DGK Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 638

Peter Wasmeier

Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter

München 2009

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck



Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 638

Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter

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

von

Dipl.-Ing. Peter Wasmeier

München 2009

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

🕅 дак

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D - 80 539 München Telefon +49 - 89 - 23 031 1113 • Telefax +49 - 89 - 23 031 - 1283 / - 1100 e-mail hornik@dgfi.badw.de • http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. St. Winter Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich 2. Prof. Dr.-Ing. O. Altan, Istanbul Teknik Üniversitesi/Türkei

Die Dissertation wurde am 22. April 2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 22. Mai 2009 angenommen.

© 2009 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

Das ingenieurgeodätische Instrumentarium der Tachymetrie hat sich in den vergangenen Jahren stetig zum Multi-Sensor-System fortentwickelt. Aktuell sind am Markt die ersten Geräte zu beobachten, die auch auf die Nutzung von Bildinformationen setzen. Bei weiterer konsequenter Entwicklungsarbeit ist für die nächste Zukunft folglich mit der Integration photogrammetrischer Verfahren in den Arbeitsabläufen der Ingenieurgeodäsie zu rechnen. Für präzise Anwendungen auf Basis der Messung im Tachymeterbild, wie sie die Aufgaben der Deformationsbestimmung erfordern, sind die zur Zeit verfügbaren kommerziellen Instrumente noch nicht geeignet, wohl existieren aber verschiedene Prototypen als Machbarkeitsstudien.

Diese Arbeit gibt einen ersten Einblick in die Grundlagen und Möglichkeiten der neuen Hybridgeräte unter dem Aspekt des vollständigen bzw. weitgehenden Verzichts auf Zielpunktsignalisierung. Ein geeigneter Prototyp der Firma Leica Geosystems wird vorgestellt und die notwendigen Kalibrierungsschritte zur Kombination von Tachymeterfunktionalität und Bildinformation werden durchgeführt. Die Bestimmung der Parameter für die wechselseitigen Transformationsvorschriften gelingt mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Weitere Untersuchungen des Genauigkeitspotentials und eventueller Einflüsse durch die Kameraimplementierung beziehen sich im Anschluss auf Auflösungsvermögen, Reproduzierbarkeit und Kontinuität bei unterschiedlichen kombinierten Fernrohrausrichtungen sowie auf gegenseitige Beeinflussungen der Komponenten. Es erfolgt eine gesonderte Betrachtung von Detektionsalgorithmen unter dem Einfluss der Refraktion, welche als problematische Größe der Videotachymetrie identifiziert und quantifiziert wird. Es wird dabei nachgewiesen, dass die Messungen mit bildgebenden Tachymetern unter kontrollierten Bedingungen jedoch mindestens die Genauigkeiten herkömmlicher Instrumente erzielen können. Videotachymetrie ist daher insbesondere als Indoor- und Nahbereichsverfahren zu verwenden.

Automatisierte Nutzung der Videotachymetrie setzt funktionelle und zuverlässige Algorithmen der Bildbe- und -verarbeitung sowie der Bildanalyse voraus. Die dazu im ingenieurgeodätischen Kontext bisher wenig verbreiteten Grundlagen, insbesondere im Hinblick auf Zielpunkt- und Objekterkennung, werden zusammengefasst und im Hinblick auf die Detektion von Punktbewegungen bewertet. Da die Abbildung einer räumlichen Szene auf eine Ebene immer mit Informationsverlust verbunden ist, werden Möglichkeiten untersucht, diese durch zusätzliche Kenntnis über beobachtete Bewegungsabläufe aus den ausgewerteten Bildern zu rekonstruieren. Es wird nachgewiesen, dass für einzelne räumliche Deformationsmodelle auf die Messung der meisten Strecken zu den Objektpunkten verzichtet werden kann, wenn ausreichend verteilte Richtungen aus Messbildern vorliegen. Weiterhin wird ein Ausschnitt der Einsatzmöglichkeiten der Videotachymetrie zur Messung von Objekt- oder Punktbewegungen gegeben.

Abstract

Tacheometry as an instrument of engineering surveying steadily advanced to a multi-sensor system in recent years. At present, first instruments using image information can be seen on the market. Assuming further consequent development, one will face the integration of photogrammetric methods in engineering surveying operations in the near future. Actual instruments are not yet suitable for performing precision-demanding applications like deformation measurement based on their acquired images, but prototypes to do so exist as feasibility studies.

This thesis delivers a first insight into basics and possibilities of the new hybrid instruments with special respect to the complete or at least wide abdication of target signalling. An adequate prototype from Leica Geosystems is presented and the necessary calibration steps to combine tacheometer functionality and image acquisition are performed. Detection of parameters for the two-way transformation is done with high accuracy and reliability. Further analysis of the accuracy potential and possible influences due to the camera implementation apply to measurement resolution, repeatability and continuity at various combined telescope directions as well as to mutual interference of the sensors. Detection algorithms are separately examined under the impact of refraction effects, which can be identified and quantified as crucial factor of video tacheometry. It is shown that image derived measurements achieve at least as good results as conventional instruments under controlled circumstances. Video tacheometry therefore is especially to be used in indoor and close-range applications.

For using video tacheometry widely automated, functional and stable algorithms for image editing and processing as well as image analysis are required. Being only rarely used in engineering surveying by today, the basic principles on target and object recognition become summarized and evaluated with respect to displacement detection. As mapping of a spatial scene on an image plane is always associated with information loss, it is searched for possibilities to reconstruct those using additional knowledge about the observed displacement process. It is shown that for some spatial displacement models one can do without most of the distance measurements to the object points, if sufficiently distributed bearing measurements can be obtained. Furthermore some possible applications of video tacheometry on object and point displacement monitoring are shown in examples.

Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung			9	
	1.1	1 Hintergrund				
	1.2	Aufba	ı der Arbeit		10	
	1.3	Ausga	ngssituation und bestehende Sy	steme	11	
		1.3.1	Obsolete Lösungen $\ .$		11	
		1.3.2	Aktuelle kommerzielle Lösunge	n	12	
		1.3.3	Wissenschaftliche Forschung .		13	
2	Der	Protot	yp IATS2		17	
	2.1	Komp	onenten		17	
		2.1.1	Basis instrument TCRA1201+ $$		17	
		2.1.2	Okularkamera		18	
		2.1.3	Fokusmotor		20	
		2.1.4	Steuerrechner		21	
	2.2	Softwa	re		21	
		2.2.1	Externe Bibliotheken		21	
		2.2.2	Bildausschnitt		22	
		2.2.3	$Steuerprogramm \ . \ . \ . \ .$		22	
3	Kali	brierve	fahren		25	
	3.1	Grund	lagen		25	
		3.1.1		25		
			3.1.1.1 Primäre Achsfehler .		25	
			3.1.1.2 Temperaturabhängig	xeit der Achsfehler	26	
			3.1.1.3 Justierung der EDM-	Achsen	28	
			3.1.1.4 ATR-Kalibrierung .		28	
			3.1.1.5 Variabilität der Korre	ekturparameter	30	
3.1.2 Kamerakalibrierung					31	
			3.1.2.1 Innere Orientierung		31	
			3.1.2.2 Verdrehungen der Bil	debene	32	
			3.1.2.3 Entfernungsabhängig	e Fokuseinstellung	33	
	3.1.3 Kombinierte Kamera-Tachymeter-Kalibrierung				34	
			3.1.3.1 Äußere Orientierung		34	
			3.1.3.2 Das virtuelle Passpur	ktfeld	35	
	3.2	Kalibr	erabläufe		37	
		3.2.1	Kollimatorprüfung		37	

		3.2.2	Die Kalibrierung nach Vogel
			3.2.2.1 Vorgehensweise nach Vogel
			3.2.2.2 Ergebnisse nach Vogel
		3.2.3	Die Kalibrierung nach Walser
			3.2.3.1 Vorgehensweise nach Walser
			3.2.3.2 Vergleich mit dem Ansatz nach Vogel
			3.2.3.3 Ergebnisse nach Walser
		3.2.4	Verifikation der Kalibrierung 48
		3.2.5	Abschlussbetrachtung zur Kalibrierung
^	ם:וח		itume eur Zieleurslatelatien E1
4		Verarbe	Strung zur Zielpunktdetektion SI
	4.1	vorvei	Tarbeitung
		4.1.1	Hotpixel-Korrektur
		4.1.2	Histogrammanpassung
		4.1.3	Farbanpassung
		4.1.4	Rauschunterdrückung durch Glättung
			4.1.4.1 Mittelung
			$4.1.4.2 \text{Gleitender Mittelwert} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $
			$4.1.4.3 \text{Median} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $
		4.1.5	Segmentierung
	4.2	Merkr	nalsextraktion
		4.2.1	Textur
		4.2.2	Kanten
		4.2.3	Geometrie
	4.3	Match	ing
		4.3.1	Intensitätsbasiertes Matching
		4.3.2	Formbasiertes Matching
		4.3.3	Komponentenbasiertes Matching
		4.3.4	3D-Matching
	4.4	Zusan	nmenfassung der Vorgehensweise
5	Gen	auiokei	tspotential 69
•	5.1	Defini	tionen
	5.2	Tachy	meter
5.3		Kame	ra
	0.0	531	Auflösungsvermögen 70
		532	Reproduzierbarkeit 75
		0.0.4	5.3.2.1 Thermische Stabilität 75
			5.3.2.2 Wiederholgenauigkeit der Bildmessung 70
		533	Üherlannende Messungen 83
		534	Schärfentiefe 84
		525	Refraktionseffekte
		0.0.0	- IOHOROHOHOHOHOLOV

В	Abk	ürzungsverzeichnis	146			
	A.3	Ableitungen polarer Beobachtungsgleichungen bei einer Ähnlichkeitstransformation	144			
	A.2	Formelsatz von Walser	142			
	A.1	Formelsatz von Vogel	140			
Α	Forr	nelsätze	140			
Aı	nhän	ge	139			
Lit	teratı	urverzeichnis	131			
	7.3	Ausblick	128			
	7.2	Beurteilung	127			
	7.1	Zusammenfassung	125			
7	Wertung und Ausblick 12					
		6.4.4 Schwingungsmessung	123			
		6.4.3 Schadenskartierung	121			
		6.4.2 Lasersysteme	120			
	0.1	6.4.1 Formvermessung	118			
	6.4	Verwandte Anwendungsbereiche	118			
		6.3.2 Weitere Verformungsmodelle	116			
		6.3.1.2 Genauigkeitsbetrachtungen	11/			
		6.3.1.1. Konfigurationon mit reduzierter Distanzanzahl	109			
	6.3	Kompination von 3D- und 2D-Messungen 6.2.1 Videotechumetrie hei den 2D Ähnlichleitstrensformettien	108			
	0.0	6.2.5 Makstabsanderungen	108			
		6.2.4 Biegungen und Torsionen	105			
		6.2.3 Dehnungen und Scherungen	104			
		6.2.2 Rotationen	101			
		6.2.1 Translationen	99			
	6.2	Abbildung von Deformationen im Kamerabild	98			
	6.1	Charakterisierung von Deformationen	98			
6	Defe	ormationsbestimmung	97			
	5.5	Zusammenfassung der Genauigkeitsbetrachtungen	95			
	5.4	Fokusmotor	94			
		5.3.5.4 Referenzziele	93			
		5.3.5.3 Schwellwertalgorithmen	92			
		5.3.5.2 Farbinformation und synthetische Modelle mit Skalierung	90			
		5.3.5.1 Abhängigkeit von der Modellgröße und natürliche Modelle	88			

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die Entwicklung der Tachymetrie als geodätisches Messverfahren wurde im Lauf der letzten Jahre stark durch die Integration zusätzlicher Sensoren geprägt. Die Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung gehört mittlerweile zur Standardausstattung, und die Instrumente des gehobenen Preissegements aller bedeutenden Hersteller bieten heute auch eine GPS-Schnittstelle. Einzelne Produktlinien wurden zudem mit einer Scan-Funktion für kleinflächige Messungen mit geringer Punktzahl ausgestattet. Parallel dazu nimmt die Anzahl der Instrumente mit integrierter Kamera zu, die eine Darstellung des aktuellen Fernrohrbilds oder eines Übersichtsbilds direkt am Display bzw. an einer Fernsteuerungseinheit ermöglichen. Die entsprechenden Funktionalitäten dienen derzeit ausschließlich dazu, den Messablauf angenehmer zu gestalten bzw. zeitsparend zu dokumentieren; für die Zukunft sind jedoch Anwendungsszenarien zu erwarten, die auf die aktive Messung mittels tachymetrischer Kamerabilder aufbauen werden. Der dazu notwendige, logische und konsequente nächste Schritt ist die Kombination der tachymetrischen Messung mit Prinzipien und Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie sowie der Bildanalyse und des Bildverstehens.

Diese Vorgehensweise erweitert das Einsatzspektrum der Tachymetrie hinsichtlich der Automatisierung von Präzisionsmessungen in unterschiedlicher Weise:

- Eine Signalisierung von Zielpunkten mit aktiven oder retroreflektierenden Markierungen oder Prismen ist nicht mehr notwendig. Die Signalisierung kann entweder passiv ausgeprägt sein oder sogar vollständig entfallen, wenn der Zielpunkt selbst oder dessen Umfeld ausreichend Textur aufweisen. Dies gilt sogar für Zielpunkte, die physikalisch nicht signalisiert werden können, z. B. Mittelpunkte von Bohrungen. Beliebige Zielpunkte können so automatisiert angefahren werden. Durch den Vergleich mit Solldaten ist auch die Absteckung nicht signalisierter Punkte möglich (z. B. bei der Justierung von Maschinenteilen).
- Bekannte Zielpunktmuster können ohne Lernphase auf Basis von Bildanalysealgorithmen automatisch detektiert und einem bestimmten Zielpunkttypus zugeordnet werden. Dies gilt sehr einfach für künstliche, zur Messzeit angebrachte Muster wie z.B. kreisförmige Markierungen, HDS-Zielzeichen oder Lichtmarkierungen, kann aber auch auf natürlich vorkommende Muster erweitert werden.
- Die tachymetrische Messdatenerfassung wird von der reinen Punktinformation zur Linien- oder Flächeninformation erweitert. Die strikte Zuordnung des Zielpunkts zum Fadenkreuz entfällt, sodass unterschiedliche Richtungen auch exzentrisch und insbesondere zeitgleich gemessen werden können. Die Distanzmessung bleibt natürlich auf den aktuellen Fadenkreuzpunkt beschränkt.
- Sind Standpunktkoordinaten und Orientierung bekannt, ist jede photogrammetrische Aufnahme unmittelbar georeferenziert und erlaubt eine nachträgliche Auswertung. Die Kombination mehrerer Aufnahmen vom selben Standpunkt (Mosaiking) bzw. von unterschiedlichen Standpunkten (Stereoauswertung) ist ohne gemeinsame Passpunkte in den Bildern oder im tachymetrischen Bezugssystem als Vorwärtsschnitt orientierter Richtungsbüschel möglich.

Daneben gibt es weitere Vorteile, die weniger der automatisierten und präzisen Messdatengewinnung, sondern mehr der ergonomischeren Messungsdurchführung dienen. Da diese nur beschränkt auf Methoden künstlicher Intelligenz zurückgreifen und auch mit nicht koaxialen sowie mit Übersichtskameras einfach zu implementieren sind, sind sie großteils in den aktuellen kommerziellen Systemen bereits umgesetzt:

- Überblendung von Planungsdaten und Messdaten mit dem Kamerabild
- Visualisierung des Tachymeterbilds auf dem Display bzw. auf der Fernsteuerung
- Steuerung des Tachymeters/Zooming durch Antippen des Messbilds am Display
- Einfache Bildauswertungsalgorithmen für eine grobe Vorauswahl möglicher relevanter Punkte und interaktive Auswahl der Ziele

Videotachymetrische Systeme bergen ein großes Automatisierungspotential in sich, das bevorzugt bei langzeitigen, autonomen Messdatenerfassungen zum Einsatz kommt. Dazu gehören in erster Linie sämtliche Aufgaben der geodätischen Überwachungsmessung sowie damit verbunden der Deformationsmessung. Die Anforderungen an die Systeme hinsichtlich der zu erzielenden Messgenauigkeiten liegen dabei oft im Präzisions- bzw. Hochpräzisionsbereich.

1.2 Aufbau der Arbeit

Vorliegende Arbeit untersucht die Einsatzmöglichkeiten hochauflösender bildgebender Tachymeter speziell vor dem Hintergrund der Deformationsmessung und artverwandter Einsatzgebiete. Sie erhebt nicht den Anspruch, ausgereifte Applikationen zu liefern (obgleich einige funktionsfähige Anwendungselemente entwickelt wurden), sondern versteht sich als konzeptionelle Arbeit, welche die notwendigen Grundlagen für die Verwendung von Videotachymetern zusammenstellt und ihre Verwendbarkeit prüft. Dies gilt insbesondere für den Anteil der Bildanalyse und des Bildverstehens, der dem herkömmlichen ingenieurgeodätischen Verständnis immer noch weitgehend fremd ist. Für die praktische Umsetzung der aufgezeigten Resultate wird auf parallel laufende Projekte verwiesen.

Im Anschluss wird zur Einführung eine Übersicht über den aktuellen, sehr heterogen ausgeprägten Stand der Geräteentwicklung auf dem Sektor "Videotachymetrie" gegeben. Insbesondere sollen dabei auch die unterschiedlichen Eigenentwicklungen universitärer Forschung angesprochen werden.

Ein kamerabasiertes tachymetrisches Messsystem mit Eignung für Deformationsmessungen ist zwingend auf eine hochauflösende Okularkamera angewiesen; zusätzlich muss die Möglichkeit der externen Bilddaten-Verarbeitung gegeben sein. Da diese Kombination gegenwärtig auf dem Markt nicht verfügbar ist, musste ein entsprechender Prototyp angeschafft werden. Dies gelang durch den Umbau eines Leica TCRA1201+ im Rahmen einer Kleinserie direkt durch den Hersteller. Um trotz des Prototypstatus möglichst nahe an einem kommerziellen System zu bleiben, wurde Wert darauf gelegt, dass neben dem ersetzten Okular keine relevante Standardfunktionalität beeinflusst wird. Kapitel 2 beschreibt die verwendeten Hardwarekomponenten und die Messbildgewinnung.

Ein entscheidendes Kriterium für die Arbeit mit einem Videotachymeter ist die kombinierte Kalibrierung der Kamera und der Tachymetersensoren, die im ersten zentralen Kapitel 3 hergeleitet wird. Wichtigstes Element dabei ist die eindeutige und umkehrbare Pixel-Richtung-Zuordnung. Als Basis dienen dazu die Ansätze von [Walser 05] und [Vogel 06], bei denen jedoch andere Instrumente und teilweise deutlich andere Ausgangsbedingungen vorlagen, sodass konzeptionelle Anpassungen notwendig wurden. Zusätzlich wird ein Verfahren zur ATR-Kalibrierung vorgestellt.

Von weiterer zentraler Bedeutung ist das in Kapitel 5 untersuchte Genauigkeitspotential der videotachymetrischen Sensorkombination. Hierzu werden die einzelnen Sensoren unter besonderer Berücksichtigung des Kamerachips getrennt betrachtet und anschließend ihre mögliche gegenseitige Beeinflussung untersucht. Entscheidend für die Bildqualität eines optischen Sensors und die daraus abgeleiteten Richtungsinformationen sind auch Umgebungsparameter, insbesondere Belichtung und Refraktionseffekte, sowie Art und Struktur des jeweiligen Ziels.

Auf verschiedene Verfahren und Methoden der automatischen Zielpunkt- und Objektextraktion wird im Hinblick auf die Auswertung der gewonnen Bilddaten in Kapitel 4 näher eingegangen. Wesentliche Themen sind hier die Aufbereitung der Bilddaten, die Merkmalsextraktion als Grundlage der Objekterkennung sowie Matching-Verfahren als Basis der wiederholten Messung zu nicht signalisierten, natürlichen Zielen.

Das letzte Hauptkapitel 6 befasst sich schließlich mit der Ausprägung von Deformationserscheinungen bei Erfassung mittels eines videotachymetrischen Systems. Die erarbeiteten Ansätze sind dabei so ausgelegt, dass möglichst viel Richtungs- und damit Bildinformation genutzt und auf Distanzmessungen und 3D-Punktbestimmung nach Art herkömmlicher tachymetrischer Einzelpunktaufnahme weitgehend verzichtet werden soll. Daher wird zum einen die Interpretation zweidimensionaler Punktverschiebungen im Kamerabild, als räumliche Bewegung unter Verwendung von Zusatzinformation über den Bewegungsablauf, näher betrachtet; zum anderen wird die Kombination aus 3D- und 2D-Messungen zu Punkten eines gemeinsamen Bewegungsmodells explizit untersucht. Weitere gewinnbringende Einsatzmöglichkeiten der Videotachymetrie in der Form- und Lagevermessung vervollständigen das Kapitel.

Eine Zusammenfassung sowie die Bewertung der wesentlichen Ergebnisse und eine Abschätzung zukünftiger Entwicklungen finden sich in Kapitel 7.

