Fehler berechnen, aus denen das mittlere Lattenmeter abgeleitet wird.

# 6.2 Kalibrierungsergebnisse

Für die Messung wurde ein ca. 1,1*m* langes Stück einer LEICA-Barcode-Latte jeweils ohne und mit Schlittenbewegung während der Bildaufnahme bei Hin- und Rückfahrt, d.h. statisch und dynamisch gemessen. Die Kanten befanden sich bei der Aufnahme durch das Vorgehen von Abschnitt 6.1 näherungsweise in der Bildmitte. Für die Kantendetektion wurde der STEGER/DERICHE1-Operator verwendet. Abbildung 6.3 zeigt die Mittelwerte der Kantenfehler aus der statischen Hin- und Rückmessung.



Die negativen Fehler entsprechen den D/H-Kanten, die positiven den H/D-Kanten. Weil jeweils zwei dieser Fehler einem Strich zuzuordnen sind, entspricht der mittlere Abstand beider Fehlerkurven dem mittleren Fehler der Strichdicke, die im vorliegenden Fall um ca.  $\pm 25 \,\mu m$  zu dick sind. Eine Überprüfung durch visuelle Beobachtung mit einem Mikrometerokular bestätigte lediglich einen Wert von ca.  $\pm 14 \,\mu m$ . Die Differenz zwischen beiden Werten konnte nach den Untersuchungen in Abschnitt 5.4 nicht als Ursache von Überstrahlungseffekten erklärt werden, so daß hier weiterer Erklärungsbedarf besteht. Der Verlauf der aus den Kanten der Hin- und Rückmessung abgeleiteten mittleren Strichfehler in Abbildung 6.4 zeigt die Homogenität des Meßverfahrens. Gleiches gilt zwischen dem mittleren Lattenmeter der Hinmessung von  $-6, 69 \pm 0, 60 \,ppm$  und dem der Rückmessung von  $-6, 79 \pm 0, 60 \,ppm$ .

In den Abbildungen 6.5 und 6.6 ist jeweils derselbe Sachverhalt wie zuvor für die dynamische Messung dargestellt. Trotz des höheren Meßrauschens aufgrund der Bewegungsunschärfe ist der Kurvenverlauf der statischen Messung noch eindeutig zu erkennen. Als mittleres Lattenmeter ergibt sich in diesem Fall für die Hinmessung  $-5, 39 \pm 0, 88 \, ppm$  und für die Rückmessung  $-4, 16 \pm 1, 06 \, ppm$ . Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß auch die Meßgenauigkeit entsprechend der Bewegung während der Messung schlechter ausfällt. Während für diese bei der statischen Messung kein Unterschied bestand, ist sie bei der Rückmessung deutlich schlechter als bei der Hinmessung, was weitere Untersuchungen zur Klärung des Sachverhalts erfordert.



Zusätzlich zu diesem Vergleich wurde auch noch eine dynamische Kalibrierung der Teilung mit Hilfe eines elektronischen Meßmikroskops anstelle der Kamera durchgeführt. Die Messung erstreckte sich über die gesamte Länge der Teilung und verwendete nur 2,025 mm dicke Striche. Für die Hinmessung ergab sich als mittleres Lattenmeter  $-5,96 \pm 0,42 ppm$  und für die Rückmessung  $-4,83 \pm 0,41 ppm$ . Es zeigt sich somit eine gute Übereinstimmung der beiden Meßverfahren.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Ergebnisse der dynamischen Messung sich nicht signifikant von denen der statischen und der konventionellen Messung unterscheidet. Dabei wurden alle Striche unabhängig von ihrer Breite und die Strichkanten in ihrer gesamten auf den CCD-Sensor abgebildeten Länge für die Auswertung verwendet. Damit sind die drei bisherigen Problempunkte bei der CCD-gestützen Kalibrierung von Strichteilungen aus Abschnitt 1.2 als gelöst zu betrachten. Für den ständigen praktischen Einsatz ist das System hinsichtlich Automatisierung und Bedienerfreundlichkeit noch zu optimieren. Um die Leistungsfähigkeit zu testen, sollte die kurz- und langfristige Wiederholgenauigkeit durch entsprechende Messungen untersucht werden. Dies kann auch bei verschiedenen Verfahrgeschwindigkeiten erfolgen, um die Auswirkungen der Bewegungsunschärfe im Bild systematisch analysieren zu können und wenn möglich die Meßzeit zu verkürzen.

# Literaturverzeichnis

- [ABBÉ 1890] E. Abbé: Messapparate für Physiker, Zeitschrift für Instrumentenkunde, Jahrg. 10, 446-448.
- [ABMAYR 1994] W. Abmayr: Einführung in die digitale Bildverarbeitung, Teubner Verlag.
- [BALHORN et al. 1972] R. Balhorn, H. Kunzmann, F. Lebowsky: Frequency Stabilization of Internal-Mirror Helium-Neon Lasers, Applied Optics, 11/4, 742-744.
- [BALHORN et al. 1975] R. Balhorn, F. Lebowsky, D. Ullrich: Untersuchungen zur Beurteilung der Qualität von Strichmaßstäben hoher Präzision, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 85/4, 279–282.
- [BARTSCH 1987] H.-J. Bartsch: Taschenbuch mathematischer Formeln, Verlag Harri Deutsch,
- [BEHR 1989] F.-J. Behr: Einsatz von CCD-Kameras zur differentiellen Entzerrung photogrammetrischer Aufnahmen, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 356.
- [BENNING u. SCHWERMANN 1995] W. Benning, R. Schwermann: Automatic Orientation in Close Range Photogrammetry Using Straight Lines, Optical 3-D Measurement Techniques III, Wichmann Verlag, 181– 193.
- [BERZINS 1984] V. Berzins: Accuracy of Laplacian Edge Detectors, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 27, 195-210.
- [BEUTH 1993] K. Beuth: Elektronik 4 Digitaltechnik, Vogel Verlag.
- [BEYER 1987] H. Beyer: Some Aspects of the Geometric Calibration of CCD-Cameras, ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, 68-81.
- [BEYER 1992] H. Beyer: Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System, Eidgenössische Technische Hochschule – Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zürich, Mitteilungen Nr. 51.
- [BIBEL 1989] H.-H. Bibel: Universelles Bildverarbeitungs-System für industrielle Anwendungen Gerätetechnik und Anwendungsbeispiele, Bildverarbeitung – Forschen, Entwickeln, Anwenden, Technische Akademie Esslingen, 5.1–5.10.
- [BLUM 1996] A. Blum: Elektronisches Rauschen, B.G. Teubner.
- [BOLŠAKOV et al. 1985] V. Bolšakov, F. Deumlich, A. Golubev, V. Vasilev: *Elektronische Streckenmessung*, VEB Verlag für Bauwesen.
- [BRONSTEIN u. SEMENDJAJEW 1987] I. Bronstein, K. Semendjajew: Taschenbuch der Mathematik, Verlag Harri Deutsch.
- [BURT 1983] P. Burt: Fast Algorithms for Estimating Local Image Properties, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 21, 368-382.
- [CANNY 1986] J. Canny: A Computational Approch to Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/6, 679-698.
- [CASTAN u. SHEN 1990] S. Castan, J. Shen: Optimal Filter for Edge Detection Methods and Results, Lecture Notes on Computer Science, Springer Verlag, No. 427, 12–17.
- [J. CHEN et al. 1987] J. Chen, A. Huertas, G. Medioni: Fast Convolution with Laplacian-of Gaussian Masks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9/4, 584-590.
- [S.-S. CHEN 1987] S.-S. Chen: A Two-Dimensional Solution to the Problem of Zero-Crossings and Spatiotemporal Interpolation in Computer and Human Vision, First International Conference on Computer Vision, 476-480.
- [COLLET et al. 1986] M. Collet, L. Gabler, W. Kürzinger, G. Euler: Vergleich von Halbleiterbildaufnehmern: Interline-, XY- und Frame-Transfer-Konzept, Fernseh- und Kino-Technik, 40/9, 463-468.
- [DALSA 1995] DALSA Inc.: 1996-1997 Databook, Eigenverlag, Puchheim.