1.3 Ausgangssituation und bestehende Systeme

1.3.1 Obsolete Lösungen

Die Anfänge der bildgebenden ingenieurgeodätischen Geräte sind vor der Entwicklung der reflektorlosen Distanzmessung anzusetzen; es handelt sich daher ausschließlich um Video*theodolite*. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang der Kern E2-SE für das Industriemesssystem ECDS mit Hilfe der Bildauswertesoftware SPACE (vgl. [Gottwald 87] und [Gottwald 88]) sowie der Wild TM3000V [Katowski 89]. Das gemeinsame Grundprinzip ist der räumliche Vorwärtsschnitt von zwei oder mehr entsprechenden Instrumenten bei automatischer Anzielung des jeweiligen Zielpunkts über die Bildauswertung. Dabei kann die Signalisierung des einzuschneidenden Punkts über eine feste Zielmarke (mit kreisförmiger Ausprägung) oder über einen Laserpunkt geschehen, wobei letzterer je nach Anwendung von einem der beteiligten Theodolite selbst oder von einer zusätzlichen Laserquelle stammen kann. Im ersten Fall spricht man von einem "Master-Slave"-Prinzip, welches vor allem beim TM3000V angewendet wurde.

Die Entwicklung der Videotheodolite stellte Ende der Achtzigerjahre einen entscheidenden Schritt zur zunehmenden Automatisierung der Ingenieurgeodäsie dar; dies gilt nicht zuletzt, da für die automatische Anzielung der Markierung erstmals (nach dem Pioniersystem GEOROBOT II nach [Kahmen u. Steudel 88]) Schrittmotoren zur autonomen Bewegung kommerziell eingesetzt wurden. Ein zusätzliches Nebenprodukt der ersten Videotheodolit-Generation ist auch die heute übliche automatische Zielerfassung von Prismen mittels Bildsensoren [Haag et al. 97]. Da die Zielgruppenausrichtung jedoch sehr stark auf die präzise Industrie- und Anlagenvermessung fixiert war, wurden Videotheodolite innerhalb weniger Jahre durch die Markteinführung der Lasertracker (1991 durch Leica) wieder abgelöst. In der Folge war die Nachfrage nach bildgebenden Lösungen gering und die Entwicklungen führten in andere Richtungen. Die wenigen, verbliebenen Instrumente der TM3000V-Serie fanden hauptsächlich in der akademischen Forschung Einsatz.

1.3.2 Aktuelle kommerzielle Lösungen

Mit der Einführung billiger, als Massenware gefertigter digitaler Kamerachips bei gleichzeitiger exponentieller Steigerung der Rechnerleistungen und der daraus folgenden gesellschaftlichen Wandlung des Informationsbegriffs verstärkt hin zur Bildinformation, z. B. durch 3D-Animationen oder Darstellungen in Google Earth, entstehen auch für die Fusion aus Bildinformation und tachymetrischer Messdatengewinnung neue Marktsegmente. Eine Großzahl der Hersteller geodätischer Instrumente hat in den vergangenen Jahren auf diesen Trend reagiert.



Abb. 1.1: Sokkia SET 3110MV (links) Abb. 1.2: Topcon Imaging Station (Mitte) Abb. 1.3: Trimble VX Spatial Station (rechts)

Im Jahr 2002 präsentierte die Firma Sokkia auf der Fachmesse für Geodäsie *Intergeo* den Geräteprototyp SET 3110MV, ausgerüstet mit einer fokussierbaren Farbkamera (Abb.1.1) anstatt eines Okulars. Obwohl diese Gerätestudie auf der koreanischen Homepage des Herstellers noch vertreten ist, wurde das Instrument bisher nicht am Markt eingeführt und wird auch nicht weiter verfolgt [Sokkia 08].

Zwei Jahre später wurde unter dem Schlagwort "Capture Reality" das System GPT-7000i der Firma Topcon erstmals vorgestellt. Es verfügt auf Basis der bestehenden GPT-7000-Baureihe über eine CCD-Okularkamera mit 640×480 Pixel bei 30 facher Vergrößerung und über eine zusätzliche Weitwinkel-Übersichtskamera mit 4fachem Zoom [Topcon 05]. Die Kamera dient vor allem einem überwachten Arbeitsablauf, indem abzusteckende oder bereits gemessene Punkte in das Livebild eingezeichnet werden können und zu Dokumentationszwecken. Eine Anzielung über das Display ist möglich: des Weiteren gibt es Funktionen zur automatischen Ecken- und Kantenerkennung. Das Instrument ist jedoch weder motorisiert noch automatisch fokussierbar. Diesen Mangel behebt die Weiterentwicklung zur Imaging Station (Abb.1.2). Ausgestattet mit 1,3 MPixel CMOS-Kameras und WLAN-Funktionalität ermöglicht es eine Vielzahl von Robotik- und Fernsteuerungsanwendungen. Topcon positioniert sein System als Kombinationsgerät zwischen Tachymeter und einfachem Laserscanner (bis zu 20 Punkte/Sekunde) bei gleichzeitiger digitaler Bilderfassung. Die Verlagerung von Arbeitsabläufen auf das automatisierte System wird gefördert; Bildauswertungsalgorithmen wählen beispielsweise selbständig relevante Punkte für ein irreguläres Objektscan-Raster aus [Topcon 08]. Sokkia gehört seit März 2008 zum Topcon-Konzern. Es ist davon auszugehen, dass bis 2011 eine gemeinsame Geräteplattform entwickelt wird, die dann auch mit Produkten im Bereich der Videotachymetrie ausgestattet sein wird [Sokkia 08].

Eine vergleichbare Marktausrichtung weist auch die VX Spatial Station der Firma Trimble auf (Abb.1.3). Sie verfügt über eine exzentrisch angebrachte 3,2 MPixel Kamera mit einem erweiterten

Gesichtsfeld von 18,3 gon \times 13,7 gon und einem Schärfentiefebereich von 3 m bis ∞ zusätzlich zum herkömmlichen Fernrohr [Trimble 07]. Durch entsprechende Kalibrierung gelingt es, das physikalische und das virtuelle Fadenkreuz der Kamera zur Deckung zu bringen und darüber hinaus jedem Pixel des Bilds unmittelbar die zugehörige Richtung zuzuordnen. Der Schwerpunkt des Einsatzes der Kamera liegt auch hier im Overlay von Echtzeitbild und Messdaten sowie in der Punkt- und Bereichsauswahl am Controller. Von zusätzlichem Vorteil sind bei diesem System die angebotenen Lösungen der direkt georeferenzierten Einbild-Photogrammetrie (z. B. Fassadenentzerrung im automatisch generierten Bildverband), vgl. [Müller 09]. Die Scanfunktion der Spatial Station verarbeitet bis zu 15 Punkte/Sekunde. Weiterführend unterstützt die bildgestützte terrestrische 3D-Vermessung die Kombination dieser Daten mit bestehenden photogrammetrischen Informationen.

Beide Systeme nutzen die Videofunktionalität im Zusammenspiel mit entsprechender Controller-Software bzw. mit herstellereigenen Steuerprogrammen für PCs. Die Einbindung der aufgenommenen Bildinformationen in nutzerspezifische Anwendungen ist derzeit nicht möglich bzw. entspricht im Fall von Trimble nicht der Unternehmensphilosophie. Eine Leistungsübersicht über die marktverfügbaren Geräte findet sich auch in [Machotka et al. 08].

Die Firma Leica Geosystems hat zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Instrument mit Videodisplay im Sortiment. Die aktuellste Geräteentwicklung, der hochpräzise Monitoring-Tachymeter TM30, nutzt jedoch den mittlerweile qualitativ hochwertigen ATR-Chip (siehe auch Abschnitt 3.1.1.4) zur Aufnahme und Dokumentation von Fernrohrbildern [Leica 09] ab einer Fokussierentfernung von etwa 5 m. Die Ausgabe über eine serielle Schnittstelle und anschließende Weiterverarbeitung ist möglich, aufgrund der geringen Übertragungsgeschwindigkeit jedoch nicht für die Tachymetersteuerung brauchbar. Genutzt werden kann das Bild vor allem zur Visurkontrolle bei der Fernwartung.

Darüber hinaus gibt es mehrere Systeme am Markt, die keine Videotachymeter-Lösung im engeren Sinne darstellen, sondern eine Verbindung aus stabilem geodätischen Referenzrahmen über Teilkreisinformationen und aufgesetzter Kamera (Phototheodolit). Die Richtungsinformation wird in diesen Fällen zur Orientierung der Bildinformation und zum automatisierten Mosaiking verwendet (z. B. zur Verwendung mit HAZMAP, vgl. [Chapman et al. 04]). Andere Verfahren verzichten vollständig auf eine bauliche Kombination der Sensoren und verwenden die mittels einer externen Kamera gewonnene Bildinformation zur Steuerung eines Tachymeters (z. B. [Scherer 05]). Die Referenzierung hat hierbei durch Passpunkte zu geschehen. Diese Ansätze stellen jedoch keine Videotachymetrie im engeren Sinne dar, sondern lediglich "bildunterstützte" oder "bildunterstützende" Tachymetrie.

Speziell für die vorliegende Arbeit wichtige, industriell angestoßene Forschung stammt von [Vogel 06] und [Walser 05]. Diese bearbeiteten jeweils unabhängig voneinander Kalibrierung und Abbildungsgleichungen von Videotachymeter-Prototypen inklusive erster Anwendungen. Die Arbeit von Vogel wurde dabei von der Firma Trimble unterstützt und ging direkt in die Entwicklung der Spatial Station VX ein; die Arbeit von Walser mit einem ersten Prototyp einer IATS auf Basis eines TCRA1101 entstand in enger Kooperation mit Leica. In Kapitel 3 werden die in diesen beiden Veröffentlichungen entwickelten Kalibrierverfahren intensiv genutzt und für die vorliegende Aufgabe in Kombination angepasst.

1.3.3 Wissenschaftliche Forschung

Neben marktfähigen Lösungen ist die Kombination von Tachymetrie und Digitalphotographie seit längerer Zeit Gegenstand der Forschung. Von unterschiedlicher Seite existieren Prototypen für diverse Anwendungen.

Auf Basis des erwähnten TM3000V entwickelt [Fabiankowitsch 90] einen Algorithmus zur Detektion intensitätsvariabler Zielmarkierungen aus Differenzbildern. Während [Wieser 95] die automatische Er-

fassung von signalisierten Zielen für autonome Überwachungsmessungen verwendet, erarbeitet [Roic 96] auf Kontrastverbesserungen und Kantenfilter basierende Verfahren, nicht signalisierte Objekte für die (semi-)automatische Auswertung vorzubereiten. Dies verwendet [Mischke 00] als Grundlage für ein aus mehreren Videotachymetern bestehendes Richtungsmesssystem, das einfache geometrische Primitive mit Hilfe von Interest-Operatoren zuordnet und so die Anzielung unterstützt. Dabei agiert ein Sensor als Master, während die übrigen aus dessen Orientierung die eigene Zielrichtung grob positionieren und dann im Bild den jeweiligen Zielpunkt ableiten können. Das Interest-Operator-Verfahren wird weitergeführt, indem beliebige Texturen von Oberflächen anstatt von Zielmarken verwendet werden können. Dies bedarf geeigneter Algorithmen der Bildvorverarbeitung basierend auf der Bildanalyse und anschließender Punktdetektion mittels Korrelationsmethoden. Zur Algorithmenwahl, Bildinterpretation und Punktselektion ist hierbei jedoch Expertenwissen notwendig. [Reiterer 05] entwickelt ein auf Fuzzy Logic basierendes Entscheidungssystem, das durch Regelfestlegung eine bestmögliche automatische Vorverarbeitung generiert. Die Ergebnisse der zurückliegenden Arbeiten an der TU Wien sind zusammengefasst an verschiedener Stelle veröffentlicht, z. B. bei [Kahmen u. DeSeixas 99], [Kahmen u. Reiterer 04] oder [Kahmen u. Reiterer 06]. Die aktuelle Forschung orientiert sich in Richtung der wissensbasierten Entscheidungssysteme, z. B. bei [Reiterer et al. 03] und [Reiterer et al. 07] zum Nachweis von Deformationen. Dazu wird aktuell ein Videotachymeter auch in Kombination mit einem terrestrischen Laserscanner genutzt. Einzelne signifikante Punkte werden automatisch extrahiert und ihre Umgebungsbereiche in Regions of Interest (RoI) zusammengefasst. Für diese Regionen lassen sich dann Deformationsparameter angeben, die durch einen Fuzzifizierungs-Vorgang gruppiert werden und, bevorzugt für ebene Objekte wie Fassaden, die Unterteilung in Deformationsmuster erlauben [Reiterer et al. 09].

Systeme ohne den TM3000V oder den IATS-Prototypen auf Basis des Leica 1100 beruhen auf unterschiedlichen eigenständigen Kombinationen von Bildsensor und Teilkreisträger. Das am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelte System GMS ermöglicht die Projektion von perspektivisch darstellbaren CAD-Modellen in das aktuelle Kamerabild eines modifizierten Wild T2000S [Köhler 93]. Verschiedene Graphikfunktionen dienen dem Operateur als Zielhilfen. [Schirmer 94] verwendet eine auf einem Kern DKM 3A angebrachte Digitalkamera für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Insbesondere leitet er dabei die Korrekturparameter für exzentrische Zwei-Lagen-Bildmessung ab. Ebenfalls astronomisch-geodätische Messungen – in diesem Fall zur Geoidverbesserung – führt [Gerstbach 99] mit einem Leica TCA1800 mit aufgesetzter Okularkamera durch. Eine aufgesetzte Kamera nutzen in einer neueren Arbeit auch [Zhang et al. 04]. Hier dient die Tachymetrie hauptsächlich der einfachen Passpunktbestimmung, die Weiterverarbeitung der Bildinformation geschieht mittels photogrammetrischer Ansätze.

[Uffenkamp 95] konzipiert ein Schwenk-Neige-System für den äußeren Richtungsabgriff einer Kamera aus dem Bereich der Nahbereichsphotogrammetrie mit Réseau-Gitter. Sein Prototyp basiert auf einem umgebauten Geodimeter CD 400. Die Verwendung der für die ATR ohnehin vorhandenen Kamera eines Leica TCA2003 ist beschrieben in [Wasmeier 03]. Vorteilhaft ist über die ATR-Ablagen die unmittelbar mögliche Verknüpfung mit Richtungsinformationen. Die fehlende Fokussierbarkeit ermöglicht jedoch nur die Bearbeitung großer, weit entfernter Ziele. Eine Kombination mehrere Kamerasensoren wird im System TOTAL der Universität Bochum nach [Juretzko 04] integriert. Ein herkömmlicher Leica TCRM1102 wird dazu mit einer Okularkamera sowie einer Tele- und einer Weitwinkelkamera im EGL-Gehäuse ausgestattet und der Fokussiertrieb motorisiert. Abbildungsfehler werden durch eine empirische Korrekturmatrix behoben, die Ablagegrößen zwischen Bildposition und Richtungswert aus dem Ansatz der zentralperspektivischen Abbildung gewonnen. Mit auf Theodoliten der Leica 5100-Serie aufgesetzten Okularkameras arbeitet ein System aus einer Diplomarbeit an der FH Mainz. Bei Fokussierung auf ∞ werden (Auto-)Kollimationsanwendungen durch die Abbildung des Fadenkreuzes auf dem CCD-Chip automatisiert. Die zugehörige Veröffentlichung von [Schlüter et al. 09] befasst sich vorrangig mit der Selbstkalibrierung des Systems. Eine eigene Messbasis realisiert das System *HybMess* von [Hovenbitzer 03]. Ein von einer Sendeeinrichtung auf das zu vermessende Objekt projiziertes Grauwertmuster wird von einem Videotachymeter auf Basis eines Geodimeter 520 mit Zeilenkamera aufgenommen. Die Sendeeinrichtung ist in konstantem Abstand fest auf dem Tachymeter installiert, sodass eine dreidimensionale Koordinatenbestimmung über Vorwärtsschnitt möglich ist. Die Reichweite ist jedoch auf ca. 10 m beschränkt. Auf Basis des Systems Quarryman ALS der Firma MDL entwickeln [Gong et. al undat.] eine Kombination von Theodolit, Kamera und Laserscanner. Das Ziel ist es, einfach und automatisiert Drahtgittermodelle von Tagebauwerken zu generieren.

Eine umfangreiche Auflistung der Literatur zum Thema "Automatisches Zielen mit Tachymetern" bis ins Jahr 2005 ist in [Wunderlich 05] zu finden.

Die in vorliegender Arbeit gegebene Übersicht erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; insbesondere sind verschiedentlich ältere und inhaltlich verwandte Artikel nicht berücksichtigt. Sie soll jedoch aufzeigen, dass die wissenschaftliche Forschung sich auch in der Zeit der kommerziellen Stagnation des Themas "Videotachymetrie" angenommen hat und das weiterhin tut. Die Vielzahl der Einzellösungen wird, was die Hardware betrifft, bald in geeigneten Produkten namhafter Hersteller aufgehen. Aus dem Forschungsgegenstand wird mittelfristig ein standardisiertes Anwendugsszenario. Es ist nun nachzuweisen, dass die erarbeiteten Messprinzipien für diese Weiterentwicklung der Tachymetrie geeignet sind und es sind zusätzliche Anwendungsbereiche zu erschließen und bestehende zu optimieren.

2 Der Prototyp IATS2

2.1 Komponenten

Die bestehenden kommerziellen Produkte sind auf eine Unterstützung und Vereinfachung des Messablaufs ausgelegt. Sie bilden geschlossene Systeme, in denen die Nutzung der Kamerainformation auf die Möglichkeiten der herstellereigenen Software beschränkt ist. Da keine offenen Schnittstellen für diese Daten existieren, sind sie gegenwärtig für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten nicht geeignet. Die angeführten Einzelentwicklungen unterschiedlicher Stellen vermögen diese Lücke bedingt zu schließen. Sie bieten Zugriff auf alle notwendigen Daten, müssen jedoch mit der Adaption bestehender Systeme arbeiten. Dies kann zu Einschränkungen bei den verwendbaren Komponenten, der mechanischen Stabilität und den bestehenden Tachymeterfunktionen führen. Das in vorliegender Arbeit verwendete Instrument bildet in diesem Zusammenhang keine Ausnahme; allerdings wurde es vom Hersteller Leica selbst in einer Kleinserie entwickelt und gefertigt. Die Einschränkungen können daher möglichst gering gehalten werden. Unabhängig davon besitzt das Gerät noch den Status eines Prototyps; die einzelnen Zusatzbauteile sind noch nicht vollständig in das Basisinstrument integriert. Separate Energie- und Datenleitungen schränken beispielsweise die Gesamtnutzung ein.

Während die von [Walser 05] verwendete Image Assisted Total Station (IATS) als erste Machbarkeitsstudie und Basis für Grundlagenuntersuchungen einzustufen ist, ermöglicht die aktuelle zweite Prototypenklasse IATS2 anwendungsbasierte Fragestellungen. Dazu wurden die verwendeten Sensoren, insbesondere die Kamera, dem aktuellen Stand der Technik angepasst. Um die Einschränkungen und Möglichkeiten des Systems darstellen und insbesondere hinsichtlich der Anforderungen von Deformationsmessungen werten zu können, werden in der Folge die einzelnen Komponenten kurz beschrieben.

2.1.1 Basisinstrument TCRA1201+

Die IATS2 basiert auf einem handelsüblichen Tachymeter TCRA1201+ R1000. Diese Geräteklasse wurde als Fortentwicklung der bisherigen TPS1200-Reihe (vgl. Abb.2.1) im September 2007 eingeführt [Leica 07b]. Sie verfügt über einen neuartigen EDM-Sensor, bei dem sowohl das Signal für reflektorlose wie auch für Messung auf Reflektoren von derselben Diode erzeugt wird. Dies führt zu einer erhöhten Stabilität der EDM-Messung und insbesondere zu Parallelität der Messstrahlen beider Modi. Ein Versatz des reflektorlosen Lasers gegenüber der Prismenmessung wird so ausgeschlossen.

Für die Verwendung als Videototalstation ist vor allem eine genaue reflektorlose Distanzmessung von Interesse, da allein diese den zweidimensionalen Richtungsabgriff im Messbild zu einer räumlichen Struktur ergänzt. Für durchschnittliche Messbedingungen liegt die Reichweite bei 800 m (Kodak Gray 90) mit einer Genauigkeit von 2 mm + 2 ppm bis 500 m. Die Richtungsgenauigkeit beträgt beim TCRA1201+ 1" (0,3 mgon), sodass reflektorlose Streckenmessung und Richtungsmessung in etwa 500 m Entfernung ein annähernd kugelförmiges Fehlerellipsoid erzeugen. Bei geringeren Entfernungen ist die Richtungsgenauigkeit überlegen [Leica 07c]. Bei diesen Angaben ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Laserpunktgröße in einer Entfernung von 500 m bereits 6 cm \times 20 cm beträgt. Für punktgenaue präzise Messungen sollten daher Entfernungen von 100 m nicht überschritten werden.



Abb. 2.1: Schnittbild eines TCRP1201 (entnommen aus [Leica 05])

Der optische Aufbau des Fernrohrs inklusive der Vorrichtungen zum Ein- und Auskoppeln der EDM sowie des optischen Pfads zur ATR-Kamera bleibt erhalten. Weitere Funktionalitäten wie ATR, Lock-Modus, PowerSearch u. Ä. bleiben beim Umbau auf die IATS ebenfalls erhalten, sodass das Tachymeter – abgesehen vom fehlenden Okular – vollständig in herkömmlicher Art und Weise benutzt werden kann. Der Umbau zur IATS2 ist also eher eine Erweiterung, weniger eine Veränderung.