- [DÄHLER 1987] J. Dähler: Problems in Digital Image Aquisition with CCD Cameras, ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, 48–59.
- [DÄHLER 1988] J. Dähler: Probleme beim elektronischen Bildeinzug mit dem analogen Videosignal, Bildmessung und Luftbildwesen/Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 56/6, 205-217.
- [DERICHE 1987] R. Deriche: Optimal Edge Detection Using Recursive Filtering, First International Conference on Computer Vision, 501-505.
- [DERICHE 1990] R. Deriche: Fast Algorithms for Low-Level Vision, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12/1, 78-87.
- [EBNER 1998] H. Ebner: Vorlesungsskripten zur Photogrammetrie an der Technischen Universität München.
- [FICKER 1996] E. Ficker: Mündliche Mitteilungen, Fakultät für Maschinenbau, Lehrstuhl für Anlagen- und Apparatebau, Technische Universität München.
- [FRISCHKNECHT 1989] A. Frischknecht: Beleuchtungseinrichtungen für die industrielle Bildverarbeitung, Bildverarbeitung – Forschen, Entwickeln, Anwenden, Technische Akademie Esslingen, 10.1–10.18.
- [FRITSCH 1982] D. Fritsch: Entwurf zweidimensionaler nichtrekursiver Filter, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 275.
- [GERDES et al. 1993a] R. Gerdes, R. Otterbach, R. Kammüller: Kalibrierung eines digitalen Bildverarbeitungssystems mit CCD-Kamera, Teil 1: Modellbildung und Verfahren, Technisches Messen, 60/6, 255-261.
- [GERDES et al. 1993b] R. Gerdes, R. Otterbach, R. Kammüller: Kalibrierung eines digitalen Bildverarbeitungssystems mit CCD-Kamera, Teil 2: Implementierung und Fehleranalyse, Technisches Messen, 60/7+8, 283-288.
- [GERTHSEN et al. 1982] C. Gerthsen, H. Kneser, H. Vogel: Physik, Springer Verlag.
- [GODDING 1993] R. Godding: Ein photogrammetrisches Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung digitaler Bildaufnahmesysteme, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2, 82–90.
- [GOTTWALD 1995] R. Gottwald: Das Messlabor der Abteilung Vermessungswesen an der Ingenieurschule beider Basel, Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, Heft 11, 670-674.
- [GONZALEZ U. WOODS 1993] R. Gonzalez, R. Woods: Digital Image Processing, Addison-Wesley.
- [HABERÄCKER 1991] P. Haberäcker: Digitale Bildverarbeitung, Hanser Verlag.
- [HARALICK 1980] R. Haralick: Edge and Region Analysis for Digital Image Data, Computer Graphics, and Image Processing, Vol. 12, 60-73.
- [HARALICK 1984] R. Haralick: Digital Step Edges from Zero Crossing of Second Directional Derivatives, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/6, 58-68.
- [HARALICK U. SHAPIRO 1992] R. Haralick, L. Shapiro: Computer and Robot Vision I, Addison-Wesley.
- [HARALICK u. SHAPIRO 1992] R. Haralick, L. Shapiro: Computer and Robot Vision II, Addison-Wesley.
- [HAVELOCK 1989] D. Havelock: Optimal Estimation of Planar Position and Orientation, Optical 3-D Measurement Techniques, Wichmann Verlag, 470-482.
- [HEALEY U. KONDEPUDY 1994] G. Healey, R. Kondepudy: Radiometric CCD Camera Calibration and Noise Estimation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16/3, 267-276.
- [HEISTER 1988] H. Heister: Zur automatischen Kalibrierung geodätischer Längenmeßinstrumente, Hochschule der Bundeswehr – Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen, München, Heft 27.
- [HEISTER 1994] H. Heister: Zur Überprüfung von Präzisions-Nivellierlatten mit digitalem Code, Hochschule der Bundeswehr Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen, München, Heft 46, 95–101.
- [HEISTER 1996] H. Heister: Qualitätssicherung und Kalibrierung geodätischer Meßmittel, Ingenieurvermessung 96, Dümmler Verlag, C2/1-C2/9.

- [HERBST et al. 1976] H. Herbst, K. Knauer, R. Koch: CCD und CID Optoelektronische Halbleitersensoren für die Fernsehtechnik, Rundfunktechnische Mitteilungen, 21/2, 77-86.
- [HERNLA 1996] M. Hernla: Meßunsicherheit und -fähigkeit, Qualität und Zuverlässigkeit, 41/10, 1156-1162.
- [HERNLA U. NEUMANN 1997] M. Hernla, H. Neumann: Einfluß der Temperatur auf die Längenmessung, Qualität und Zuverlässigkeit, 42/4, 464–468.
- [HP5527A/B 1996] HEWLETT-PACKARD: HP5527A/B Laser Position Transducer Designers Guide, Handbuch.
- [HOFFMANN 1998] J. Hoffmann: Taschenbuch der Meßtechnik, Fachbuchverlag Leipzig.
- [HOFFROGGE u. LEBOWSKY 1969] C. Hoffrogge, F. Lebowsky: Ein neuer Interferenz-Komparator zum Prüfen von Strichmaßstäben, Physikalisch-Technische Bundesanstalt – Mitteilungen, Heft 1, 1-9.
- [HUECKEL 1971] M. Hueckel: An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures, Journal of the Association for Computing Machinery, 18/1, 113-125.
- [HUERTAS u. MEDIONI 1986] A. Huertas, G. Medioni: Detection of Intensity Changes with Subpixel Accuracy Using Laplacian-Gaussian Masks, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/5, 651-664.
- [INGENSAND 1990] H. Ingensand: Das WILD NA2000, das erste Digitalnivellier der Welt, Allgemeine Vermessungsnachrichten, Heft 6, 201-210.
- [IUGG 1963] Berichte zur XIII. Generalversammlung der IUGG, Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft 12.
- [JAHNE 1997] B. Jähne: Digitale Bildverarbeitung, Springer Verlag.
- [JÄHNE 1999] B. Jähne: Gut beleuchtet ist halb gemessen, Qualtität und Zuverlässigkeit, 44/10, 1283–1287.
- [KAHMEN 1978] H. Kahmen: Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie, Wichmann Verlag.
- [KAHMEN u. MENTES 1993a] H. Kahmen, G. Mentes: Methods of Increasing the Resolution of Displacement Transducers Made by CCD Line Image Sensors, Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, 315-321.
- [KAHMEN u. MENTES 1993b] H. Kahmen, G. Mentes: Precise Determination of the Step-Response Function of CCD Line Image Sensors, Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, 179-185.
- [KLETTE u. ZAMPERONI 1995] R. Klette, P. Zamperoni: Handbuch der Operatoren für die Bildverarbeitung, Vieweg Verlag.
- [KOCH 1983] R. Koch: Flächenhafte Halbleiter-Bildsensoren, Rundfunktechnische Mitteilungen, 27/5, 213– 224.
- [König 1985] S. König: Neue Entwicklungen bei Halbleiter-Bildsensoren, Fernseh- und Kino-Technik, 39/1, 6-10.
- [KREMERS 1995] M. Kremers: Vernieuwde kalibratiebank voor (invar-)waterpasbaken, NGT Geodesia, Heft 6, 297-303.
- [KUCHLING 1988] H. Kuchling: Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch.
- [LENHARDT 1997] K. Lenhardt: Optische Systeme in der (3D-)Meßtechnik für Aufnahme und Beleuchtung, Bildverarbeitung – Forschen, Entwickeln, Anwenden, Technische Akademie Esslingen, 303–332.
- [LENZ 1988] R. Lenz: Videometrie mit CCD-Sensoren und ihre Anwendung in der Robotik, Habilitationsschrift, München.
- [LENZ 1989] R. Lenz: Gewinnung von Bilddaten mit CCD-Sensoren in der Videometrie, Bildverarbeitung Forschen, Entwickeln, Anwenden, Technische Akademie Esslingen, 8.1–8.13.
- [R. LENZ U. U. LENZ 1993] R. LENZ, U. LENZ: New Developments in High Resolution Image Acquisition with CCD Area Sensors, Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, 53-62.