2.1.2 Okularkamera

Die einzige tatsächliche – und fundamentale – Änderung stellt der Ersatz des Okulars durch einen Kamerachip dar. Dieser wird so angebracht, dass er in der Bildebene des Objektivs liegt. Dadurch wird auch das Fadenkreuz ersetzt. Theoretisch ist es möglich, das Fadenkreuz beizubehalten und die Kamera hinter der Augenlinse des Okulars anzubringen (ähnlich dem Referenzrahmen beim TM3000V). Dies würde jedoch die Baulänge vergrößern und, solange der Kamerachip mechanisch stabil bleibt, keinen unmittelbaren Vorteil bringen, da ein virtuelles Fadenkreuz auch an beliebiger Stelle direkt im Kamerabild realisierbar ist. Die verwendete Kamera ist eine uEve UI-148xLE-C USB2.0 der Firma IDS (Abb.2.2). Sie basiert auf einem 1/2 Zoll CMOS-Farb-Chip mit QSXGA-Auflösung (2560×1920 Pixel) bei einer quadratischen Pixelgröße von 2,2 µm [IDS 09]. Die Größe beträgt ohne Objektivadapter 36 mm × 36 mm × 8 mm. Der mögliche Pixeltakt (die Anzahl der darstellbaren Pixel pro Sekunde) liegt zwischen 5 und 43 MHz, was bei einer Auflösung von 5 MPixel theoretisch gut 8 Bilder pro Sekunde (fps) entspricht. In der Praxis sind noch Synchronisationssignale und die Austastlücke der Darstellung zu berücksichtigen, sodass maximal 6 fps möglich sind. Der spezifizierte Arbeitsbereich liegt zwischen 0°C und 45°C. CMOS-Kameras benötigen etwas mehr Licht als CCD-Kameras, da etwa die Hälfte der Pixelfläche durch Transistoren belegt ist. Durch Mikrolinsen kann dieser schlechte Füllfaktor jedoch wieder auf ca. 70 % erhöht werden. Der Vorteil liegt im deutlich geringeren Stromverbrauch (nur etwa 10%) und den schnelleren Zugriffszeiten.



Abb. 2.2: uEye LE OEM Kamerachip (entnommen aus [IDS 08])



Abb. 2.3: Aufbau des Bayer-Farbfilters (entnommen aus [Wiki 06])

Digitale Bildsensoren erfassen ausschließlich Helligkeitsinformationen. Je nach Bittiefe der Darstellung werden diese dann in einem entsprechenden Intervall einem Grauwert zugeordnet. Die Auflösung eines Grauwertbilds entspricht physikalisch der Anzahl der Pixel. Farbsensoren sensibilisieren das Pixelgitter nach einem vorgegebenen Muster durch winzige Farbfilter für die entsprechende Wellenlänge der Grundfarben Grün, Blau und Rot. Die Anordnung dieses Musters ist meist die Bayer-Matrix mit abwechselnd Grün-Blau und Grün-Rot in Zeile und Spalte (siehe Abb.2.3). Diese Farbverteilung entspricht am ehesten der Wahrnehmung des menschlichen Auges, welches bevorzugt auf Licht im grünen Wellenbereich reagiert.

Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass nur ein Drittel der Farbinformation tatsächlich durch Messung gewonnen werden kann, die übrigen Werte sind durch Interpolation zu bestimmen. Dazu gibt es unterschiedliche Verfahren (vgl. z. B. [Furtner 01]), die je nach Anwendungsbereich konzipiert und meist mit nachgeschalteten Algorithmen zur Erhöhung der Schärfeleistung verknüpft sind. Insbesondere an Kanten gibt es jedoch häufig Farbartefakte und Schärfeverluste sowie eine Reduktion des tatsächlichen Auflösungsvermögens. Abhilfe würde in diesem Fall der Wechsel auf 3-Chip-Kameras schaffen. In diesen wird das Bild durch ein Prisma zerlegt und jede Grundfarbe durch einen eigenen Sensor registriert. Die wenig kompakte Bauweise verhindert allerdings einen Einsatz als Okularkamera. Eine Neuentwicklung der Firma Foveon Inc. ermöglicht die Aufzeichnung von Vollbildern mit nur einem Chip. Das Prinzip beruht darauf, dass Silikon Lichtwellen unterschiedlicher Länge in unterschiedlichen Tiefen absorbiert, sodass die Farbinformationen als Vollbilder in mehreren Schichten gewonnen werden können. Die Resultate sind deutlich besser als diejenigen interpolierter 1-Chip-Sensoren [Guttosch 05], die Auslesezeiten sind durch die hohe Informationsdichte jedoch ebenfalls sehr hoch (bis zu drei Sekunden).

Farbabbildungen unterliegen der Notwendigkeit eines Weißabgleichs. Bei diesem Schritt wird die Kamera durch gewichtete Verstärkung der einzelnen Farbkanäle auf die aktuelle Farbtemperatur des Umgebungslichts sensibilisiert, sodass Farbverfälschungen vermieden werden. Beste Ergebnisse erzielt man durch einen manuellen Abgleich mit einer Weißkarte oder einem Blatt Papier; oft liefert aber auch eine rein softwarebasierte Anpassung zufriedenstellende Resultate, sofern sich ein weitgehend weißes Objekt im Bild befindet.



Abb. 2.4: Relative spektrale Empfindlichkeit der uEye-148-xLE-C (entnommen aus [IDS 09])

Die relative spektrale Empfindlichkeit des Sensors zeigt Abb.2.4. Da die eingebaute Kamera nicht über einen optionalen Infrarot-Sperfilter verfügt, sind auch Frequenzen in diesem Bandbereich auf den Bildern deutlich sichtbar. Dies gilt beispielsweise für die ATR-Strahlung oder das EDM-Messsignal bei 660 nm. Der sichtbare Laser der reflektorlosen Distanzmessung entspricht Laserklasse 3R und wird daher aus dem optischen Weg eines herkömmlichen Fernrohrs vor dem Okular ausgekoppelt. Demzufolge ist rotes Laserlicht dieser Frequenz auch auf dem Kamerabild nicht abgebildet.

Für die Echtzeit-Darstellung des Fernrohrbilds sowie die Dokumentation gemessener Punkte ist eine Farbabbildung wünschenswert, da sie dem Betrachter Informationen in gewohnter Ansicht und damit intuitiv schneller zugänglich macht. Für die reine Messung im Bild, wie sie durch automatisierte Algorithmen (im Subpixelbereich) durchgeführt wird, ist jedoch das Grauwertbild zu verwenden. Benutzt werden kann die Farbe aber, um einzelne Regionen im Bild vorzusegmentieren, und diese Bereiche dann explizit im Grauwertbild auszuwerten.

2.1.3 Fokusmotor

Die Scharfstellung des Fernrohrs auf unterschiedliche Distanzen geschieht durch Verschieben einer Zwischenlinse. Dieser Vorgang muss für ein automatisiertes Videotachymeter motorisiert durchführbar sein. Der manuelle Fokussierring wurde daher mit einem Servomotor 3564B CS der Firma Faulhaber gekoppelt [Faulhaber 07].

Im Bereich der Überfokussierung nach ∞ wurde ein Endschalter integriert, der als Referenzposition für die Encoderschritte des Motors agiert. Auf diese Weise können reproduzierbar dieselbe Nullposition und somit beliebige weitere bekannte Fokuslinsenstellungen angefahren werden. Im Weiteren ist es ausreichend, die Stellung der Fokussierlinse in Encoderschritten zu beschreiben. Eine Umrechnung in [mm] des Linsenwegs ist prinzipiell möglich; dies ist aber nicht notwendig, zumal die entsprechenden Herstellerangaben fehlen. Bei aktivem Motor setzt dieser einer Krafteinwirkung von außen einen Widerstand entgegen, sodass die aktuelle Fokusposition gehalten werden kann. Bei inaktivem Motor ist eine manuelle Fokussierung mittels des Fokussierrings weiterhin möglich. Angesteuert wird der Motor über eine serielle Schnittstelle, die ein externer Controller zur Anbindung an einen PC zur Verfügung stellt.

2.1.4 Steuerrechner

Durch das Fehlen des Okulars ist die Bedienung des Tachymeters an eine alternative Darstellung der aktuellen Objektszene gebunden. Dies kann systemintern auf einem integrierten Display geschehen oder auf einer baulich getrennten Anzeigeeinheit. Zur reinen Steuerung des Systems und zur Anzielung ist beispielsweise ein einfacher Handheld-PC denkbar. Bei umfangreicheren zusätzlichen Berechnungen und Auswertungen der Bildinformation, insbesondere bei Echtzeit-Anwendungen, muss auf geeignete externe Rechner (sinnvollerweise Laptops) zurückgegriffen werden. Vorteilhaft sind Geräte mit hoher Displayauflösung, um den gesamten Bildausschnitt unter einem möglichst geringen Verkleinerungsfaktor darstellen zu können. Bilderfassung und -auswertung sind rechen- und speicherintensive Operationen, sodass zudem ausreichen Arbeitsspeicher benötigt wird. Für die vorliegende Arbeit wurde ein 2.2 GHz CoreDuo-Prozessor mit 2GB RAM und WUXGA-Graphik (1920 × 1200 Pixel) gewählt. Diese Auflösung ist geeignet, um die Okularbilder mit halber Seitenlänge darstellen zu können. Details sind dabei ausreichend erkennbar, sodass auf ein häufiges Zoomen zwischen Gesamtbild und Ausschnittvergrößerung verzichtet werden kann.

2.2 Software

2.2.1 Externe Bibliotheken

Die Synthese unterschiedlicher Sensoren in einem Anwendungsprogramm bedarf einer umfassenden Programmiersprache, in der für alle Komponenten entsprechende Bibliothekdateien bereitgestellt werden können. Geeignet sind in diesem Zusammenhang beispielsweise VisualBasic oder C++. Da letztere eine hardwarenähere Programmierung und einfaches Multithreading ermöglicht, erfolgt die Programmerstellung im Rahmen dieser Arbeit mit Microsoft Visual C++ 6.0.

Zum Zugriff auf das Tachymeter steht für C++ die GeoCOM-Schnittstelle zur Verfügung, die eine vollständige Automatisierung über einen seriellen Port erlaubt [Leica 04]. Einschränkungen durch den Umbau, z. B. die Notwendigkeit, das Objektiv über den Nadir durchzuschlagen, können durch Steuerbefehle berücksichtigt werden. Für den Fokusmotor existiert ein Setup- und Steuerungsprogramm der Herstellerfirma. Bei der Verwendung in der IATS ist jedoch keine zusätzliche Softwarekomponente erforderlich; die Kommunikation kann seriell über ASCII-Befehle erfolgen. Ein einfaches Programmmodul in der Anwendungssoftware übermittelt die Motorbefehle und wertet die Antworten aus. Die Okularkamera kann ebenfalls über eine Bibliothek herstellereigener Befehle angesprochen werden [IDS 07]. Auf diese Option wird aber verzichtet, da es für die verwendete Kamerafamilie unter HALCON eine standardisierte Framegrabber-Schnittstelle gibt, sodass die gewonnenen Bilddaten unmittelbar im Format der Weiterverarbeitung vorliegen. HALCON ist eine umfangreiche Sammlung von Bildverarbeitungsoperatoren, auf deren Basis die Auswertung der Objektszenen durchgeführt wird [MVTec 08].

Bei der Auswertung von gewonnenen Bilddaten und deren Umwandlung in geodätische Koordinaten sowie der Weiterberechnung von Deformationsmodellen sind eine Vielzahl mathematischer Operatoren – insbesondere der Matrizenrechnung – notwendig, die C++ nicht standardmäßig bietet. Deshalb wird für die Programmerstellung zusätzlich auf Matlab zurückgegriffen. Vorgefertigte Operatoren lassen sich in einer High-Level-Programmierumgebung zu Funktionen mit einfacher Syntax kombinieren und mittels eines Compilers als C++ -Bibliotheken exportieren. Die Erstellung komplexer Routinen gestaltet sich auf diese Weise übersichtlich und leicht verifizierbar [MathWorks 08].

2.2.2 Bildausschnitt

Die Okularkamera liefert ein hochauflösendes Bild der mit dem Tachymeter beobachteten Objektszene. Da dieses die Darstellungsmöglichkeiten aktueller Standardmonitore übersteigt, muss die Visualisierung des Gesamtbilds verkleinert erfolgen. Zu diesem Zweck wird das Kamerabild durch Interpolation auf eine entsprechend gewählte Auflösung reduziert. Geeignet, aber nicht unbedingt notwendig, sind hierfür ganzzahlige Faktoren, um den Rechenaufwand gering zu halten und unerwünschte Artefakte zu vermeiden. Für die Praxis hat sich die Reduktion auf die halbe Seitenlänge als geeignet erwiesen. Dieses Verfahren betrifft lediglich die Anzeige; die Erfassung und mögliche Auswertung der Bilder bezieht sich unverändert auf die gesamte Auflösung.

Bei bekannter Anzeigengröße ist auch direkt eine reduzierte Datenerfassung durch Subsampling oder Binning auf Hardwareebene möglich. Subsampling reduziert die Auflösung, indem nur jedes n-te Pixel ausgelesen wird. Bei höherwertigen Einsensor-Farbkameras geschieht dies farbrichtig, d. h., für jede Farbe wird separat gezählt. Beim Binning werden jeweils n Pixel zu einem gemeinsamen Farbwert gemittelt, sodass die Auflösung ebenfalls sinkt. Subsampling und Binning ist jeweils in horizontaler und vertikaler Richtung getrennt durchführbar. Die Senkung der Datenmenge ermöglicht eine Erhöhung der Kamerageschwindigkeit, sodass deutlich höhere Aufnahmeraten erreicht werden können. Das Bild wird dabei jedoch unschärfer und detailärmer, was für entsprechend geringe Darstellungsauflösungen jedoch in Kauf genommen werden kann. Geeignet sind diese Verfahren folglich für eine Echtzeitdarstellung, in welcher nicht unmittelbar gemessen werden muss, z. B. für die manuelle Anzielung.

Soll das Bild in Originalgröße dargestellt werden, ist man in der Regel auf die Beschränkung auf einen Bildausschnitt angewiesen. Dies ist ebenfalls durch Software- oder Hardwarealgorithmen möglich. Erstere operieren dabei wieder auf dem Gesamtbild und passen lediglich die Anzeige an, während letztere die physikalischen Dimensionen des ausgelesenen Bereichs beschneiden. Auch auf diese Weise ist eine Erhöhung der Framerate ohne Verlust an Bildqualität möglich. Bei nicht bildfüllenden, bekannten Zielen kann so die Messfrequenz deutlich gesteigert werden.

Durch Reduktion des Bildausschnitts unter die Anzeigeauflösung kann ein digitaler Zoom-Effekt realisiert werden. Da hierdurch kein Informationsgewinn erreicht werden kann, ist dieser für automatische Operatoren ohne Belang, kann jedoch für menschliche Bediener bei pixelgenauen Selektionen im Bild unterstützend wirken. Weil bei einer derart vergrößerten Darstellung Zwischenpixel interpoliert werden müssen, weisen die Bilder zunehmend Treppenstrukturen und Farbartefakte auf.

Für die Umrechnung von Pixelkoordinaten der Anzeige bzw. des Gesamtbilds in tachymetrische Richtungen – bezogen auf die Position des Fadenkreuzes im Bild – müssen die Dimensionen von erfasstem und dargestelltem Bild sowie die Subsampling- bzw. Binning-Faktoren bekannt sein. Für die Mehrzahl der Anwendungen wird der verwendete Bildausschnitt gleichmäßig um die Zielachse zentriert sein. CMOS-Sensoren bieten jedoch die Möglichkeit, rechteckige Ausschnitte beliebiger Größe und Position zu wählen. Da das Fadenkreuz und damit der Bezug zur tachymetrischen Zielachse in diesen nicht zwangsweise enthalten ist, kann über die horizontalen und vertikalen Offsetwerte des jeweiligen Ausschnitts diese Beziehung wiederhergestellt werden. Praktischerweise wird der Zielausschnitt jedoch durch eine Tachymeterbewegung zentriert.

2.2.3 Steuerprogramm

Für die kombinierte Steuerung der integrierten Sensoren und die Datenerfassung wurde für die folgenden Kalibrier- und Messaufgaben ein einfaches Softwarepaket entwickelt, das schnellen Zugriff auf einzelne Komponenten bietet und als Grundlage für anwendungsspezifische Routinen dient.

🛃 IATS Steuerung 📉	
Aktuelle Tachymeterdaten Hz : 331.9151 gon V : 99.4905 gon Kamera aus	Fokus Control
D : m Anzufahrende Daten	Ausschalten Referenzfahrt Beenden
Hz: 331.7746 gon V: 99.5023 gon Beenden	
Positionieren Distanzmessung Lagewechsel	

Abb. 2.5: Programmfenster Tachymetersteuerung Abb. 2.6: Programmfenster Fokussteuerung

Ausgangspunkt ist dabei der Zugriff auf die herkömmliche Tachymetersensorik (Abb.2.5). Dies betrifft in der einfachsten Ausbaustufe das Auslesen der rohen Winkelwerte in einer Echtzeitschleife sowie grundlegende Motorisierungsbefehle (Referenzierung und Bewegung der Kamera). Im Hintergrund werden weitere tachymeterspezifische Routinen vorgehalten, z. B. die Temperaturerfassung. Je nach Anwendung kann über GeoCOM der komplette Funktionsumfang des Basistachymeters integriert werden. Zu berücksichtigen ist dabei insbesondere, dass die tachymetrischen Teilkreisablesungen bei horizontiertem Instrument nicht mit den korrekten Richtungsinformationen übereinstimmen, da eine Justierung bzw. Kalibrierung bezüglich eines physikalischen Fadenkreuzes nicht durchgeführt werden kann. Entsprechende Mess- bzw. Steuergrößen müssen also gemäß Kapitel 3 umgerechnet werden. Ergänzender Teil der tachymetrischen Steuerung ist die Fokusaktorik (Abb.2.6). Hier ist insbesondere die Routine zur wiederholten Positionierung an einer Referenzposition von Bedeutung. Weitere Programmteile erlauben das schrittweise relative oder absolute Bewegen der Fokussierlinse.

Hauptelement der Steuerungsroutinen ist der Zugriff auf die Okularkamera über die Framegrabber-Schnittstelle des Software-Pakets HALCON (Abb.2.7). Auf unterschiedliche Aufnahmebedingungen und Anwendungsanforderungen kann über die Einstellung der Hardware-Parameter (Pixeltakt, Wiederholrate, Belichtung, Verstärkung) reagiert werden. Weitere Funktionen dienen der Visualisierung (z. B. Rotation des in 2. Lage kopfstehenden Kamerabilds um die jeweilige Zielachse) oder Automatisierung (Autofokus basierend auf zentralen Kontrastwerten oder einer gemessenen Entfernung) sowie der Messbilddokumentation. Qualitätsgrößen des aktuellen Bilds werden dabei im Hintergrund kontinuierlich bestimmt und auf Wunsch visualisiert (Abb.2.8). Sie dienen automatisierten Prozessen im Regelungskreislauf als Trigger- und Bewertungsmerkmale. Für die Kamerasteuerung ist die Interaktion mit anderen Sensorroutinen, wie dem Zugriff auf tachymetrische Messdaten und den Fokusmotor, elementar.

Aufbauend auf die hardwarebezogenen Komponenten wurden Softwarealgorithmen der Messdatenverarbeitung entwickelt. Für die Aufgabenstellung der automatischen Zielpunkterkennung und des wiederholten Messens identischer natürlicher Ziele ist dies vor allem die Bildanalyse hinsichtlich strukturell bekannter Zielmarkierungen (Kreismarken, HDS-Ziele, Blob-Strukturen) und Matchingverfahren (Abb.2.9). Die Ergebnisse der Messung im Bild sind dann wieder Eingangsgrößen der Tachymetersteuerung. Je nach Anwendungsfall variiert die Verarbeitungsschicht der Messdaten; Grundgerüst ist dabei ein möglichst allgemein gehaltener und flexibler Sensoriklayer.

uEye Kamerakind : Peter	×		
Farbkanäle anzeigen	Skalieren auf 128		
Fadenkreuz	Hardwarezoom: 1 x Softwarezoom: 1 x		
Fokussteuerung aus	 Grauwertbild C Farbbild ☐ Binning 4x 		
Autofokus mit Distanz 🔲 mit Feinsuche	PixelClock		
Autofokus 400 Radius	5 40 43		
Belichtungsanpassung	Max. Framerate		
Grabbing aus	2.91 5.00 5.92		
Grabbing Pause ein	Exposure maximal		
Kamera aus	0.16 199.68 199.68		
Kalibriermessung	20		
Bild speichern			

Abb. 2.7: Programmfenster Kamerasteuerung



Abb. 2.8: Programmfenster Bildstatistik Abb. 2.9: Programmfenster Bildmessung

3 Kalibrierverfahren

3.1 Grundlagen

Die Abgrenzung des Videotachymeters zum herkömmlichen Nahbereichsphotogrammetrie-System liegt in der Tatsache, dass sämtliche qualitativen Vorteile der Präzisionstachymetrie in Kombination mit der Bildinformation zusätzlich genutzt werden können. Beliebige Pixel können so zur Georeferenzierung unmittelbar mit der Richtungsinformation in Tachymetergenauigkeit verknüpft werden, Tiefeninformationen werden mittels EDM erzielt und eine einfache Automatisierung von Messabläufen ist über die Motorisierung moderner Instrumente möglich. Idealerweise beeinflussen sich die beiden Komponenten "Tachymeter" und "Kamerasystem" in ihren Basisfunktionen nicht. Die Kalibrierung von bildgebenden Tachymetern gliedert sich deshalb prinzipiell in mehrere Einzelbereiche: erstens in die herkömmliche Tachymeterkalibrierung, zweitens in die Kalibrierung der Kamera und drittens in die Kombination von Teilkreisen und Bildinformation.