- [LENZ 1987] R. Lenz: Lens Distortion Corrected CCD-Camera Calibration with Co-Planar Calibration Points for Real-Time 3D Measurements, ISPRS Intercommision Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, 60-67.
- [LINDEBERG 1994] T. Lindeberg: Scale-Space Theory in Computer Vision, Kluwar Academic Publishers.
- [LUHMANN 1986] T. Luhmann: Ein Verfahren zur rotationsinvarianten Punktbestimmung, Bildmessung und Luftbildwesen, 54/4, 147–154.
- [LUHMANN 1988] T. Luhmann: Ein hochauf lösendes automatisches Bildmeßsytem, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 154.
- [LUHMANN 1991] T. Luhmann: Aufnahmesysteme für die Nahbereichsphotogrammetrie, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 3, 80-87.
- [LUHMANN u. WESTER-EBBINGHAUS 1987] T. Luhmann, W. Wester-Ebbinghaus: On Geometric Calibration of Digitized Video Images of CCD Arrays, ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, 35-47.
- [LUNSCHER u. BEDDOES 1986a] W. Lunscher, M. Beddoes: Optimal Edge Detector Design I: Parameter Selection and Noise Effects, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/2, 164-177.
- [LUNSCHER u. BEDDOES 1986b] W. Lunscher, M. Beddoes: Optimal Edge Detector Design II: Coefficient Quantization, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/2, 178-187.
- [MACHUCA u. GILBERT 1981] R. Machuca, A. Gilbert: Finding Edges in Noisy Scenes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 3/1, 103-111.
- [MAALEN-JOHANSEN 1993] I. Maalen-Johansen: On the Precision of Subpixel Measurements in Videometry, Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, 169–178.
- [MAAS 1993] H.-G. Maas: Destriping of Digital Images, ISPRS Commission I Workshop, Trento, 290-299.
- [MARR u. HILDRETH 1980] D. Marr, E. Hildreth: *Theory of Edge Detection*, Royal Society of London, Vol. B 207, 187-217.
- [MARZAHN 1957] K. Marzahn: Untersuchungen an Invarband-Nivellierlatten, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 22.
- [MAURER 1983] W. Maurer: Ein interferometrisches Meßverfahren zur Bestimmung von Strichverbessungen an eingebauten Theodolitteilkreisen, Dissertation, München.
- [MAURER u. SCHNÄDELBACH 1987] W. Maurer, K. Schnädelbach: Zur Kalibrierung geodätischer Präzisionsinstrumente mit dem Laser-Interferometer HP 5526A, Determination of Heights and Heights Changes, Dümmler Verlag.
- [MAURER u. SCHNÄDELBACH 1995] W. Maurer, K. Schnädelbach: Ten Years Experience in Calibrating Invar Levelling Staffs, Vortrag, First International Symposium on Application of Laser Techniques and Mine Surveying, Ljubljana.
- [MÄUSL 1991] R. Mäusl: Fernsehtechnik, Hüthig Verlag.
- [MEISSL u. SCHMID 1995] A. Meissl, C. Schmid: Automated Calibration of Levelling Rods and Scalebars, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 5W1, 300-305.
- [MELEN u. BALCHEN 1994] T. Melen, J. Balchen: Modelling and Calibration of Video Cameras, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 30, Part 3/2, 569-577.
- [MENTES u. KAHMEN 1995] G. Mentes, H. Kahmen: Investigation of Displacement Transducers Built by Means of CCD Image Line Sensors, Optical 3-D Measurement Techniques III, Wichmann Verlag, 149-158.

[MEYBERG u. VACHENAUER 1997] K. Meyberg, P. Vachenauer: Höhere Mathematik I, Springer Verlag.

[MEYBERG U. VACHENAUER 1997] K. Meyberg, P. Vachenauer: Höhere Mathematik II, Springer Verlag.