3.1.1 Tachymeterkalibrierung

3.1.1.1 Primäre Achsfehler

Der erste Schritt bei der Kalibrierung herkömmlicher Tachymeter ist die Bestimmung der primären Achsfehler: Kippachse KK und Zielachse ZZ bzw. Stehachse VV stehen im Idealfall paarweise aufeinander senkrecht und schneiden sich in einem Punkt. Die Stehachse muss parallel zur Lotlinie LL im Aufstellungspunkt sein und diese die Nullmarke des Höhenindex enthalten. Sind diese Bedingungen nicht exakt gegeben, so erhält man

- einen Höhenindexfehler e_1 , wenn die Nullmarke des Höhenindex nicht in LL liegt,
- einen Zielachsfehler e_2 , wenn ZZ nicht senkrecht auf KK steht,
- einen Kippachsfehler e_3 , wenn KK nicht senkrecht auf VV steht sowie
- einen Stehachsfehler e_4 , wenn VV nicht parallel zu LL ist.

Die Stehachse ist dabei die Rotationsachse des Tachymeters senkrecht zur Alhidade. Sie soll den Horizontalkreis rechtwinklig und ohne Exzentrizität durchstoßen.

Die Kippachse ist durch den mechanischen Aufbau des Tachymeterkörpers realisiert. Sie soll den Vertikalkreis rechtwinklig und ohne Exzentrizität durchstoßen.

Die Zielachse eines Fernrohrs schließlich ist definiert als die Verbindungsgerade eines unendlich fernen, mit dem Strichkreuz eingestellten Punktes mit dem dingseitigen Brennpunkt des Objektivs [Luhmann 03]. Dabei stimmt sie in der Regel nicht mit der optischen Fernrohrachse überein und ändert sich zudem durch das Verschieben der Fokussierlinse.

Der hauptsächlich für geodätische Messungen verwendete Entfernungsbereich $> 10 \,\mathrm{m}$ wird dabei von nur 10 % des Fokussierwegs abgedeckt, sodass die Achsfehler in der Regel nur in diesem Bereich bestimmt werden. Für den restlichen Fokussierweg ist dann jedoch mit einem Gang der Fokussierlinse zu rechnen, der gesondert zu ermitteln ist.

Der Höhenindexfehler wird durch Messung in zwei Lagen nahe dem Horizont bestimmt

$$e_1 = \frac{V_I + V_{II} - 400^{\text{gon}}}{2} \tag{3.1}$$

und die Verbesserung durch einfache Summation angebracht:

$$V_{\text{korr}} = V - e_1 \tag{3.2}$$

Der Zielachsfehler wird ebenfalls durch Zwei-Lagen-Messung ermittelt

$$e_2 = \frac{Hz_{II} - Hz_I - 200^{\text{gon}}}{2} \tag{3.3}$$

wobei seine Verbesserung vom aktuellen Zenitwinkel abhängig ist:

$$Hz_{\rm korr} = Hz + \frac{e_2}{\sin V} \tag{3.4}$$

Der Kippachsfehler schließlich kann durch Steilanzielungen unter etwa 50 gon aus zielachsfehlerkorrigierten Messungen in beiden Lagen bestimmt werden

$$e_{3} = \left(\frac{Hz_{II} - Hz_{I} - 200^{\text{gon}}}{2} - \frac{e_{2}}{\sin V}\right) \tan V$$
(3.5)

und muss ebenfalls in Abhängigkeit vom Zenitwinkel korrigiert werden:

$$Hz_{\rm korr} = Hz + e_3 \cot V \tag{3.6}$$

Da ein Videotachymeter über kein mechanisches Fadenkreuz mehr verfügt, ist eine unmittelbare Bestimmung der Achsfehler über Zwei-Lagen-Messung, z. B. nach den Justage-Service-Programmen der Tachymeter [Leica 07a], nicht mehr möglich. Die Achsfehler sind also durch ein anderes geeignetes Verfahren im Rahmen der kombinierten Parameterschätzung der Kamera zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3.2.3) und bei der Umrechnung von Pixel- in Richtungswerte anzubringen. Eventuelle hardwareseitige automatische Achsfehlerkorrekturen der Tachymeter müssen daher deaktiviert werden.

Da der Stehachsfehler kein Geräte-, sondern ein Aufstellungsfehler ist, kann er unabhängig von einer Anzielung mittels des Fadenkreuzes z.B. durch einen integrierten Zweiachs-Kompensator bestimmt und eliminiert werden. Eine automatische Korrektur der Richtungswerte am Tachymeter um die Stehachsschiefe aus den aktuellen Kompensatorwerten ist daher zulässig und beeinflusst eventuelle Richtungsabgriffe aus den Kamerabildern nicht. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Kompensator selbst einem Indexfehler unterliegt (ähnlich einer herkömmlichen Libelle). Dieser Indexfehler muss in Längs- und Querkomponenten zusätzlich bestimmt werden.

3.1.1.2 Temperaturabhängigkeit der Achsfehler

Die primären Achsfehler sind über die Zeit nicht konstant. Durch Temperaturschwankungen, Erschütterungen und nach längerem Transport kann es zu Veränderungen in der Mechanik kommen, sodass die Korrekturterme für die Achsfehler regelmäßig neu bestimmt werden müssen [Leica 03]. Auch wenn dies bei einer festen Pfeiler-Installation für langfristige Monitoring-Aufgaben nur bedingt befürchtet werden muss, ist zumindest die Abhängigkeit der Korrekturen von der Umgebungstemperatur im Vorfeld zu prüfen und ggf. zu berücksichtigen.

Für die Kalibrierung wurde das Videotachymeter auf einem Pfeiler in der Klimakammer des Geodätischen Prüflabors aufgebaut; als Zielmarkierung wurde mit dem Kollimator der Kamerakalibrierung (siehe Abschnitt 3.2.1) ein fiktiver Objektpunkt in 150 m Entfernung simuliert. Die Messung erfolgt im Kamerabild mittels der zuvor nach Abschnitt 3.2 bestimmten Transformationsparameter in zwei Lagen; die Resultate der Temperaturkalibrierung stellen also Zuschläge auf die Achsfehler-Korrekturen der Kamerakalibrierung dar. Bestimmt wurden die Achsfehler in der Temperaturreihenfolge $30^{\circ} \rightarrow 0^{\circ} \rightarrow 20^{\circ} \rightarrow 40^{\circ} \rightarrow 10^{\circ} \rightarrow 30^{\circ}$ [C]. Die unterschiedlichen Temperatursprünge verhindern, dass sich einseitig wirkende Materialspannungen aufbauen können; die Wiederholungsmessung bei annähernd 30 °C soll Hysterese-Effekte aufdecken.



Abb. 3.1: Höhenindex- und Zielachsfehler bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Resultate zeigt Abb.3.1: Während der Zielachsfehler keinen signifikanten Temperatureinflüssen unterworfen ist (Steigung der Regressionsgeraden von $0,003 \text{ mgon}/^{\circ}$ C bei einer Streuung von $\sigma = 0,16 \text{ mgon}$), sind diese beim Höhenindexfehler durchaus zu berücksichtigen. Der temperaturabhängige Koeffizient beträgt hier 0,055 mgon/°C bei einer Streuung von $\sigma = 0,28 \text{ mgon}$.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch hinsichtlich des Hysterese-Effekts: Dieser ist für den Zielachsfehler vernachlässigbar klein (0,02 mgon), beträgt für den Höhenindexfehler jedoch 0,4 mgon. Allerdings kann dieser Wert nicht von der natürlichen Streuung um die Temperaturregression getrennt werden, da beide in etwa dieselbe Größenordnung aufweisen.

Idealerweise befindet sich der Nulldurchgang der Regression an der Stelle der Raumtemperatur bei den kombinierten Kalibriermessungen, da die dort bestimmten Achsfehler bei der Temperaturkalibrierung bereits berücksichtigt werden. Für den Höhenindexfehler liegt er bei 15 °C, sodass dieser Wert für eine Verbesserung als Bezugstemperatur gewählt werden kann. Die kombinierten Messungen wurden bei ca. 20 °C durchgeführt, was einem Korrekturwertunterschied von 0,26 mgon und damit der Größenordnung der einfachen Standardabweichung entspricht.

Es ist außerdem zu berücksichtigen, dass sich die Geräteinnentemperatur aufgrund von Wärmeentwicklung in den elektronischen Bauteilen teilweise deutlich von der Umgebungstemperatur unterscheiden kann. Dies gilt vor allem für den Zeitraum von ca. einer Stunde nach dem Einschalten des Tachymeters, bis eine konstante Arbeitstemperatur erreicht ist. Bei den vorliegenden Messungen wurde das Instrument mit ausreichender Vorlaufzeit untersucht, um diese Effekte zu vermeiden. Unabhängig davon ist aber eine Korrektur der Einlaufeffekte mit den bestimmten Parametern möglich.

Der gewählte Messbereich von 0 °C bis 40 °C spiegelt den erwarteten Temperaturbereich in der Messumgebung wider; eine erwünschte Ausdehnung in den Frostbereich war wegen der Spezifikationen der Kamera nicht möglich.

3.1.1.3 Justierung der EDM-Achsen

Je nach Instrumententyp verfügen moderne Tachymeter neben der elektromagnetischen Distanzmessung auf Reflektoren auch über die Möglichkeit der reflektorlosen Distanzmessung. Die Streckenmessgeräte sind dabei koaxial in das Fernrohr integriert. Für die Anwendung als Videotachymeter ist vor allem die reflektorlose Distanzmessung mittels sichtbarem Laser interessant, da sie es ermöglicht, ein nicht signalisiertes Objekt in 3D zu erfassen. Daneben dient die Messung auf Reflektoren mit Wellen im IR-Bereich vor allem zur genauen Referenzpunktmessung.

Wie für ein herkömmliches Tachymeter, ist für das Videotachymeter unabdingbar, dass die Zielachse und die Messachse der EDM zusammenfallen. Für manche reflektorlose Distanzmesser kann der Auftreffpunkt des Lasers mittels mechanischer Justierschrauben verändert werden; in anderen Fällen (wie beim TCRA1201+) und generell bei der Justierung der IR-Messkeule ist dazu jedoch eine Servicewerkstatt notwendig. Durch diese Eingriffe ergeben sich in der Regel Änderungen am Linsensystem des Tachymeters (im vorliegenden Fall wird die EDM z. B. durch leichtes Kippen der Objektivlinse mit dem Zielstrahl zur Deckung gebracht), die eine vollständige Neukalibrierung des Kamerasystems erforderlich machen. Es ist also unerlässlich, vor Beginn weiterer Kalibrierarbeiten die spätere Lage des virtuellen Fadenkreuzes auf dem Kamera-Chip festzulegen und die mechanischen Justierungen bezüglich dieser Pixelposition durchzuführen. Da die EDM nicht durch die Schiebelinse beeinflusst wird, bleibt ihre Achse beim Umfokussieren konstant.

3.1.1.4 ATR-Kalibrierung

Bereits seit etlichen Jahren verfügen motorisierte Tachymeter über die Möglichkeit der selbständigen Zielerkennung, -anzielung und -verfolgung bei der Verwendung von Reflektoren. Diese Funktionalität (bei der Firma Leica ATR – Automatic Target Recognition – genannt) wird erreicht, indem ein Teil des Sehstrahls durch einen halbdurchlässigen Splitterwürfel aus dem optischen Pfad ausgeblendet und einer CCD-Kamera zur Auswertung zugeführt wird. Die Reflexion eines Prismas kann dann als signifikant heller Bereich detektiert, und die Prismenmitte über einfache Schwerpunktalgorithmen bestimmt werden. Für diese Aufgabe sind Bilder geringer Qualität ausreichend; insbesondere kann auf eine Fokussierung des ATR-Bilds verzichtet werden. Wichtig ist lediglich, dass sich die Reflexion in einem Binärbild deutlich vom Hintergrund abhebt, selbst wenn dieser sehr hell ist, bzw. dass Störreflexionen die Auswertung nicht beeinträchtigen.

In der Anfangszeit der ATR wurden CCD-Chips mit 0,3 MPixel Auflösung (VGA-Standard) und Pixelgrößen von 6–10 µm eingesetzt [Wasmeier 02]. Heute setzen die Hersteller vor allem auf CMOS-Kameras, mit denen kürzere Belichtungszeiten möglich sind und somit weniger störendes Überstrahlen in den ATR-Bildern auftritt. Die Pixelgröße für diese Anwendung beträgt bei der Baureihe TCRA1200+ 6 µm und ist damit mit den Vorgänger-Chips vergleichbar; allerdings ist die Auflösung deutlich höher [Leica 07b].

Die Kalibrierung der ATR ist erforderlich, da bei Anzielung eines Punktes mit dem Fadenkreuz dieser nicht exakt auf dem Mittelpunkt des Kamera-Chips abgebildet wird (die ATR-Zielachse stimmt nicht mit der Fernrohrachse überein). Dadurch kommt es zu Ablagen, die für eine präzise automatische Zielung berücksichtigt werden müssen. Umgekehrt ist es nicht nötig, bei kalibrierter ATR das Fadenkreuz exakt auf die Mitte des Zielprismas auszurichten. Eine eventuelle Exzentrizität wird vom Tachymeter rechnerisch berücksichtigt. Dadurch entfallen zeitintensive Feinpositionierungen; als Resultat entspricht jedoch der angezeigte Display-Wert nicht der aktuellen Ausrichtung der Zielachse, sondern dem korrigierten Richtungswert zum Zielpunkt. Da diese Ablagen im ATR-Bild von Messung zu Messung variieren, ist eine Berechnung der Richtung zum Zielpunkt im Kamerasystem ohne Kenntnis der korrigierten Richtung nicht möglich (in Abb.3.2 kann die rot gestrichelte Grenze nicht



Abb. 3.2: Korrekturschema bei Verwendung der ATR und der Okularkamera. Die Reihenfolge der Umrechnungsschritte ist rot markiert.

überwunden werden). Bei der Umrechnung einer ATR-Anzielung in das System der Kamera ist also immer die angezeigte Richtung am Tachymeter die Ausgangsgröße, auch wenn sie zum entsprechenden Zeitpunkt weder der tatsächlichen Richtung zum Zielpunkt noch der tatsächlichen Fernrohrrichtung entspricht. Folglich ist die ATR-Kamera beim Videotachymeter prinzipiell nach den gleichen Grundlagen gegenüber dem virtuellen Fadenkreuz zu kalibrieren wie bisher nach dem mechanischen: Die automatische Anzielung mittels ATR-Kamera wird dabei einer manuellen Anzielung durch Messung im Bild gegenübergestellt. Das Resultat sind die Kamera-ATR-Korrekturparameter in Form von Verbesserungswerten für Horizontal- und Zenitwinkelablesung, die identisch wirken wie im herkömmlichen Fall.

Durch die feste Fokussierung der ATR-Kamera ändert sich der optische Weg der ATR beim Umfokussieren im Gegensatz zur Okularkamera oder dem herkömmlichen Objektiv nicht, sodass streng genommen die ATR-Kalibrierung nur für die entsprechende Fokuseinstellung gilt. Je nach Betrag des Fokussierlinsengangs sind für andere Entfernungsbereiche zusätzliche Ablageparameter zu bestimmen (siehe auch [Preis et al. 07]).

Im Labor wurde dieser Zusammenhang mittels einer Aufsteckzielmarke, welche im Kamerabild leicht zu detektieren ist, überprüft (Abb.3.3 links). Dabei wurde das Prisma in Entfernungen von 3,60 m bis 112 m mittels ATR positioniert und die vom Tachymeter eingestellte ATR-Zielrichtung



Abb. 3.3: Prisma mit Zielmarke zur ATR-Korrektur (links) und Korrekturgrößen (rechts)

mit der Messung im Bild verglichen. Die entsprechenden Verbesserungen, die an die ATR-Richtung angebracht werden müssen, um die tatsächliche Kamerarichtung zu erreichen, zeigt Abb.3.3 rechts.

Zu berücksichtigen ist dabei, dass vor allem im Nahbereich < 20 m und bei Vorpositionierungen, die bereits auf der Prismenfläche liegen, einzelne wiederholte ATR-Positionierungen aufgrund des verwendeten Algorithmus um mehrere Milligon voneinander abweichen können, wogegen die Messungen im Bild erwartungsgemäß Standardabweichungen von deutlich unter 1 mgon aufweisen. Dementsprechend varüeren auch die Korrekturwerte. Theoretisch müsste eine funktionale Abhängigkeit von der Bildhauptpunktposition und damit der Fokusstellung zu erkennen sein; diese geht jedoch in der ATR-Genauigkeit im Nahbereich unter. Betrachtet man nur den für ATR-Anwendungen hauptsächlich relevanten Bereich von über 40 m, so können die Ablagen in Hz und V mit -11 mgon als weitgehend konstant angesetzt werden. In diesem Bereich variiert die Fokusposition bei Scharfstellung nur um 400 Schritte (2,5 % des Gesamtwegs). Dies ist der gängigen Praxis auch bei herkömmlichen Tachymetern gleichzusetzen, lediglich ein Korrekturwertepaar bei Distanzen > 100 m zu bestimmen.

Das Problem der zusätzlich notwendigen Parameter für weitere Fokussierungen lässt sich umgehen, wenn man das Fadenkreuz nicht festhält, sondern mit dem Bildhauptpunkt über den Chip wandern lässt. In diesem Fall wären die Ablageparameter für beliebige Fokusstellungen konstant. Allerdings hat dieses Verfahren andere Nachteile (vor allem hinsichtlich der EDM-Kalibrierung).

3.1.1.5 Variabilität der Korrekturparameter

Die Hersteller von Präzisionstachymetern sehen eine regelmäßige Kalibrierung der Instrumente vor, zusätzlich nach längeren Lager- oder Transportzeiten oder vor Anwendungen mit höchsten Präzisionsforderungen [Leica 03]. Der Videotachymeter-Prototyp TCRA1201+ stellt dabei keine Ausnahme dar. Während für herkömmliche Tachymeter jedoch einfache und schnelle Feldverfahren existieren, um die Korrekturterme zu ermitteln, ist dies für ein Instrument ohne mechanisches Fadenkreuz komplizierter.

Die Bestimmung der Abbildungsparameter vom Pixel- ins Richtungssystem ist aufwendig und zeitintensiv, und sollte, unter Berücksichtigung des gesamten Fokussierlinsenwegs, im Labor durchgeführt werden. Ist der verwendete Fokusbereich sehr gering, ist für diesen auch eine Kalibrierung im Feld möglich: [Walser 05] kommt zu dem Ergebnis, dass zwei jeweils in einem 3×3 -Raster abgebildete Ziele dafür ausreichend sind, wenngleich für eine zuverlässige Schätzung auch unter Berücksichtigung der Achsfehler besser sechs Ziele unterschiedlicher Vertikalrichtungen verwendet werden sollten. Verzichtet man auf eine Neubestimmung der Kameraparameter – geht man also davon aus, dass das die optische Abbildung beeinflussende Linsen-Kamera-System weitgehend unverändert bleibt –, so können mittels der herkömmlichen Prüfroutinen Zuschlagswerte für die bekannten Parameter (z. B. Achsfehler) bestimmt werden. Sie wirken prinzipiell additiv auf die Kalibriergrößen und können so zeitlich variable Geräteeinflüsse repräsentieren. Mittels einer Standard-Kalibrierung mit Zielen in unterschiedlichen Entfernungen (Fokusstellungen) ist ggf. auch ein multiplikativer Korrekturterm für die Achsfehler, und damit indirekt für den Bildhauptpunkt, möglich.

Die praktische Erfahrung im Lauf der Arbeit mit dem Videotachymeter auf Basis des Leica TCRA1201+ hat gezeigt, dass die Kollinearität von festgelegter Zielachse und EDM-Achse mit der Zeit nicht aufrecht erhalten bleibt. Dabei hat sich das optische System im Gegensatz zur EDM als weitgehend stabil erwiesen. Aufgrund der genannten Eingriffe in den optischen Strahlengang bei der Justierung der EDM-Ausrichtung ist diese jedoch zwangsweise mit den erwähnten umfangreichen Maßnahmen zur Neukalibrierung verbunden. Umgangen wird dieses Problem, indem nicht die EDM nach der Zielachse, sondern die Zielachse nach dem Auftreffpunkt der EDM ausgerichtet wird. Dies ist zu realisieren, indem die Kalibrierparameter des optischen Systems unabhängig von der Lage des Pixels, welches das Fadenkreuz visualisiert, angegeben werden können (vgl. Abschnitt 3.2.3). Das Fadenkreuz wird dadurch jedoch aus dem Symmetriezentrum des Kamerachips verschoben.

3.1.2 Kamerakalibrierung

Das Fernrohr des Tachymeters, bestehend aus Objektivlinse, Fokussierlinse und Bildebene (Kamerachip), bildet ein photogrammetrisches Aufnahmesystem, welches durch die Parameter der inneren und äußeren Orientierung vollständig beschrieben werden kann. Während die äußere Orientierung (Lage des Projektionszentrums und Rotation der Achsen des Aufnahmesystems gegenüber dem Bezugssystem) zumindest anteilig durch Steh- und Kippachse mit den Teilkreisen des Tachymeters verknüpft und damit Gegenstand einer kombinierten Kalibrierung ist, beschreibt die innere Orientierung die Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem und kann daher getrennt von der Tachymeter-Funktionalität bestimmt werden.

3.1.2.1 Innere Orientierung

Grundlage des photogrammetrischen Abbildungsmodells ist die Zentralprojektion nach dem Prinzip einer Lochkamera. Bezugspunkt ist dabei das Projektionszentrum O', durch das alle Abbildungsstrahlen geradlinig verlaufen und welches sich in einer Entfernung c von der Abbildungsebene befindet. Die Parameter der inneren Orientierung sind demnach (siehe z. B. [Luhmann 03]):

- Bildhauptpunkt H'Lotfußpunkt des Projektionszentrums O' im Bildkoordinatensystem (x'_0, y'_0)
- Kamerakonstante clotrechter Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene [O'H']
- Abbildungskorrekturen

Abweichungen von der zentralperspektivischen Modellabbildung, in erster Linie die radialsymmetrische Verzeichnung $\Delta r'$

Mit Hilfe dieser Parameter lässt sich der Abbildungsort eines Punktes auf der Bildebene (x'_P, y'_P) bezogen auf das Projektionszentrum darstellen als

$$\mathbf{x}_{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} x'\\y'\\z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_P - x'_0 - \Delta x'\\y'_P - y'_0 - \Delta y'\\-c \end{bmatrix}$$
(3.7)

wobei $\Delta x', \Delta y'$ die achsbezogenen Anteile der Verzeichnungskorrektur bezeichnen.

Der Hauptanteil liegt dabei in der radial-symmetrischen Verzeichnung. Sie entsteht durch systematische Brechungsvariationen an den Objektivlinsen und ist abhängig von der aktuellen Fokussierung. Üblicherweise wird sie nach [Brown 71] durch eine Reihenentwicklung ausgedrückt und kann letztlich dargestellt werden als

$$\Delta x' = K_1 x'_P (r_P^2 - r_0^2) + K_2 x'_P (r_P^4 - r_0^4) + \dots$$
(3.8)

$$\Delta y' = K_1 y'_P (r_P^2 - r_0^2) + K_2 y'_P (r_P^4 - r_0^4) + \dots$$
(3.9)

mit r_P als Abstand des Bildpunkts vom Bildhauptpunkt und r_0 als wählbarem Abstand vom Bildhauptpunkt, bei dem das Verzeichnungspolynom einen zusätzlichen Nullpunkt erhält (normalerweise etwa bei $\frac{2}{3}$ des Bildradius). Die Reihe kann üblicherweise nach dem ersten oder zweiten Term abgebrochen werden.

Zusätzliche Anteile der Abbildungskorrekturen entstammen der radial-asymmetrischen Verzeichnung, die durch die Dezentrierung von Linsen verursacht wird, und der Affinität und Scherung des Bildkoordinatensystems. Gegenüber der radial-symmetrischen Verzeichnung ist die radial-asymmetrische Verzeichnung gering, und wird bei hochwertigen Objektiven in der Regel vernachlässigt. Affinität und Scherung sind Fertigungsabweichungen des Bildkoordinatensystems hinsichtlich Orthogonalität und Gleichmaßstäbigkeit der Koordinatenachsen, welche bei modernen Bildsensoren durch die Anordnung der Pixel realisiert werden. Ihre Berücksichtigung erfolgt später beim kombinierten Ansatz.

Die Bestimmung der inneren Orientierung erfolgt über ein Kalibrierverfahren, z. B. mittels einer Testfeldkalibrierung. Sie ist jedoch auch zusammen mit den Parametern der äußeren Orientierung auf Basis der Kollinearitätsgleichungen möglich – dieser Ansatz soll in den folgenden Abschnitten genutzt werden.

3.1.2.2 Verdrehungen der Bildebene

Idealerweise liegt die Bildebene so, dass H' genau mit ihrem Mittelpunkt zusammenfällt. Eine Abweichung hiervon kann zum einen durch eine Translation der Bildebene hervorgerufen werden, zum anderen aber auch durch eine Kippung um die x'- bzw. y'-Achse (Rotationen ω bzw. φ der äußeren Orientierung). Diese Verdrehungen können beim Einbau des Kamerachips meist sehr klein gehalten werden. Bei einer auf den Kollinearitätsgleichungen beruhenden Parameterschätzung zusammen mit Richtungsbeobachtungen des Tachymeters können sie jedoch nicht signifikant aufgedeckt werden, da sie als kleiner konstanter Rotationsanteil funktional mit den deutlich größeren beobachteten Richtungen verknüpft sind und zudem stark mit der Bildhauptpunktlage korrelieren. Eine Bestimmung ist nur möglich, wenn mit bekannten Richtungen für alle Zielpunkte gearbeitet werden kann.

Eine Verkantung der Kamera infolge einer Drehung um die z'-Achse (Zielachse, Rotation κ der äußeren Orientierung) hingegen ist leicht aufdeckbar, da das Tachymeter, das die möglichen Bewegungen im übergeordneten System vorgibt, diese selbst nicht bewirken kann. Sie ist damit frei von funktionalen Abhängigkeiten. Bezugsgröße der Verkantung ist die Ausrichtung der x'-Achse, die bei Drehung in die Steh-Kippachs-Ebene des Tachymeters parallel zur Kippachse liegen soll. Eine Abweichung hiervon wird

dem Beobachter als gegen den Horizont verkippte Darstellung der Objektszene deutlich. Es besteht die Gefahr von Fehlinterpretationen, da menschliche Beobachter einen aufrechten Okularblick gewöhnt sind, während für die automatische Extraktion von horizontalen Strukturen eine leichte Verkantung sogar wünschenswert ist. Die Bestimmung der Chipverdrehungen erfolgt, soweit möglich und notwendig, im kombinierten Ansatz.

3.1.2.3 Entfernungsabhängige Fokuseinstellung

Die variable Stellung der Fokussierlinse im optischen Weg des Abbildungssystems dient unmittelbar der Scharfabbildung von Objektpunkten unterschiedlicher Entfernungen auf der Bildebene. Da damit das optische System veränderbar ist, wirkt sich dies auch auf die Parameter der inneren Orientierung aus:

- Liegt der Verschiebeweg der Linse nicht genau parallel zur Richtung der Kamerakonstanten und damit nicht genau orthogonal zur Bildebene, ergibt sich eine Verschiebung des Bildhauptpunkts beim Umfokussieren. Diese Verschiebung ist linear zum Verschiebeweg. Durch leichtes Kippeln und/oder Schlottern der Linse sind zudem untergeordnete Effekte zu erwarten, die ihrer Ursache folgend entweder systematisch, zufällig oder hysteresebedingt bzw. als Kombinationen auftreten können.
- Auch bei idealer Linsenführung ist die Kamerakonstante über das verschobene Projektionszentrum mit der Fokusstellung verknüpft. Sind alle Kenngrößen des optischen Systems bekannt, so kann nach [Walser 05] die aktuelle Kamerakonstante aus der Fokusposition direkt berechnet werden. Liegen die optischen Kenngrößen nicht vor, so ist die Funktion der Kamerakonstanten für jede Linsenstellung in der Kalibriermessung zu ermitteln.
- Durch die Änderung von Linsenposition und -ausrichtung sind auch die Parameter der radialen Verzeichnungen betroffen. Deren Änderungen sind jedoch meist gering.

Die jeweilige Position der Fokussierlinse F kann über den Encoder des Fokusantriebs relativ zu dessen Referenzpunkt bestimmt werden. Damit ist die Herleitung einer Funktion der Kamerakonstanten c = f(F) möglich.

Daneben kann für jeden Entfernungsbereich diejenige Fokuslinsenposition gefunden werden, in der die Abbildungsschärfe am höchsten ist, sodass die Fokusposition als Funktion der abzubildenden Entfernung x und umgekehrt dargestellt werden kann. Dies führt [Juretzko 04] für das System TOTAL durch und ermittelt so empirisch eine ausgleichende Ablaufkurve, die er für die Autofokussierung nutzt. Es handelt sich dabei um eine Potenzfunktion der Form

$$F = ax^b + c \tag{3.10}$$

Für den Videotachymeter-Prototyp des TCRA1201+ wurden Zielmarkierungen unter verschiedenen Entfernungen vom Nahbereich (\approx 1,5 m) bis fokussiertechnisch annähernd unendlich (\approx 500 m) mittels der Autofokus-Funktion scharf gestellt und die zugehörigen Entfernungen bestimmt. Bei der Auswertung zeigt sich, dass ein einzelner ausgleichender Ansatz nach (3.10) im Nahbereich zu unverhältnismäßig großen Verbesserungen führt. Es wurden daher drei ausgleichende Funktionen für unterschiedliche Entfernungsbereiche bestimmt (Abb.3.4), welche in den Randbereichen ausreichend identische Verläufe aufweisen (Tab.3.1). Die Abweichungen der tatsächlich gemessenen Stützstellen von der Funktion können dadurch im Bereich <50 Encoderschritte gehalten werden. Die Fokusstellung für ∞ liegt bei 1021 Encoderschritten.

Durch die panfokale Optik ist die Ablaufkurve theoretisch hyperbolischer Art (Funktion des Cotangens hyperbolicus). Da über den gesamten Fokussierweg jedoch ein großer Entfernungsbereich ab-

	a	b	С
$< 5 \mathrm{m}$	31036	-1,364143	2552
5 m - 50 m	26375	-1,053938	1010
> 50 m	5583	-0,719028	993

Tab. 3.1: Parameter der ausgleichenden Funktionen nach Gleichung (3.10)



Abb. 3.4: Ablaufkurve des Zusammenhangs zwischen scharf abgebildeter Objektentfernung und Stellung der Fokussierlinse

zudecken ist und die Schärfentiefe im Nahbereich sehr beschränkt ist, gelingt auch damit nur eine stückweise Beschreibung des Zusammenhangs. Aus diesem Grund wird der Potenzansatz beibehalten, zumal die dabei möglichen Stoßstellen der einzelnen Definitionsbereiche an sinnvollen Grenzen zwischen dem extremen Nahbereich, dem Nahbereich und dem Normalbereich tachymetrischer Messungen liegen.

Konstruktionsbedingt weist der Fokusmotor und damit der Encoder Totweg- und Hysterese-Effekte in einer Größenordnung von < 100 Encoderschritten auf [Walser 05]. Es ist daher darauf zu achten, dass sämtliche Vorgänge, die eine berechnete Fokuslinsen-Position automatisch anfahren, dies aus Richtung des Referenzpunkts tun. Ebenso sollte ein manuelles Einstellen der Fokuslinse aus dieser Richtung vorgenommen werden. Die Auswirkungen sind vor allem im Anfangsbereich der Fokussierung zu berücksichtigen, da dort geringe Linsenwege zu großen Entfernungsänderungen führen. Allerdings ist dort auch die Schärfentiefe erheblich höher.

3.1.3 Kombinierte Kamera-Tachymeter-Kalibrierung

3.1.3.1 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Lage und Ausrichtung des Bildkoordinatensystems (und damit der Kamera) in einem übergeordneten Objektkoordinatensystem. Dazu sind sechs Parameter notwendig: drei Translationen legen die Position \mathbf{X}_0 des Projektionszentrums fest und drei Rotationen $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$ beschreiben die gegenseitigen Verdrehungen.
Dann gilt für einen Objektpunkt \mathbf{X} in Abhängigkeit von der Bildpunktlage

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}'$$

und ausgeschrieben

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$
(3.11)

Dabei stellt m einen unbekannten Maßstabsfaktor dar, der durch ein einzelnes Bild nicht bestimmt werden kann. Um einen Objektpunkt aus Bildkoordinaten zu rekonstruieren sind also zusätzliche Informationen erforderlich.

Kehrt man Gleichung (3.11) zur Bestimmung der Abbildungs- aus den Objektkoordinaten um, so lässt sich m kürzen und man erhält unter Berücksichtigung der Parameter der inneren Orientierung aus (3.7) die bekannten Kollinearitätsgleichungen:

$$x' = x'_{0} + z' \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_{0}) + r_{21} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{31} \cdot (Z - Z_{0})}{r_{13} \cdot (X - X_{0}) + r_{23} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{0})} + \Delta x'$$

$$y' = y'_{0} + z' \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_{0}) + r_{22} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{32} \cdot (Z - Z_{0})}{r_{13} \cdot (X - X_{0}) + r_{23} \cdot (Y - Y_{0}) + r_{33} \cdot (Z - Z_{0})} + \Delta y'$$
(3.12)

Die Einträge der Rotationsmatrix \mathbf{R} ergeben sich durch Ausmultiplizieren der Einzeldrehmatrizen, meist ausgedrückt in trigonometrischen Funktionen:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\omega} \cdot \mathbf{R}_{\varphi} \cdot \mathbf{R}_{\kappa}$$
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi\\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi\\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix}$$
(3.13)

Ausgehend von diesen Gleichungen ist eine Bestimmung der inneren und äußeren Orientierung möglich, wenn ein Testfeld mit ausreichend vielen Punkten bekannter Koordinaten oder Geometriebeziehungen vorhanden ist. Alternativ dazu ist auch eine Simultankalibrierung möglich, bei der die Kameraparameter zusammen mit unbekannten Objektpunkten der Aufnahme ermittelt werden. Dafür ist neben einer Maßstabsinformation eine ausreichende Schnittgeometrie sowie eine ausreichend hohe Redundanz der Beobachtungen notwendig (vgl. [Luhmann 03]).

3.1.3.2 Das virtuelle Passpunktfeld

Bei der Verwendung eines Videotachymeters gibt dieses den Bezugsrahmen für die Lagerung des Kamerasystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem vor. Geht man von einem ideal horizontierten, fehlerfreien Gerät aus, so lassen sich die Rotationsparameter ω und φ der äußeren Orientierung unmittelbar funktional mit den Teilkreisablesungen Hz und V verknüpfen, während sich das Projektionszentrum bei konstanter Fokussierung auf einer Kugelschale um den Achsschnittpunkt des Tachymeters bewegt. Für einen Zielpunkt P sind dessen Koordinaten als polare Größen zu formulieren

$$P = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_P \cdot \sin(V_P) \cdot \sin(Hz_P) \\ S_P \cdot \sin(V_P) \cdot \cos(Hz_P) \\ S_P \cdot \cos(V_P) \end{bmatrix}$$
(3.14)

und Identisches gilt auch für das Projektionszentrum O

$$O = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_0 \cdot \sin(V_P) \cdot \sin(Hz_P) \\ S_0 \cdot \sin(V_P) \cdot \cos(Hz_P) \\ S_0 \cdot \cos(V_P) \end{bmatrix}$$
(3.15)

welches auf demselben Vektor liegt. Damit werden die drei Parameter der Translation durch einen unbekannten Abstand S_0 des Projektionszentrums vom Achsschnittpunkt des Tachymeters und die Teilkreisablesungen zum aktuellen Zielpunkt ersetzt. Eingesetzt in die Kollinearitätsgleichungen (3.12) erhält man so einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Passpunktrichtungen am Tachymeter, den beobachteten Bildkoordinaten und den Orientierungsparametern.

Da in der Realität keine Geräteanordnung fehlerfrei ist, sind zusätzliche Korrekturgrößen zu berücksichtigen, die das funktionale Modell weiter verfeinern und ggf. zusätzliche Unbekannte einführen (z. B. die primären Achsfehler). Auf sie wird bei den speziellen Kalibrierabläufen näher eingegangen.

[Walser 05] untersucht die Eignung eines zweidimensionalen Testfelds für die kombinierte Kalibrierung. Unterschiedliche Aufnahmekonfigurationen werden erreicht, indem das Testfeld frei bewegt werden kann, während die Tachymeterkamera stationär ist. Dieses Verfahren versagt, da durch das beschränkte Gesichtsfeld der Okularkamera nur kleine Translationen und Rotationen des Punktfelds möglich sind, die sich bei der Auswertung jedoch nicht mehr eindeutig trennen lassen (analog der mathematischen Tatsache, dass man eine kleine Rotation durch eine Translation ersetzen kann).

Ein weiterer Ansatz, der letztlich in den aktuellen Arbeiten von [Vogel 06], [Walser 05] und [Schlüter et al. 09] Verwendung findet, stammt von [Huang u. Harley 89] und basiert auf einem virtuellen Passpunktfeld: Ein einzelner Passpunkt kann, je nach Ausrichtung der Kamera, an verschiedenen Positionen der Bildebene abgebildet werden. Da die Positionierungsänderungen der Kamera über die Teilkreise des Tachymeters eindeutig bestimmt werden können, ist es möglich, ein beliebig dichtes Abbildungsraster zu generieren. Die notwendige Tiefe des virtuellen Passpunktfeldes kann erreicht werden, indem mehrere Einzelpunkte unterschiedlicher Entfernung zum Tachymeter gescannt werden.

Neben den Kameraparametern erscheinen in (3.14) außerdem die wahren Richtungen (Hz_P^i, V_P^i) zu den jeweiligen Passpunkten P^i als zusätzliche Paare von Unbekannten, wogegen in (3.15) die gemessenen Richtungen zu den virtuellen Zielpunkten stehen.

Als Passpunkte können beliebige Zielzeichen verwendet werden, solange es möglich ist, diese im Bild eindeutig zu identifizieren und den Bezugspunkt mit wiederholbarer Präzision zu ermitteln. Bevorzugterweise sind die Ziele so strukturiert, dass sie mittels automatisierter Bilderkennungsalgorithmen detektiert werden können. In Kombination mit der Motorisierung der Tachymeter kann ein virtuelles Passpunktfeld so ohne Eingriff eines Operateurs vollständig in zwei Lagen gemessen werden. Im Nahbereich können dabei z. B. kreisförmige Zielmarkierungen verwendet werden, deren Mittelpunkte durch Kantendetektion und Schätzung ausgleichender Kreise mit Subpixelgenauigkeit bestimmbar sind. Für größere Entfernungen ist dieses Verfahren wegen des Platzbedarfs und der dadurch zunehmenden Störeinflüsse nicht mehr praktikabel. Abhilfe schafft ein Kollimator mit Auszug. Dabei ist der Abstand der Strichplatte vom Objektiv variabel, sodass diese bei unterschiedlichen Fokusstellungen und damit scheinbar in unterschiedlichen Entfernungen scharf abgebildet wird. Je nach Brennweite des Kollimators sind so Passpunktentfernungen von wenigen Metern bis ∞ möglich.

Eine genauere Beschreibung von Funktionsweise, Genauigkeiten und Fehlereinflüssen findet sich bei [Vogel 06].

3.2 Kalibrierabläufe

Wie bereits erwähnt, liegt das Verfahren des virtuellen Passpunktfelds allen bisherigen Ansätzen der Kalibrierung von Videotachymetern zugrunde. Da es sich als zuverlässig und weitgehend automatisierbar erwiesen hat, gilt dies auch für diese Arbeit. Zudem wird der Vorschlag aufgegriffen, Zielpunkte in größerer Entfernung durch einen Kollimator mit Auszug zu realisieren.

In der Folge wird zunächst die Prüfung des verwendeten Kollimators beschrieben und anschließend näher auf die unterschiedlichen verwendeten Kalibrieransätze eingegangen. Den Abschluss des Abschnitts bildet die für den Prototyp TCRA1201+ ideale Kombination beider Ansätze.

Die Messungen selbst wurden für unterschiedliche Fokusstellungen, die den gesamten Messbereich abdecken, zu jeweils vier Passpunkten durchgeführt. Diese befanden sich am Anfang und am Ende des entsprechenden Schärfentiefe-Bereichs bei je zwei Beobachtungen im Horizont und unter steiler Visur. Das virtuelle Passpunktgitter umfasste jeweils 6×8 Ziele in beiden Lagen, wobei in zweiter Lage das um 200 gon rotierte Bild (entsprechend dem aufrechten Blick durch das Fernrohr) ausgewertet wurde.

3.2.1 Kollimatorprüfung

Der verwendete Kollimator mit Auszug ist ein Zeiss AKF 45×80 mit nominell 840 mm Brennweite. Da kein Prüfzertifikat für den Kollimator vorlag, wurde versucht, die Brennweite durch Messungen zu verifizieren. Zu diesem Zweck wurde die Strichteilungsplatte des Kollimators ausgebaut und mit einem Messmikroskop mit einer kleinsten Ableseeinheit von 0,01 mm abgemessen. Die Platte weist neben dem Fadenkreuz ein symmetrisch angeordnetes Schachbrettmuster auf, an dem jeweils die Übergänge zweier Felder links und rechts der Teilungskreuzmitte erfasst wurden. Der ermittelte Abstand beträgt y = 5,77 mm.

Ablesung links [gon]	Ablesung rechts [gon]	Zwischenwinkel σ [gon]	äquiv. Brennweite f_{Obj} [mm]
0,16586	0,60368	0,43782	838,98364
0,16641	0,60327	$0,\!43686$	840,82737
0,16578	0,60292	$0,\!43713$	840,30800
0,16176	0,59868	$0,\!43692$	840,71190
0,16151	$0,\!59855$	$0,\!43704$	840,48105
0,16132	0,59902	$0,\!43770$	839,21366
Mittelwert		0,437245	840,08698

Tab. 3.2: Bestimmung der Kollimatorbrennweite durch Messung

Im Anschluss wurde das AKF horizontiert auf einem Pfeiler montiert. Dazu wurde ein Sekundentheodolit Leica TC2002 mittels einer höhenverstellbaren Halterung so aufgebaut, dass bei einer Zenitdistanz von 100 gon dessen Horizontalfaden mit der horizontalen Zielkreuzmarkierung des Kollimators zusammenfällt. Ist die Auszugsrichtung des Kollimators ebenfalls horizontal, so ändert sich der Versatz der beiden Horizontalfäden für Ziele in beliebiger Entfernung nicht.

Die mit dem Mikroskop bestimmten Übergänge wurden mit dem Theodolit bei unterschiedlichen Fokusstellungen des Kollimators gemessen und ihr Zwischenwinkel bestimmt (Tab. 3.2). Die Standardabweichung des gemittelten Resultats beträgt 0,41 mgon und damit etwas mehr als eine Altsekunde. Die Umrechnung in die äquivalente Brennweite erfolgte nach [Deumlich u. Staiger 02] mit der Beziehung

$$f_{\rm Obj} = \frac{y}{\tan \sigma} \tag{3.16}$$

Die Abweichung von der Sollbrennweite beträgt nur 0,1‰, wobei jedoch bereits ein Fehler im Rahmen der Messgenauigkeit des Mikroskops von 0,01 mm einen Einfluss in der Größenordnung von 1 mm auf die Brennweite hat. Für die weiteren Messungen wird daher davon ausgegangen, dass die Herstellerangabe ausreichend genau ist.