- [NALWA u. BINFORD 1986] V. Nalwa, T. Binford: On Detecting Edges, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/6, 699-714.
- [NAUMANN u. SCHRÖDER 1987] H. Naumann, G. Schröder: Bauelemente der Optik, Carl Hanser Verlag.
- [PARKER 1997] J. Parker: Algorithms for Image Processing and Computer Vision, Wiley Computer Publishing.
- [PESCHEL 1938] H. Peschel: Untersuchungen von Invarnivellierlatten der Firma C.ZEISS, Zeitschrift für Instrumentenkunde, Heft 2, 62–77.
- [PESCHEL 1963] H. Peschel: Komparator für Invarband-Nivellierlatten, Vermessungstechnik, Heft 8, 283–289.
- [PHOTOMETRICS 1989] PHOTOMETRICS Ltd.: Charge-Coupled Devices for Quantitative Electronic Imaging, Eigenverlag.
- [PROFOS U. PFEIFER 1992] P. Profos, T. Pfeifer: Handbuch der industriellen Meßtechnik, Oldenbourg Verlag.
- [PRICE u. PRZYBYLA 1988] G. Price, H. Przbyla: CCD-Kameras für professionelle Anwendungen, Fernsehund Kino-Technik, 42/9, 423-428.
- [PRZYBYLA 1989] H. Przybyla: CCD-Kameras für professionelle Anwendungen Entwicklungsstand und Ausblick, Rundfunktechnische Mitteilungen, 33/1, 18-26.
- [PTB 1978] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: 5. PTB-Seminar Längenmeßtechnik, PTB-Me-19.
- [RADIG 1993] B. Radig: Verarbeiten und Verstehen von Bildern, Oldenbourg Verlag.
- [RENYAN 1993] G. Renyan: Linejitter Detection of CCD Cameras, Optical 3-D Measurement Techniques II, Wichmann Verlag, 239-246.
- [RÜGER et al. 1987] W. Rüger, J. Pietschner, K. Regensburger: *Photogrammetrie*, VEB Verlag für Bauwesen.
- [SCHELLEIN 1993] H. Schellein: Kalibrierung und Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Invarlatten, Die Wiederholungsmessungen 1980 bis 1985 im deutschen Haupthöhennetz und das Haupthöhennetz 1985 der Bundesrepublik Deutschland, Bayerisches Landesvermessungsamt, München.
- [SCHIRMER 1994] W. Schirmer: Universaltheodolit und CCD-Kamera ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 427.
- [SCHLEMMER 1975] H. Schlemmer: Laser-Interferenzkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 210.
- [SCHLEMMER 1983] H. Schlemmer: A new Technique to Produce Precise Graduations on Invar Tape, Precise Levelling, Dümmler Verlag, 119–125.
- [SCHLEMMER 1996] H. Schlemmer: Grundlagen der Sensorik, Wichmann Verlag.
- [SCHMID 1995] C. Schmid: Automatisierte Nivellierlattenkalibrierung für Strich- und Codeteilungen, Eidgenössische Technische Hochschule – Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zürich, Bericht 244.
- [SCHMIDT 1993] F. Schmidt: 2D-Industriemeβtechnik mit CCD-Sensoren, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Heft 2, 62-70.
- [SCHNÄDELBACH 1998] K. Schnädelbach: Vorlesungsskripten zur Vermessungskunde an der Technische Universität München.
- [SCHRÖDER 1984] G. Schröder: Technische Optik, Vogel Buchverlag.
- [SCHUHMANN u. THÖNIB 1998] R. Schuhmann, T. Thöniß: Telezentrische Systeme für die optische Meß- und Prüftechnik, Technisches Messen, 65/4, 131–136.
- [SCHWERMANN 1995] R. Schwermann: Geradengestützte Bildorientierung in der Nahbereichphotogrammetrie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule – Geodätisches Institut, Aachen, Veröffentlichung Nr. 52.

[SCHWARZ 1995] W. Schwarz: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau, Wittwer Verlag.