3.2.2 Die Kalibrierung nach Vogel

3.2.2.1 Vorgehensweise nach Vogel

[Vogel 06] erweitert das Modell der Kollinearitätsgleichungen nach (3.12) um zusätzliche Modellparameter, die in erster Linie den Einbau der Kamera ins Tachymeter beschreiben. Er geht nicht davon aus, dass das Projektionszentrum O entlang der Tachymeter-Zielachse liegt, sondern führt in der Horizontal- bzw. Vertikalebene die Abweichungswinkel c_0 bzw. z_0 ein, die im Achsschnittpunkt von der Zielachse zu O zeigen. Diese wirken wie Zielachs- bzw. Höhenindexfehler, sind aber keine tachymeter-, sondern kameraspezifische Größen. Zusätzlich wirkt auf die Lage des Projektionszentrums der Kippachsfehler i des Tachymeters, der deshalb ebenfalls mitzuschätzen ist, sowie ein Zielachsfehler c_F .

Neben der Modifikation der Beschreibung des Projektionszentrums folgen im Modellansatz noch die äußeren Rotationen der Kamera durch die Bewegung des Tachymeterfernrohrs unter Berücksichtigung der allgemeinen Rotationsparameter aus Gleichung (3.13). Für die einzelnen Rechenschritte und deren Anpassung an das Videotachymeter dieser Arbeit sei auf Anhang A.1 verwiesen. Letztlich weisen die modifizierten Kollinearitätsgleichungen die in Tab.3.3 zusammengefassten Parameter auf.

Für die Kalibrierung einer Okularkamera an einem Tachymeter wurde auf die Bestimmung der Verzeichnung bisher verzichtet (vgl. [Huep 88]). Zum einen ist durch das sehr kleine Gesichtsfeld die Abbildungsgüte der Optik sehr hoch, sodass keine signifikanten Verzeichnungsparameter bestimmt werden konnten; zum anderen ist die rein radial-symmetrische Verzeichnung sehr stark mit der Kamerakonstanten korreliert. [Walser 05] gibt für die maximale Auswirkung der radialsymmetrischen Verzeichnung einen Wert von $\langle \pm 0,3 \,\mu$ m an, was in dem von ihm untersuchten Fall der IATS deutlich weniger als $\frac{1}{10}$ Pixel entspricht. Bei den Untersuchungen von [Vogel 06] konnten keine signifikanten Verzeichnungsparameter ermittelt werden. In einem ersten Schritt wurde deshalb eine Parameterschätzung unter Vernachlässigung der Verzeichnungsmodellierung durchgeführt. Trägt man die so entstandenen Rest-klaffungen bezüglich der gemittelten Richtungen im virtuellen Passpunktfeld auf, so erhält man eine Größenordnung von bis zu knapp 1 mgon. Das Aussehen des Vektorfelds ist dabei unter anderem abhängig von der Zielpunktentfernung und damit der Abbildungsschärfe, zeigt aber in den meisten Fällen auch das schematische Bild eines radialen Verzeichnungseffekts (Abb.3.5 links). Wegen der großen Sen-

	Innere Orientierung
x'_{0}, y'_{0}	Koordinaten des Bildhauptpunkts
c_K	Kamerakonstante
K_1	erster Verzeichnungskoeffizient
	Äußere Orientierung
c_F	Zielachsfehler des Tachymeters
i	Kippachsfehler des Tachymeters
<i>c</i> ₀	horizontale Ablagewerte des Projektionszentrums (photogrammetrischer Ziel- achsfehler)
z_0	vertikale Ablagewerte des Projektionszentrums (photogrammetrischer Höhen- indexfehler)
S_0	Distanz vom Achsenschnittpunkt des Tachymeters zum Projektionszentrum (Exzentrizität)
$\omega, arphi, \kappa$	äußere Kamerarotationswinkel
	Zielpunktdaten
Hz, V	unbekannte Zielpunktwerte
$Hz_{I/II}, V_{I/II}$	am Tachymeter abgelesene Richtungen in beiden Fernrohrlagen
S	Distanz zum Zielpunkt (muss als Maßstab bekannt sein)

Tab. 3.3: Die Parameter der Kalibrierung nach dem Ansatz von Vogel

sorfläche bei gleichzeitig sehr kleinen physikalischen Pixeldimensionen ist dieser bei dem vorliegenden System folglich zu berücksichtigen.

In einem erweiterten Ansatz wurde daher der erste Verzeichnungskoeffizient mitgeschätzt, sodass die Verzeichnungskurve bei einem radialen Abstand von 2,3 mm einen zusätzlichen Nulldurchgang erhält. Wegen der schlechten Abbildungsgeometrie der geringen Objektivöffnung führt dies numerisch zu schlecht konditionierten Normalgleichungen der Parameterschätzung, die aber lösbar sind. Da eine direkte Korrelation mit der Kamerakonstante besteht, ändern sich deren Werte im Vergleich zum ersten Ansatz in geringem Umfang (0,01%), sodass eine unmittelbare Auswirkung auf den Bildmaßstab besteht. Die übrigen Parameter ändern sich nicht signifikant. Das Restklaffungsbild ist in der Folge frei von augenfälligen Verzeichnungseffekten (Abb.3.5 rechts). Die nun sichtbare zeilenweise Systematik stammt noch vom Abtast-Algorithmus des virtuellen Passpunktfeldes und ist eher auf Effekte bei der Positionierung des Fernrohrs durch die Tachymeter-Schrittmotoren zurückzuführen.

Tatsächlich eliminiert werden die Rotationsparameter ω und φ . Sie stellen Abweichungen des Kamerachip-Einbaus von der Rechtwinkligkeit auf die Tachymeter-Zielachse dar und sind daher sehr stark mit dem Höhenindexfehler bzw. der Rotation um den Zenitwinkel sowie dem Zielachsfehler bzw. der Rotation um den Horizontalwinkel korreliert. Eventuell vorhandene Einbau-Ungenauigkeiten gehen daher zu Lasten dieser Parameter, da ein Mitschätzen von ω und φ zu Konvergenzproblemen bei der Ausgleichung führt. Eine Bestimmung der Kamerakantung κ ist jedoch signifikant möglich.

Anders als beim Prototyp von Vogel, fällt beim Leica TCRA 1201+ das Projektionszentrum annähernd mit dem Tachymeterzentrum zusammen. Der Abstand S_0 beträgt je nach Fokusposition <1 mm bis <1 cm und ist nicht signifikant. $S_0 \rightarrow 0$ resultiert zudem in einer schlecht konditionierten Normalgleichungsmatrix. In der Folge müssen daher auch die Parameter c_0 und z_0 aus dem Modell gestrichen werden, da diese über den kurzen Hebel von S_0 unzulässige Auswirkungen auf die Modellannahme, dass die Verbindung Projektionszentrum-Tachymeterzentrum zumindest annähernd in Zielachsrichtung liegt,



Abb. 3.5: Restklaffungen der Kalibrierung ohne (links) und mit Verzeichnungskorrektur (rechts) (Fokus 15000, 1. Lage)

ausüben können. Dies führt leicht zu nicht mehr aussagekräftigen Werten der Korrekturwinkel über den gesamten Vollkreis.

Die Bestimmung des Bildhauptpunkts ist eng mit den auftretenden Höhenindex- und Zielachsfehlern verknüpft. Prinzipiell kann jeder dieser Achsfehler durch ein Verschieben des Bildhauptpunkts eliminiert werden. Aus diesem Grund ist im vorliegenden Ansatz das Mitschätzen von c_F und z_0 zumindest problematisch. Vor allem beim Höhenindexfehler konvergiert die Ausgleichung nicht in jedem Fall, während sie beim Zielachsfehler nur zu einer deutlichen Bildhauptpunkt-Verschiebung mit einhergehender Verschlechterung der Genauigkeit führt. Verzichtet man auf das Mitschätzen dieser Achsfehler, so erhält man die Bildhauptpunktlage und damit die Mitte des virtuellen Fadenkreuzes an der Stelle, die einer von diesen Fehlern freien Anzielung entspricht.

Damit verbleiben als Unbekannte die Parameter der inneren Orientierung x_0 , y_0 , K_1 und c_K , zusätzlich der Kippachsfehler *i* und die Verkantung der Kamera κ auf Instrumentenseite sowie jeweils eine Horizontal- und eine Vertikalrichtung für jeden Passpunkt.

Der Ansatz nach Vogel wird im vorliegenden Fall in erster Linie dazu verwendet, die Kamerakonstante c_K und die Verzeichnungskorrektur K_1 für beliebige Fokuseinstellungen zu ermitteln. Die übrigen Unbekannten dienen, soweit sie auch mit dem Verfahren nach Walser bestimmbar sind, der gegenseitigen Kontrolle.

3.2.2.2 Ergebnisse nach Vogel

Die mit dem Ansatz nach Vogel abgeleiteten Größen weisen, weitgehend unabhängig von der Fokusstellung, die in Tab. 3.4 angegebenen Genauigkeiten auf. Diese fallen der hohen Redundanz und der Genauigkeiten von Bilderkennungsalgorithmus und Teilkreisabgriffen zufolge sehr gut aus. Die Standardabweichung der Kamerakantung entspricht in den Ecken des Bildchips lediglich einem Fehler von 0,05 Pixeln.

Die Lage des Bildhauptpunkts ist ohne Berücksichtigung von eventuellen Ziel- oder Höhenindexfehlern bestimmt worden. Sie variiert um 9 Pixel in x'-Richtung und um 7 Pixel in y'-Richtung (Abb.3.6) und macht den Gang der Fokussierlinse sichtbar. Beide Wertereihen können ausreichend genau linear approximiert werden.

Bildhauptpunkt	x_0	0,04	Pixel
	y_0	0,03	Pixel
Kamerakonstante	c_K	0,007	mm
Verzeichnungsparameter	K_1	0,010	mm
Kippachsfehler	i	0,1	mgon
Kamerakantung	κ	2,0	mgon
Passpunktrichtungen	Hz, V	$0,\!04$	mgon

Tab. 3.4: Standardabweichungen der verwendeten Parameter nach dem Ansatz von Vogel



Abb. 3.6: Bildhauptpunkt in Abhängigkeit von der Fokussierung



Abb. 3.7: Kamerakonstante in Abhängigkeit von der Fokussierung



Abb. 3.8: Verzeichnungskorrektur in Abhängigkeit von der Fokussierung

Mit Bezug auf die Mitte des Kamerachips und in Fernrohrrichtung betrachtet lässt sich daraus für den Zielachsfehler ein negativer Wert ableiten, der beim Umfokussieren von ∞ auf den Nahbereich um etwa ein Drittel abnimmt; umgekehrt lässt sich für den Höhenindexfehler ein positiver Wert ableiten, der beim Umfokussieren annähernd auf Null zurückgeht. Mit den Resultaten von Walser kann dies verifiziert werden.

Die Kamerakonstante besitzt aufgetragen gegen die Fokusposition in erster Näherung Parabelform (Abb.3.7). Die Abweichungen betragen dabei maximal 0,05 mm. Dies ermöglicht eine Ausdünnung der Stützstellen für künftige Bestimmungen; im gegenwärtigen Fall ist ausreichend genau jedoch auch eine lineare Interpolation zwischen den dichter vorhandenen Stützstellen möglich.

Der Parameter der Verzeichnungskorrektur weist im Rahmen seiner Standardabweichung ebenfalls einen linearen Verlauf auf (Abb.3.8), der die Abhängigkeit von der Fokussierung widerspiegelt. Für übliche Anwendungsentfernungen >10 m kann die Verzeichnung ausreichend genau als konstant angenommen werden.

3.2.3 Die Kalibrierung nach Walser

3.2.3.1 Vorgehensweise nach Walser

[Walser 05] verwendet zur Beschreibung der inneren Orientierung und damit der Abbildungseigenschaften des Kamerasystems auf der Bildebene einen alternativen Ansatz. Er beschreibt die Fertigungs- und Einbauungenauigkeiten des Kamerachips mittels einer affinen Modellmatrix mit unabhängigen Maßstäben s_x und s_y auf den Achsen, einem Scherungswert s und einer Rotation α um die Chipnormale, die der Kamerakantung entspricht. Als weitere Kalibrierparameter führt er nur noch die möglichen primären Achsfehler ein. Dabei geht er davon aus, dass das Projektionszentrum des Kamerasystems ausreichend nahe am Achsschnittpunkt des Tachymeters liegt und die Kamerakonstante bekannt ist. Der in dieser Arbeit verwendete Formelsatz ist in Anhang A.2 aufgeführt. Das Verfahren von Walser verwendet demnach die in Tab.3.5 aufgeführten Parameter.

Auf die Einführung bekannter Distanzen zu den Zielpunkten kann verzichtet werden, da der Maßstab durch die Kamerakonstante in das Gleichungssystem eingeführt wird. Umgekehrt kann diese jedoch bei gegebenen Distanzen nicht mitgeschätzt werden, da sie funktional nicht von den Maßstabsparametern der Chipachsen getrennt werden kann.

	Innere Orientierung
x'_{0}, y'_{0}	gegebene Koordinaten des Bildhauptpunkts als Bezugspunkt
c_K	bekannte Kamerakonstante
	Affine Transformationsgrößen
s_x, s_y	Maßstäbe entlang der Achsen am Kamerachip
S	Scherung zwischen den Chipachsen
α	Kameraverkantung
	Tachymeterfehler
e_1	Höhenindexfehler
e_2	Zielachsfehler
e_3	Kippachsfehler
	Zielpunktdaten
Hz, V	unbekannte Zielpunktwerte
$Hz_{I/II}, V_{I/II}$	am Tachymeter abgelesene Richtungen in beiden Fernrohrlagen

Tab. 3.5: Die Parameter der Kalibrierung nach dem Ansatz von Walser

Die Kalibrierung nach Walser ist keine photogrammetrische Kalibrierung im engeren Sinne, da sie nicht zum Ziel hat, die innere Orientierung des Kamerasystems wiederherzustellen. Vielmehr ermittelt sie Korrekturparameter für die gemessenen (d. h. an den Teilkreisen abgelesenen) rohen Richtungswerte dergestalt, dass diese unmittelbar auf ein beliebiges Bildhauptpunkt-Pixel als Referenz bezogen werden können. Dies erlaubt es, eine bestimmte Position auf der Bildebene als Bezugspunkt zu wählen und so ein konstantes virtuelles Strichkreuz zu etablieren. Da der Bildhauptpunkt mit der Änderung der Fokussierlinsenstellung variabel ist, gilt dies in der Folge auch für die bei konstantem Strichkreuz bestimmten Korrekturparameter.

3.2.3.2 Vergleich mit dem Ansatz nach Vogel

Ein erster Auswertungs-Durchgang wurde nach dem Verfahren von Walser durchgeführt, indem die vorher mit der Methode nach Vogel bestimmten Werte für die Kamerakonstante und die jeweiligen Bildhauptpunkt-Pixel eingeführt wurden. Dadurch können beide Verfahren über gemeinsam bestimmte Parameter verifiziert werden.

Da sich die jeweiligen Bildhauptpunkte bei Vogel auf ein höhenindexfehler- und zielachsfehlerfreies Modell beziehen, müssen diese im Ansatz von Walser als nicht signifikant nachgewiesen werden können. Die Ausgleichung ergibt in der Tat für beide Fehlergrößen Werte von <0,01 mgon. Der in beiden Ansätzen mitgeschätzte Kippachsfehler weist ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf (Differenzen <0,03 mgon, vgl. Abb.3.9). Im Bereich geringer Entfernungen ab einer Fokusstellung von ca. 6000 (<5 m) nimmt die Streuung deutlich zu, was eine Folge der ungenauer zu bestimmenden Richtungswerte im Nahbereich ist. Der Sprung im Mittelwert etwa bei 9000 ist auf den Wechsel des Zielzeichens und des Auswertealgorithmus zurückzuführen. Vor Messungen im unmittelbaren Nahbereich sollten daher aktuelle Korrekturgrößen für die Achsfehler vor Ort bestimmt werden. Alternativ kann auch der Zielachsfehler nach Vogel mitgeschätzt werden; hier zeigt sich ein identisches Ergebnisbild.

Kleine Abweichungen ergeben sich in der Bestimmung der Kamerakantung κ , da die Ansätze hier unterschiedlich sind (vgl. Abb.3.10). Sie betragen im Mittel gut 1 mgon und maximal bis zu 7 mgon,



Abb. 3.9: Kippachsfehler in Abhängigkeit von der Fokussierung



Abb. 3.10: Kamerakantung in Abhängigkeit von der Fokussierung

was einer Maximalabweichung am Bildrand von 0,18 Pixeln entspricht. Im Rahmen der Subpixel-Messgenauigkeit der Kantenoperatoren ist dieses Ergebnis als zulässige Übereinstimmung zu klassifizieren, zumal die Kamerakantung im Ansatz von Walser noch durch die affinen Abbildungsparameter beeinflusst wird.

Abschließendes Vergleichsmerkmal sind die ausgeglichenen Richtungen zu den jeweils verwendeten Zielpunkten. Diese sind ebenfalls nicht signifikant; maximale Abweichungen liegen im Bereich unter 2 m Fokussierdistanz bei <0.3 mgon und sonst bei <0.01 mgon.

Beide – konzeptionell unterschiedlichen – Ansätze weisen damit ihre Eignung nach, durch die Bestimmung der jeweiligen modellierten Parameter zuverlässige und gegenseitig verifizierbare Ergebnisse zu liefern. Daraus folgt insbesondere auch die Zulässigkeit eines kombinierten Verfahrens nach beiden Modellen.

3.2.3.3 Ergebnisse nach Walser

Im zweiten Auswertungs-Durchgang wurde aus dem Modell von Vogel nur die zuvor bestimmte Kamerakonstante beibehalten. Als konstante Strichkreuzpositionen bieten sich drei Pixelpositionen auf dem Kamerachip bevorzugt an:

- der Mittelwert der nach Vogel bestimmten Bildhauptpunkte mit dem Vorteil, dass die auf dieses Fadenkreuz bezogenen Achsfehler über den gesamten Fokussierbereich im Mittel minimal sind. Kann man den Messbereich zusätzlich einschränken, so kann auch nur der entsprechend benötigte Bildhauptpunktbereich gemittelt werden.
- *die geometrische Mitte des Kamerachips* mit dem Vorteil, dass das virtuelle Fadenkreuz nicht exzentrisch festgelegt werden muss. Bildbearbeitungsschritte (z. B. Rotationen, Zoom etc.) sind einfacher und weniger rechenintensiv durchführbar.
- der Durchstoßpunkt der zur EDM-Achse kollinearen Zielachse mit ggf. zeitvariabler Anpassung. Diese Wahl vermeidet nachträgliche, umfangreiche Neukalibrierungen. Das Strichkreuz verbleibt dabei annähernd in der Bildmitte, Bildbearbeitungs- und Rechenschritte werden jedoch komplexer.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde vorerst die zweite Variante gewählt, da das für den Operateur gewohnte Bild eines zentrischen Fadenkreuzes beibehalten werden sollte. Die Bezugsposition wurde folglich bei (1279,5/959,5) festgelegt. Durch die im Laufe der Zeit festgestellte Abweichungen der EDM-Achse von der Justierung auf das fiktive Fadenkreuz war später ein Wechsel zur dritten Variante notwendig, wobei die Abweichungen im Bereich bis zu 15 Pixel in Zeilen- und Spaltenrichtung liegen.

Es ergeben sich, wiederum weitgehend unabhängig von der Fokusstellung, die in Tabelle 3.6 folgenden Genauigkeiten für die Kalibrierparameter. Sie liegen in derselben Größenordnung wie die Ergebnisse nach Vogel.

Die Maßstäbe der affinen Abbildungsmatrix für den Kamerachip sind über den gesamten Fokuslinsenweg weitgehend konstant (Abb.3.11). Für die x-Richtung liegt das Mittel bei 1 ppm mit einer maximalen Abweichung von 48 ppm, für die y-Richtung bei -5 ppm mit einer maximalen Abweichung von 129 ppm. Hinsichtlich der jeweiligen Standardabweichungen (Tab.3.6) können die Maßstäbe nur bei einzelnen Fokuseinstellungen als signifikant nachgewiesen werden, wobei der Maßstab in y-Richtung eine höhere Streuung aufweist. Der maximale Einfluss zum Bildrand hin beträgt folglich bis zu 0,2 Pixel.

Eine ebenfalls vergleichsweise hohe Streuung weist der Scherungsparameter s auf. Zwar ist er im Mittel mit $-35 \cdot 10^{-6}$ sehr nahe an Null, weist aber Variationen von bis zu $\pm 150 \cdot 10^{-6}$ auf (Abb.3.12). Bedingt

Achsmaßstäbe	s_x	30	ppm
	s_y	42	ppm
Achsscherung	s	$51, 4 \cdot 10^{-6}$	
Kamerakantung	α	$1,\!9$	mgon
Höhenindexfehler	e_1	< 0, 1	mgon
Zielachsfehler	e_2	< 0, 1	mgon
Kippachsfehler	e_3	0,1	mgon
Passpunktrichtungen	Hz, V	$0,\!03$	mgon

Tab. 3.6: Standardabweichungen der Parameter nach dem Ansatz von Walser



Abb. 3.11: Affine Achsmaßstäbe in Abhängigkeit von der Fokussierung

durch den formalen Ansatz wirkt sich die Scherung nur auf den x-Wert der Abbildung aus; der maximale Einfluss beträgt für die kalibrierten Werte 0,20 Pixel und sollte daher berücksichtigt werden. Die Kamerakantung als letzter der vier affinen Parameter wurde bereits bei Abb.3.10 diskutiert. Sie ändert sich bei einer Variation des Bildhauptpunkts um wenige Pixel nur minimal.

Zentrales Element der Kalibrierung nach Walser stellen die Achsfehler dar. Höhenindex- und Zielachsfehler ändern sich in Abhängigkeit von der Fokusstellung wie in Abb.3.13 dargestellt, und weisen damit exakt den Verlauf auf, der sich aus der Deutung des achsfehlerfrei bestimmten Bildhauptpunktverlaufs ergibt. Die Ähnlichkeit zu Abb.3.6 tritt deutlich zu Tage. Mittels der jeweiligen Regressionskurve ist eine unmittelbare Umrechnung der Bildhauptpunktänderung in die entsprechende Achsfehleränderung möglich. So lassen sich aus wenigen Stützstellen die Achsfehler für den gesamten Fokusbereich bestimmen. Durch den weitgehend linearen Verlauf der Fehlerkurven ist auch für eine beliebige Fokuseinstellung eine Höhenindex- und Zielachsbestimmung nach den herkömmlichen Justierverfahren in zwei Lagen möglich, deren Ergebnisse dann als Offset für die gesamte Kalibrierkurve berücksichtigt werden können.

Von den übrigen Parametern unabhängig ist der Kippachsfehler (vgl. Abb.3.9), der jedoch nur für hinlänglich große Entfernungen >5 m ausreichend konstant ist.



Abb. 3.12: Affine Scherung in Abhängigkeit von der Fokussierung



Abb. 3.13: Achsfehler in Abhängigkeit von der Fokussierung



Abb. 3.14: HDS-Tafel mit 37 mm Durchmesser als Testziel in knapp 15 m Entfernung (links) und das Restklaffungsbild der Messung (rechts)

3.2.4 Verifikation der Kalibrierung

Die Restklaffungen der Kalibriermessungen selbst sind gering und frei von systematischen Anteilen, die sich nicht aus der Schrittmotorbewegung des Tachymeters erklären lassen (vgl. Abb.3.5 rechts). Bei ausreichend repräsentativen Fokusschrittweiten und entsprechender Genauigkeit der Parameter muss dies auch für beliebige Messungen über den Entfernungsbereich zutreffen.

Zur Überprüfung der ermittelten Kalibrierparameter wurden Zielzeichen in unterschiedlichen Entfernungen jeweils über den gesamten Abbildungsbereich des Kamerachips erfasst. Die Bestimmung des jeweiligen Zielpunkts erfolgte durch automatische Detektionsalgorithmen. Die Aufzeichnung erfolgte in einem gleichmäßigen Gitter, wobei an jedem Gitterpunkt fünf Bilder ausgewertet und gemittelt wurden. Eventuell auftretende Ausreißer wurden so eliminiert. Die berechneten Zielpunktpositionen im Bild wurden unmittelbar ins Tachymetersystem transformiert. Bei korrekten Kalibrierparametern kann – unabhängig vom Messort im Bild – eine systematikfreie Anordnung der Restklaffungen erwartet werden, die lediglich im Bereich weniger $\frac{mgon}{10}$ liegen.

Für eine Entfernung von knapp 15 m, was in geschlossenen Räumen einem guten Anhaltswert für durchschnittliche Distanzen entspricht, ergeben sich Restklaffungen von 0,18 mgon im Mittel mit einem Maximalwert von 0,38 mgon (vgl. Abb.3.14). Die geringe erkennbare Rest-Systematik ist wie schon bei der Kalibrierung mit dem zeilenförmigen Abtasten korreliert und daher nicht auf die Parameter selbst zurückzuführen. Weitere Auswertungen wurden für den sehr kurzen Nahbereich und für größere Distanzen, bei denen sich das Fokussierglied nur mehr minimal verschiebt, durchgeführt. Für eine Entfernung von ca. 2 m ergibt sich ein Mittel der Restklaffungen von 0,20 mgon mit einem Maximalwert von 0,39 mgon (Abb.3.15 links). Die Resultate und das verbleibende Restklaffungsbild mit der geringen Systematik des Abtastvorgangs sind vergleichbar mit denen der Messung auf eine Entfernung von 15 m, obwohl sich die Fokusstellungen deutlich unterscheiden und auch die Kalibrierroutine unterschiedlich war (Zielmarke und Kollimator). Auf größere Entfernungen werden die verwendeten Zielmarkierungen verhältnismäßig klein abgebildet. Der gewählte Detektionsalgorithmus auf Basis extrahierter Kanten kommt hier teilweise bereits an die Grenze seines Einsatzbereichs, sodass drei Gitterpunkte überhaupt nicht und zwei andere nur mit einem Messwert erfasst werden konnten (Abb.3.15 rechts). Letztere stellen im Restklaffungsbild auch mit 1 mgon die größten Abweichungen; ansonsten liegt das Mittel



Abb. 3.15: HDS-Tafel mit 10 mm Durchmesser als Testziel in 2,27 m Entfernung (links) und mit 146 mm Durchmesser in 85 m Entfernung (rechts)

bei 0,30 mgon mit einem Maximalwert von 0,64 mgon. Eine darüber hinausgehende Rest-Systematik ist nicht signifikant.

Die Verifikationsmessungen zeigen, dass die ermittelten Kalibrierparameter geeignet sind, Genauigkeiten im erwarteten Bereich von einigen $\frac{\text{mgon}}{10}$ zu liefern. Sie sind abgeleitet von tatsächlichen (äußeren) Richtungsgenauigkeiten der Tachymeterteilkreise und können daher deren Potential nicht überbieten; fallen jedoch auch nicht dahinter zurück.

3.2.5 Abschlussbetrachtung zur Kalibrierung

Die beiden in [Vogel 06] und [Walser 05] vorgestellten Kalibriermethoden haben beim Prototyp des TCRA1201+ ihre jeweilige Eignung für eine Kalibrierung der Okularkamera eines Videotachymeters unter Beweis gestellt. Bei unterschiedlicher Herangehensweise und damit unabhängiger Modellierung ergeben sich bei den gemeinsam geschätzten Parametern sowie – von besonderer Wichtigkeit – bei den ausgeglichenen Passpunktrichtungen hochsignifikante Übereinstimmungen in den Resultaten.

Dass letztlich der Ansatz von Walser für die weitere Arbeit genutzt wird, liegt daran, dass bei ihm die Möglichkeit besteht, das Bezugspixel für das virtuelle Fadenkreuz frei zu wählen. Zudem ermöglicht die Tatsache, dass die Arbeit Walsers mit einem Prototypen basierend auf dem Vorgängermodell derselben Herstellerfirma durchgeführt wurde, dass etliche Erkenntnisse und Resultate von ihm übernommen werden können, ohne die jeweiligen Messungen und Herleitungen im Rahmen dieser Arbeit explizit wiederholen zu müssen.

Damit kommt dem photogrammetrischen Ansatz nach Vogel allein die Aufgabe zu, die Kamerakonstante und Verzeichnung für die jeweilige Fokusstellung zu schätzen, die Walser in seiner Arbeit aus den bekannten optischen Kenngrößen ermittelt. Durch das geänderte Optikdesign und die EDM-Kalibrierung durch Bewegen der Objektivlinse ist das jedoch nicht mehr ohne Weiteres möglich, sodass sich der zweistufige Ansatz bewährt hat.

Die durchgeführte Kalibrierung zu jeweils vier virtuellen Festpunktfeldern pro Fokusposition war umfangreich, und erforderte trotz des hohen Automatisierungsgrads einen erheblichen Zeitaufwand von mehreren Arbeitstagen. Je nach Visualisierung der Zielmarkierungen ist zudem teilweise die Anpassung von Auswerteroutinen notwendig. Eine spätere Kalibrierung wird daher stets in reproduzierbarer Umgebung im Herstellerlabor durchgeführt werden müssen.

Dabei weisen die Untersuchungen von [Walser 05] darauf hin, dass schon ein Zielpunktgitter von 3×3 Anzielungen für eine zuverlässige Schätzung der Parameter ausreichend ist. Durch die bekannten Verlaufskurven von Kamerakonstante und Achsfehlern sowie den weitgehend konstanten Werten für die affine Abbildungskorrektur ist zudem eine Reduzierung der nötigen Stützstellen bei der Kalibrierung möglich. In diesem Fall ist jedoch zu berücksichtigen, dass gerade bei Messungen im Nahbereich, die den Hauptanteil am möglichen Verschiebeweg der Linse ausmachen, Abweichungen riskiert werden, die im Bereich von ca. 1 Pixel liegen.

Eine "Feldkalibrierung" durch Messung in zwei Lagen und Bestimmung der Achsfehler ist weiterhin möglich; dabei können die ermittelten Größen als additive Korrekturgrößen auf die kalibrierten Resultate verstanden werden. Theoretisch ist auch eine vollständige Kalibrierung an ausgesuchten Stützstellen im Feld möglich. Diese erscheint jedoch vor allem wegen des hohen Zeitaufwands als wenig praktikabel.

4 Bildverarbeitung zur Zielpunktdetektion

Die Bildbe- und -verarbeitung stellen entscheidende Werkzeuge für die Nutzung von Videotachymetern der neueren Generation. Zum einen sind sie elementar für die Automatisierung von Arbeitsschritten im Sinne eines autonomen Messablaufs; zum anderen sind sie jedoch auch bei überwachten Vorgängen mit direkten Eingriffen eines Operateurs unverzichtbar. Bedingt durch die Tatsache, dass eine unmittelbare optische Anzielung am Instrument entfallen muss und diese auf eine Zielpunktauswahl am Bildschirm reduziert wird, werden Bildbearbeitungs- und -analysealgorithmen unterstützend und genauigkeitsfördernd eingesetzt, z. B. bei der optischen Aufbereitung des Bilds oder bei der Vorauswahl der Zielpunktposition.

Die Begriffe sind dabei klar zu unterscheiden: Die *Bildbearbeitung* befasst sich mit der Manipulation von Bildern, z. B. durch die Elimination von Störungen, Kontrastverstärkung, Glättung u. ä. und verändert so radiometrische und geometrische Inhalte und Verhältnisse eines Bildes. Darauf aufbauend können mit Methoden der *Bildanalyse* Eigenschaften der Abbildung und ihrer Inhalte abgeleitet werden, die die Eignung eines Bildes für weiterführende Bearbeitungsschritte klassifizieren. Demgegenüber ist es Ziel der *Bildverarbeitung*, höherwertige Informationen aus der Abbildung zu extrahieren; es ist dies also eine Aufgabe des *Bildverstehens*, für die unter anderem die Bildbearbeitung und -analyse als Vorverarbeitungsschritte genutzt werden.

Die Werkzeuge der Digitalen Bildverarbeitung und Bildanalyse entwickelten sich eigentlich auf dem Gebiet der Elektrotechnik als Anwendung der Signalverarbeitung, stellen jedoch seit längerem im Bereich des *Computer Vision* eine eigene Fachdisziplin. Im Umfeld der Geodäsie werden sie hauptsächlich in der digitalen Photogrammetrie und vor allem in der Fernerkundung eingesetzt. In der Ingenieurgeodäsie ist der Einsatz von bildverarbeitenden Techniken noch gering; als Standardwerkzeug beschränkt er sich auf Anwendungen für automatische Zielerkennung und in Digitalnivellieren. Daneben gibt es noch wenige Sonderanwendungen, z. B. in der Untersuchung von Szintillationseffekten [Binnenbruck et al. 00] oder bei der Nivellierlattenkalibrierung [Wasmeier u. Foppe 06]. Einen Teilüberblick darüber gibt auch [Binnenbruck 02].

Das folgende Kapitel ist gedacht, dem Ingenieurgeodäten einen Einstieg in die wenig vertraute Thematik zu erschließen. Es führt die wichtigsten Bildbe- und -verarbeitungsschritte auf, soweit sie für den Einsatz mit bildgebenden Tachymetern geeignet sind und in der Arbeit verwendet werden. Es erhebt nicht den Anspruch, tiefer gehende Detailinformationen zu liefern – zu diesem Zweck sei auf entsprechende Literatur verwiesen –, soll aber die Komplexität der Aufgabenstellung verdeutlichen, automatisierte Messungen auf natürliche, unsignalisierte Ziele durchzuführen. Für die meisten der aufgeführten Operatoren existieren Implementierungen im Programmpaket HALCON.

4.1 Vorverarbeitung

Unterschiedliche Aufnahmebedingungen bei Abbildung ein- und desselben Objekts auch unter identischer äußerer Orientierung führen zu unterschiedlichen radiometrischen und ggf. auch geometrischen Bildinhalten. Zusätzlich kann es durch den Umwandlungsprozess der Lichtintensität in Helligkeitsunterschiede in den jeweiligen Pixeln zu Veränderungen der Abbildung kommen. Als Folge daraus kann Information verloren gehen (z. B. durch Überstrahlung) oder verfälscht werden. Durch die Regelung



Abb. 4.1: Blaues Hotpixel mit leichtem Blooming

von Aufnahmeparametern wie der Belichtungszeit und durch anschließende Bildbearbeitungsschritte wird versucht, diese Einflüsse zu minimieren.

Das wesentliche Ziel besteht dabei darin, für die Auswertung und Zielpunktbestimmung relevante Parameter in ein möglichst enges Werteintervall zu transformieren, sodass nachgeschaltete Bildanalyseschritte mit hoher Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit ausgeführt werden können.

4.1.1 Hotpixel-Korrektur

Die einzelnen Sensorelemente digitaler Kamerachips bilden die einfallende Strahlung proportional als Helligkeitswerte auf dem Bild ab. Trifft für einzelne Pixel diese Forderung nicht zu, erscheinen sie unverhältnismäßig, deutlich außerhalb von Rauscheffekten, heller oder dunkler. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Hotpixeln*. Es handelt sich dabei um tatsächliche Fehler des Sensors. Im Gegensatz zu physikalisch defekten Pixeln (Dead- bzw. Stuckpixeln, die immer schwarz bzw. immer hell sind) ist ihr Auftreten jedoch nicht positionell und zeitlich konstant. Hotpixel treten vor allem bei längeren Belichtungszeiten und erhöhter Kameratemperatur auf, können jedoch unter veränderten Bedingungen wieder verschwinden. IDS gibt für die uEye UI-148xLE-C einen typischen Wert von ca. 100 Hotpixeln an; der maximale Wert soll 768 nicht überschreiten [IDS 09].

Hotpixel stellen radiometrische Fehler in der Bildinformation dar. Insbesondere erschweren sie die Anwendung histogrammbasierter Operatoren, da sie Extremaleinträge in der Helligkeitsverteilung vortäuschen. Bei Farbbildern erscheinen Hotpixel in der zugehörigen Filterfarbe, wobei bedingt durch die Anordnung der Farben im Bayer-Gitter und die erfolgte Interpolation grüne Hotpixel kleiner erscheinen als rote bzw. blaue. Bei langen Belichtungszeiten können zusätzlich noch Blooming-Effekte auf benachbarte Pixel übergreifen (vgl. Abb.4.1).

Hotpixel-Korrekturen sind auf unterschiedliche Weise möglich. Das beste Verfahren wäre, zusätzlich zur eigentlichen Aufnahme eine weitere mit identischen Kameraeinstellungen bei nicht geöffnetem Verschluss durchzuführen (Darkframe). In diesem lassen sich die Fehlpixel problemlos lokalisieren und so aus dem Ausgangsbild eliminieren. Für die Messpraxis mit der IATS ist dieses Verfahren jedoch aus baulichen Gründen nicht praktikabel.

Einfacher ist es, die Bildinformation nach lokalen Kontrastschwankungen zu untersuchen. Dieses Verfahren, welches einer Segmentierung einer hochpassgefilterten Darstellung der Aufnahme gleichkommt, kann bereits hardwareseitig implementiert werden, sodass die Rechenzeit für die Verarbeitung reduziert wird. Je nach Größe des Hochpassfilters lassen sich dabei nicht nur Hotpixel, sondern auch weitere überstrahlte Bereiche finden und nötigenfalls entfernen. Ein einfaches Verfahren zur Elimination, bei dem es jedoch zu einer Glättung kommt, ist daneben durch den Medianfilter gegeben.



Abb. 4.2: Histogrammlinearisierung: Im Ausgangsbild wird nur ein beschränkter Grauwertbereich genutzt, das HDS-Zielzeichen ist kontrastarm. Im linearisierten Bild treten Detailstrukturen (Objekt im Hintergrund, Rillen der Trägerplatte) deutlicher hervor, allerdings nimmt auch das Rauschen zu und es kommt zu "Glanzeffekten" durch Grauwertstauchungen. Das HDS-Zielzeichen hebt sich kontrastreicher ab.

4.1.2 Histogrammanpassung

Ein Histogramm beschreibt die Grauwertverteilung eines Bilds, bzw. bei Farbbildern die Helligkeitsverteilung innerhalb der einzelnen Farbkanäle. Für ein kontraststarkes Bild deckt es das gesamte zur Verfügung stehende Intervall ab und nutzt so die Dynamik der Abbildung voll aus. Ist das nicht der Fall, kann dies durch eine einfache Histogrammtransformation mittels *Linearer Skalierung* erreicht werden. Die Anzahl der unterschiedlichen Grauwerte ändert sich bei dieser Spreizung nicht und das Histogramm erhält "Lücken" (d. h. unbesetzte Grauwerte). Ist das Bild lediglich zu dunkel, kann neben einer Erhöhung der Belichtungszeit auch eine hardwarebasierte Verstärkung (Gain) zugeschaltet werden. Dadurch wird jedoch auch das Bildrauschen erhöht.

Zur Extraktion von Merkmalen ist es zudem wünschenswert, die Werteverteilung möglichst gleichmäßig zu halten, d. h. das kumulative Histogramm zu linearisieren. Auf diese Weise wird die darstellbare Information im Bild maximiert. Dazu werden Maxima der kumulativen Verteilungsfunktion gespreizt, sodass Bereiche mit vielen ähnlichen Grauwerten in einem erweiterten Intervall abgebildet werden und darin enthaltene Strukturen deutlicher zum Vorschein kommen. Dadurch wird jedoch auch das Rauschen in diesen homogenen Bereichen erhöht. Verteilungsminima werden hingegen gestaucht, sodass seltene Grauwerte zusammengefasst werden, wodurch ein Informationsverlust an diesen Stellen auftreten kann. Signifikante Helligkeitsunterschiede, wie sie bei künstlichen Zielmarken häufig vorkommen, können auf diese Weise ebenfalls verstärkt werden (Abb.4.2). Auf den menschlichen Betrachter wirken linearisierte Bilder unnatürlich, da natürliche Bilder wenige ganz helle und ganz dunkle Bereiche aufweisen, sondern eher einer gaußverteilten Grauwertverteilung entsprechen [Franz 07]. In diesem Fall ist eine Anpassung an eine entsprechend geformte Referenzverteilung vorteilhaft.



Abb. 4.3: Ansprechverhalten der IATS-Kamera im Innenraum bei Graustufenbildern (links) und bei Farbbildern (rechts, nach Kanälen getrennt)

Für den Vergleich zweier Aufnahmen unterschiedlicher Zeitpunkte bzw. die Extraktion von Objekten aus diesen Bildern ist eine radiometrische Ähnlichkeit der Abbildung vorteilhaft, sodass in allen betrachteten Bildern die Objektmerkmale ebenfalls ähnlich sind. Dies kann durch eine Anpassung des Histogramms an ein Referenzbild derselben Objektszene realisiert werden. Das Referenzbild kann dabei im Hinblick auf folgende Verarbeitungsschritte vorbearbeitet worden sein, sodass z. B. bestimmte Grauwertbereiche zur Kontrasterhöhung stärker gespreizt werden als andere.

Eine weitere, häufig genutzte Möglichkeit der visuellen Aufbesserung durch Grauwertanpassung stellt die *Gammakorrektur* dar. Sowohl bei der Aufnahme wie auch bei der Darstellung, z. B. auf Monitoren, werden Helligkeitsintensitäten I nicht linear in die resultierende Grauwertverteilung g umgesetzt (oder umgekehrt), sondern folgen genähert einer Exponentialfunktion

$$g = I^{\gamma} \tag{4.1}$$

Dies ist am ehesten geeignet, den logarithmischen Charakter des menschlichen visuellen Systems nachzuempfinden, wobei in diesem Fall ein Wert von $\gamma = 0, 4$ üblich ist [Jähne 02]. Damit ist zur Wiederherstellung des natürlichen relativen Helligkeitsverhältnisses eine Transformation mit dem inversen Gammawert nötig:

$$i = f_{1/\gamma}(g) = g^{1/\gamma} = I$$
 (4.2)

Kameras wie diejenige der IATS besitzen die Möglichkeit, einen Korrekturwert für die Gammafunktion einzustellen; allerdings führt dieser lediglich zu einer optischen Aufbesserung für den Betrachter und verfälscht die Grauwerte zusätzlich. Für industrielle Messaufgaben sollte die Gammakorrektur daher immer deaktiviert sein [Eckstein 08] und die Nichtlinearität durch eine radiometrische Kalibrierung der Kamera behoben werden, da sie andernfalls eine Fehlerquelle bei der Verwendung subpixelgenauer Kantenalgorithmen darstellt.

Abb.4.3 zeigt dazu das Ansprechverhalten der uEye-IATS-Kamera bei Aufnahmen im Innenraum. Bei Graustufenbildern zeigt sich nicht der gewünschte lineare Verlauf. Die radiometrische Kalibrierfunktion führt in diesem Fall zu einem leichten Nachdunkeln des Bilds. Sollen Farbbilder kalibriert werden, ist jeder Kanal einzeln zu betrachten. Bei der vorliegenden Kamera sind Rot und Grün annähernd linear; der blaue Kanal weicht stärker davon ab und wird durch Anwendung der Kalibrierfunktion aufgehellt.