- [SEITZ 1988] P. Seitz: Optical Superresolution Using Solid-State Cameras and Digital Signal Processing, Optical Engineering, 27/7, 535-540.
- [SEITZ U. RAYNOR 1989] P. Seitz, J. Raynor: Optische Überauflösung mit CCD-Kameras und digitaler Signalverarbeitung, Optical 3-D Measurement Techniques, Wichmann Verlag, 35-46.
- [SHANMUGAM et al. 1979] K. Shanmugam, F. Dickey, J. Green: An Optimal Frequency Domain Filter for Edge Detection in Digital Pictures, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1/1, 37-49.
- [SHEN u. CASTAN 1992] J. Shen, S. Castan: An Optimal Linear Operator for Step Edge Detection, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 54/2, 112-133.
- [SPREEUWERS u. VAN DER HEIJDEN 1992] L. Spreeuwers, F. van der Heijden: An Edge Detector Evaluation Method Based on Average Risk, Robust Computer Vision, Wichmann Verlag, 79-89.
- [STEGER 1998a] C. Steger: Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images, Dissertation, Fakultät für Informatik, TU München, Herbert Utz Verlag.
- [STEGER 1998b] C. Steger: An Unbiased Detector of Curvilinear Structures, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 20/2, 113-125.
- [STEGER 1998c] C. Steger: Analytical and Empirical Performance of Subpixel Line and Edge Detection, Empirical Evaluation Methods in Computer Vision, IEEE Computer Society Press, 188-210.
- [TABATABAI u. MITCHELL 1984] A. Tabatabai, O. Mitchell: Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6/2, 188-201.
- [TAGARE u. DEFIGUEIREDO 1990] H. Tagare, R. deFigueiredo: On the Localization Performance Measure and Optimal Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12/12, 1186-1190.
- [TAKALO 1997] M. Takalo: Automated Calibration of Precise Levelling Rods in Finland, Reports of the Finnish Geodetic Institute, 97/3.
- [THOMSON 1995] THOMSON Bauelemente GmbH: The CCD Image Sensor, Eigenverlag.
- [TIAN u. HUHNS 1986] Q. Tian, M. Huhns: Algorithms for Subpixel Registration, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Vol. 35, 220-233.
- [TILLE 1984] R. Tille: Einige Moderne Verfahren zur Kalibrierung von Nivellierlatten, Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen – Hochschule der Bundeswehr, München, Heft 10, 221–233.
- [TORRE u. POGGIO 1986] V. Torre, T. Poggio: On Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/2, 174-163.
- [TRADOWSKY 1986] K. Tradowsky: Laser, Vogel Verlag.
- [UFFENKAMP 1995] V. Uffenkamp: Konzeption, experimentelle Realisierung und Kalibrierung einer optoelektronischen Schwenk-Neige-Kamera langer Brennweite, Deutsche Geodätische Kommission, München, Reihe C, Nr. 442.
- [VDI 1985] Verband Deutscher Ingenieure Bericht 548: Dokumentation Laserinterferometrie in der Längenmesstechnik, VDI Verlag.
- [WELLS 1986] W. Wells III: Efficient Synthesis of Gaussian Filters by Cascaded Uniform Filters, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8/2, 234-239.
- [WESTER-EBBINGHAUS 1987] W. Wester-Ebbinghaus: Ingenieur-Photogrammetrie Neue Möglichkeiten, Bund Deutscher Vermessungsingenieure – Forum, Heft 4, 193–213.

# Dank

Dieses Werk ist das Produkt langer harter Arbeit, bei der zuerst und zuletzt der eigene Wille stand. Aus diesem Grund werde ich mich nicht in die Reihe derer einordnen, die in ihren Schriften an dieser Stelle Gott und die Welt erwähnen. Stattdessen möchte ich meinen Dank auf vier Personen beschränken: Zum einen Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach und Herrn Professor Dr.-Ing. Helmut Mayer für die Übernahme des ersten bzw. zweiten Berichts und zum anderen Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Maurer, Leiter der Meßtechnik am Geodätischen Institut der TU München, der mit mir von Anfang an die Vision einer Dissertation mit diesem Thema teilte und Herrn Helmut Schreyer, Hauptwerkmeister und Leiter der mechanischen Werkstatt am Geodätischen Institut, auf den ich mich immer verlassen konnte.