Abb. 4.4: Farbtestmuster unter Kunstlicht im Original mit deutlichem Grünstich (links) und nach dem manuellen Weißabgleich (rechts)

Histogrammanpassungen bilden den kompletten Intensitätsbereich auf sich selbst ab und sind daher am effizientesten als Look-Up-Tables (LUT) zu implementieren.

4.1.3 Farbanpassung

Wie in Abschnitt 2.1.2 angesprochen, besteht für Farbbilder die Notwendigkeit der gegenseitigen Anpassung der einzelnen Farbkanäle mittels eines Weißabgleichs. Bedingt durch die Anordnung der Farbfilter auf dem CMOS-Chip weisen rohe Aufnahmen einen deutlichen Grünstich auf (Abb.4.4 links). Dieser Effekt lässt sich mittels einer weißen Referenzfläche (im Farbtestmuster das zentrale Flächenstück) ausgleichen. Dazu werden die einzelnen Farbkanäle separiert und die Helligkeitswerte z. B. mittels einer Histogrammspreizung so verschoben, dass die Referenzfläche weiß erscheint. Vereinigt man die Farbkanäle anschließend wieder, so erhält man ein weitgehend farbechtes Bild (Abb.4.4 rechts).

Unter vergleichbaren Bedingungen (vor allem im Hinblick auf die Lichtquelle) sind die notwendigen Transformationsparameter der Histogrammanpassung konstant und können somit aus einer Testreihe im Vorfeld bestimmt werden. Ein Weißabgleich ist auch direkt zur Aufnahmezeit über die Kamera möglich, wobei in diesem Fall elektronische Verstärker das Verhältnis der aufgezeichneten Lichtintensität in den einzelnen Kanälen regeln. Diese Vorgehensweise kann auch automatisch und adaptiv geschehen, sodass die Parameter aus jedem Bild für die nächste Aufnahme ermittelt werden. In diesem Fall ist jedoch Vorsicht geboten, da bei einem automatischen Weißabgleich die hellste Stelle im Bild benutzt wird, und diese nicht zwangsweise auch ein weißes Objekt darstellt.

Durch einen Weißabgleich lassen sich reinfarbige Bereiche nicht vollständig restaurieren. Bei der Bildaufnahme werden diese auch von den anderen Farbkanälen miterfasst; so ist z. B. der Rot-Anteil in aufgezeichnetem reinen Grün nur geringfügig kleiner als in reinem Rot. Durch eine lineare Histogrammspreizung bleiben die Fremdanteile relativ gesehen erhalten, was bei einer Segmentierung zu berücksichtigen ist.

4.1.4 Rauschunterdrückung durch Glättung

Aufgezeichnete Bilddaten unterliegen einem von den Aufnahmebedingungen und dem verwendeten Sensor abhängigen Rauschen. Die einfallende Strahlungsmenge auf ein isoliert betrachtetes Pixel kann als Poisson-verteilte Zufallsgröße σ_A aufgefasst werden [Jähne 02] und unterliegt daher auch bei konstanter Strahlung einer zufälligen Schwankung. Weitere Anteile des Bildrauschens werden durch die Aufnahmeund Ausleseelektronik σ_E sowie durch die Digitalisierung des analogen Signals σ_D verursacht. Durch unterschiedliche Verfahren lassen sich einzelne Anteile davon reduzieren.

4.1.4.1 Mittelung

Ist der Rauschanteil der Aufnahme σ_{A+E} deutlich größer als derjenige der Signaldigitalisierung, dann führt die Mittelung von n unter identischen Aufnahmebedingungen gemachter Aufnahmen zu einer Reduktion des Rauschpegels mit dem Faktor \sqrt{n} . Voraussetzung ist in diesem Fall, dass die aufgenommene Objektszene unbewegt bleibt. Bewegungen, wie sie z. B. auch durch Luftturbulenzen scheinbar verursacht werden können, führen je nach Betrag mindestens zu verwischten Kanten und im Extremfall zu mehrfacher Darstellung von Objekten.

Lässt sich σ_{A+E} nicht von σ_D trennen bzw. ist Letzteres dominant, so kann über mehrere Einzelbilder ebenfalls eine Rauschreduktion um \sqrt{n} erzielt werden, allerdings nur im Anteil der Digitalisierung.

4.1.4.2 Gleitender Mittelwert

In einem Einzelbild lässt sich das Bildrauschen unterdrücken, indem ein gleitender Mittelwert zur Grauwertglättung verwendet wird. Die entsprechende Filtermaske der Größe $m \times m$ lautet in diesem Fall

$$M = \frac{1}{m^2} \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{m \times m}$$
(4.3)

und stellt einen einfachen Rechteckfilter dar. Der gleitende Mittelwert ist ein Spezialfall eines digitalen Tiefpassfilters. Durch entsprechende Gewichtung der Koeffizienten lässt er sich auch unmittelbar in andere Tiefpassfilter, wie z. B. den Gauß-Tiefpass als Spezialfall eines Binomialfilters, überführen.

Im Idealfall ist damit die Standardabweichung des Gesamtrauschens σ_{A+E+D} um den Faktor mreduzierbar [Haberäcker 91]. Durch eine Mittelwertbildung werden Grauwertübergänge geglättet, was naturgemäß auch Objektkanten im Bild abschwächt. Diese werden in Abhängigkeit von der Größe der Glättungsmaske verwischt. Nachteilig ist zudem, dass grob fehlerhafte Grauwerte (binäres Rauschen, z. B. Pixelfehler) nicht eliminiert, sondern ebenfalls auf die Nachbarpixel verwischt werden.

4.1.4.3 Median

Der eben genannte Verwischungseffekt lässt sich durch die Anwendung eines Rangordnungsfilters wie des Median-Filters verhindern. Normalverteiltes Rauschen wird dadurch jedoch weniger unterdrückt als bei einem Mittelungsfilter. Gerade Kanten bleiben besser erhalten, kleinere Strukturen und vor allem Texturelemente können jedoch bei Verwendung von zu großen Filtermasken verloren gehen. Der Median ist gut als Segmentierungshilfe verwendbar; nach der Regionenbildung kann anschließend wieder das ungeglättete detailreichere Bild verwendet werden.



Abb. 4.5: Segmentierungsintervalle der Grundfarben in den einzelnen Kanälen, ausgehend vom Farbtestmuster in Abb.4.4 rechts

4.1.5 Segmentierung

Die Grauwertsegmentierung dient der Trennung von Objekten und Hintergrund bzw. einzelner Objekte oder Objektteile. Im einfachsten Fall entspricht sie einer Binarisierung des Eingangsbilds, indem lediglich zwei Zustände bzw. Regionentypen im Bild zugelassen werden: Objekt und Nicht-Objekt (Hintergrund). Auf Basis der Grauwertinformation lässt sich diese Einteilung über einfache Schwellwert-Operatoren finden. Ein Pixel (x, y) gehört zu einer Region r, wenn es einen Grauwert g größer oder kleiner einem bestimmten Schwellwert s aufweist:

$$r(g) = \begin{cases} 0 & \text{für } g(x,y) \leq s \\ 1 & \text{für } g(x,y) \geq s \end{cases}$$
(4.4)

Die Regionen müssen dabei nicht zusammenhängend sein. Durch die Wahl zusätzlicher Schwellwerte und Intervallbildung ist auch eine Mehrbereichs-Segmentierung möglich.

Für eine strikte Trennung nach diesem Verfahren sind eindeutige Grauwertunterschiede zwischen Hintergrund und Objekt nötig; das Histogramm verfügt dann idealerweise über deutlich ausgeprägte lokale Minima (bi- bzw. multimodale Verteilung). In der Praxis verhindern Texturen der Objekte, Ausleuchtung und Rauschen oftmals eine korrekte Segmentierung, eine Näherung kann jedoch zur Einschränkung des möglichen Arbeitsbereichs im Bild benutzt werden. Um ausgefranste, stark segmentierte Regionen zu vermeiden, ist oft eine vorangehende Glättung geeignet [Haberäcker 95].

Liegen Bilddaten in mehreren Kanälen vor (Farbbilder), so lassen sich in allen Kanälen entsprechende Segmentierungen vornehmen. Auf diese Weise kann die Farbe von Objekten beim Segmentierungsprozess genutzt werden. Da Farben immer Mischanteile in mehreren oder allen Kanälen aufweisen, ist für die Objektzuordnung nach der Segmentierung ein Einzelkanal nicht ausreichend. Durch die Verwendung aller Kanäle entsteht ein mehrdimensionaler Merkmalsraum, der als Ausgangspunkt für eine Farbklassifizierung verwendet werden kann (Abb.4.5). Die einzelnen Farben bilden darin Cluster (im Beispiel für Rot, Grün, Blau und Weiß), über die die Zuordnung eines Pixels zu einer Farbe durchgeführt werden kann.

Pixel, die außerhalb eines Clusters liegen, können entweder unklassifiziert bleiben, oder nach festgelegten Regeln einer Klasse zugeordnet werden. Im kartesischen Merkmalsraum geschieht dies meist nach einer einfachen Abstandsregel über den RGB-Wert. Auf diese Weise würden im Farbtestmuster der Abb.4.4 die Mischfarben Violett und Hellblau dem Farbcluster "Blau" und Gelb dem Farbcluster "Grün" zugeordnet. Möchte man dies verhindern, so sind für diese Farben eigene Cluster zu bilden. Ein echtzeitfähiges, gleichzeitiges Prüfverfahren eines Pixels auf bis zu 32 verschiedene Farbcluster wird von [Bruce et al. 00] vorgeschlagen.

In der Vorverarbeitung dient die Segmentierung zur Einschränkung der Bildregionen, auf die nachgeschaltete Operatoren angewendet werden, z. B. durch Elimination homogener Hintergrundbereiche oder der Topologiebestimmung signifikanter Farbbereiche.

4.2 Merkmalsextraktion

Ein *Merkmal* ist in der Bildverarbeitung definiert als "Eigenschaft eines betrachteten Pixels oder Bildgebietes" [Jahr 06]. Diese Eigenschaften können Intensitäten in unterschiedlichen Aufnahmekanälen (Grauwert, Farbe), Geometrie, Textur oder Topologie betreffen. Bei der Merkmalsextraktion müssen sie quantitativ und qualitativ erfassbar sein, um eine Objektklassifikation anhand eines – ein oder mehrere Merkmale umfassenden – Eigenschafts- bzw. Merkmalsraums zu ermöglichen.

Das größte Problem bei der Merkmalsextraktion auf Basis von natürlichen Bildern ist die Definition harter Entscheidungskriterien, wann ein bestimmtes Merkmal vorliegt und wann nicht. Häufig werden daher Merkmalsinstanzen mit einem statistischen Gewichtungswert kombiniert, der die Verarbeitung von "unscharfem" Wissen, z. B. auf Basis von Fuzzy-Logic-Verfahren ermöglicht.

Die Merkmalsextraktion ist in der Regel stark parameterabhängig, da die verwendeten Algorithmen abhängig von der Bildqualität unterschiedlich gute Resultate hervorbringen. Für einen automatisierten Ablauf sind daher entweder Steuergrößen zu verwenden, die aus den Eingangsbildern selbst abgeleitet werden können, oder solche, die in einer Trainingsphase festgelegt worden sind. Die oben angeführten Vorverarbeitungsoperatoren haben dann das Ziel, die Bilder zur Laufzeit möglichst stark an die Bilder der Lernphase anzugleichen.

Im Bereich der Videotachymetrie, in dem die Bildverarbeitung zur Detektion von möglichen Zielpunkten genutzt wird, sind Kanten und deren Schnittpunkte zusammen mit den daraus ableitbaren geometrischen Formen die wichtigste Merkmalsklasse, gefolgt von Flächenmerkmalen, die beispielsweise die Schwerpunktbestimmung kreisförmig konzentrischer Zielmarkierungen ermöglichen. Andere Merkmale dienen weniger der Zielpunktfindung selbst als vielmehr der Klassifikation von Zielpunkttypen (z. B. Unterscheidung benachbarter Markierungen, Rückschlüsse auf das Material des Ziels usw.).

4.2.1 Textur

Als Textur kann jede Anordnung von Pixeln verstanden werden, deren Zusammenhang gewissen geometrischen oder statistischen Gesetzen gehorcht [Jahr 06] und somit durch periodische Wiederholung eines Musters repräsentiert wird. Zur Beschreibung einer Textur ist es folglich ausreichend, das Grundmuster und die Wiederholungsregeln festzulegen [Jähne 02]. Dabei sind regelmäßige (Ziegelwand) oder zufällige (Kiesstraße) Muster möglich. Das Erscheinungsbild von Texturen ist jedoch auflösungsabhängig: Sinkt die Auflösung unter die Grundmustergröße, erscheinen regelmäßige Texturen unregelmäßig. Zudem unterliegen sowohl Grundmuster als auch Wiederholungsabfolge zufälligen, teils signifikanten Schwankungen. Die Beschreibung von Texturen in numerischen Größen ist daher schwierig.

Da die Grundmuster stets einen gewissen Bildbereich einnehmen, ist die Texturanalyse auf die Wahl eines geeignet großen Suchfensters angewiesen, das idealerweise das Grundmuster genau enthält. Innerhalb dieser Fenster können z. B. einfache statistische Strukturmerkmale 1. oder 2. Ordnung, wie Varianz, Energie, Kontrast, Entropie oder Eigenkorrelation bestimmt werden [Abmayr 94]. Diese Merkmale spannen dann für jedes Pixel einen Merkmalsraum auf, der für die Zuordnung zu unterschiedlichen Texturprimitiven genutzt werden kann.

Ein häufig eingesetzter Ansatz stammt von [Laws 80]. Er definiert in der gebräuchlichsten Form fünf Faltungsmasken

$$L5 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$E5 = \begin{pmatrix} -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$S5 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$W5 = \begin{pmatrix} -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R5 = \begin{pmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(4.5)$$

für die Eigenschaften Level (Gleichförmigkeit), Edge (Kanten), Spot (Punktförmigkeit), Wave (Schwingung) und Ripple (Kräuselung). Diese sind in Zeilen- und Spaltenrichtung beliebig kombinierbar und liefern so einen Satz von 25 Grundmerkmalen G_i .

Im Anschluss kann die Energie für die einzelnen Merkmalsbilder innerhalb eines Nachbarschaftsfensters, welches wieder die Größe des Grundmusters haben sollte, ermittelt werden:

$$E = \sum_{i=-n}^{n} \sum_{j=-n}^{n} G_i(i,j)^2$$
(4.6)

Da alle Faltungsmasken außer der L5L5-Maske einen Mittelwert von 0 aufweisen, kann diese zur Normalisierung der Texturenergiebilder verwendet werden. Ist die Richtung der Textur nicht von Interesse, so lassen sich jeweils zwei symmetrische Grundmerkmale kombinieren, sodass ein Satz von 15 rotationsinvarianten Merkmalen verbleibt. Je nach Anforderung sind die Energiebilder auch weiter verknüpfbar. Für tatsächliche Anwendungen kann der benötigte Merkmalssatz schließlich auf wenige Merkmale werden. Ein Beispiel für ein Laws-Bild unterschiedlicher Texturen zeigt Abb.4.6, wobei die rotationsinvariante Kombination LRRL gewählt wurde. Diese ist sensibel auf gleichförmige Grauwertverläufe sowie auf hochfrequente Grauwertänderungen (Kräuselung), und verstärkt daher in Summe, ähnlich dem Spot-Merkmal, Einzelpunkte mit benachbarten großen Grauwertgradienten. Die Zuordnung eines Bereichs zu einer Textur wird über eine Auswertung seines Histogramms durchgeführt, wobei die Muster mit mehreren Symmetrieachsen (Schachbrett, Punkte, Gitter) in diesem Fall schwer voneinander, aber deutlich vom Linienmuster unterscheidbar sind.

Die Trennung unterschiedlicher Texturen bedarf eines geeigneten komplexen Merkmalsraums, der für nicht-synthetische Muster nur schwer zu definieren ist. Während die menschliche Wahrnehmung Texturen kontextuell verarbeitet, benötigt ein Computeralgorithmus objektive Differenzierungsmerkmale. In der Konsequenz ist es kaum möglich, rein natürliche Objekte (z. B. einen Felsblock und die Wiese im Hintergrund) signifikant zu trennen.

Eingesetzt werden kann die Texturanalyse jedoch, um auf den Typ eines Objekts, dessen Bildbereich durch andere Methoden bestimmt wurde, z. B. hinsichtlich dessen Material rückzuschließen. Des



Abb. 4.6: Testfeld mit unterschiedlichen Texturen (links oben) und das rotationsinvariante Laws-Bild LRRL (links unten). Rechts daneben die Histogramme der einzelnen Texturen, die als ein Merkmal für die Unterscheidung dienen können.

Weiteren kann man richtungsabhängige Texturfilter verwenden, um (z.B. bei Ziegelstrukturen) die Ausrichtung von Objekten abzuleiten.

Die Texturanalyse zur Objektklassifikation stellt für den Einsatz im geodätischen Spektrum eine untergeordnete Aufgabe dar, da aus der Textur nicht auf signifikante Zielpunkte geschlossen werden kann. Einsatzbereiche können hier z. B. in der automatischen Analyse der Reflektivität bestimmter Zielbereiche für reflektorlose EDM oder der automatischen Prüfung auf Zielpunktverdeckungen liegen.

4.2.2 Kanten

Objektkanten stellen prinzipiell eine Unstetigkeit im Grauwertverlauf eines Bilds senkrecht zur Kantenrichtung dar, die je nach Intensitätsunterschied zwischen Objekt und Hintergrund (bzw. einzelnen Objektteilen) mehr oder weniger deutlich ausgeprägt ist. Die Detektion von Kantenverläufen basiert daher in der Regel auf einer Gradientenbildung des Grauwertverlaufs und der Suche nach lokalen Extremwerten.

In idealen Bildern ist dies bereits durch einfache, kleine Filtermasken realisierbar, z.B. in der Zeilenrichtungskomponente mittels

$$M_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(4.7)



Abb. 4.7: Farbtestmuster in Graustufen und zugehöriges Histogramm

Bei verrauschten Bildern führt dieser einfache Ansatz jedoch zu verhältnismäßig großen Störungen, sodass Filter benötigt werden, die in Laufrichtung ableiten, in andere Richtungen jedoch glättend wirken. Ein einfacher Ansatz hierzu ist der Sobelfilter (Komponente in Zeilenrichtung)

$$M_x = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$
(4.8)

Andere vergleichbare Filter stammen u.a. von Prewitt, Robinson oder Kirsch. Letztere besitzen neben den Filtermatrizen in Zeilen- und Spaltenrichtung noch solche in diagonaler Ausrichtung und werden daher auch *Kompassoperatoren* genannt.

Neben den Gradienten operatoren werden auch Laplace operatoren, basierend auf der 2. Ableitung des Grauwertverlaufs, eingesetzt. In diesem Fall ist eine Kante durch einen Null durchgang zwischen zwei lokalen Extrema charakterisiert. Laplace filter neigen jedoch dazu, sehr rauschanfällig zu reagieren, daher ist in diesem Fall das Bild zu erst zu glätten. Diese Glättung kann unmittelbar an der Filtermaske selbst angebracht werden und führt zum LoG-Filter (Laplacian of Gaussian), der über einen Glättungsfaktor σ gesteuert werden kann [Wagner 06].

Die bisher genannten Filter liefern als Resultat jeweils wieder ein Grauwertbild, in dem dann z. B. mittels Segmentation die Kantenpositionen ermittelt werden können. Einen anderen Ansatz beschreitet [Canny 86], dessen Filter ein Binärbild ("Kante" und "Nicht-Kante") zum Ergebnis hat. Ausgangspunkt ist auch hier die Glättung mit einem Gaußfilter und anschließender Sobel-Kantenfilterung, die jedoch zusätzlichen Verarbeitungsschritten unterworfen wird. Kanten von größerer Breite als einem Pixel werden in Gradientenrichtung ausgedünnt, sodass der verbleibende Kantenverlauf auf den Maxima der Filterantwort zu liegen kommt (Non-Maximum-Suppression). Zusätzlich werden unzuverlässige Kanten mit geringen Amplituden durch einen Hysterese-Schwellwert-Algorithmus eliminiert. Weiterentwicklungen des Ansatzes von Canny stammen von [Deriche 87] und darauf aufbauend [Lanser u. Eckstein 91], die eine verbliebene Abhängigkeit der Kantenamplituden von der Kantenrichtung durch eine Modifikation des Filters eliminieren.

Die auf Filtermasken basierenden Kantendetektoren arbeiten in der beschriebenen Form pixelgenau. Für eine Vielzahl von Anwendungen ist jedoch eine subpixelgenaue Kantendetektion gefordert. Ausgehend von der analytischen Beschreibung einer Linienextraktion entwickelt [Steger 00] dazu einen Zuordnungsalgorithmus, der auf einen beliebigen Gradientenoperator aufgesetzt werden kann und unter guten Bedingungen eine Genauigkeit von besser als $\frac{1}{25}$ Pixel liefert. Üblicherweise sind damit Detektionen von besser $\frac{1}{10}$ Pixel möglich. Diese Algorithmen sind in der Software HALCON implementiert und werden daher im Rahmen dieser Arbeit bevorzugt verwendet.

Die Extraktion von Kanten in Mehrkanalbildern ist schwieriger als diejenige in Einkanalbildern. Insbesondere genügt es nicht, die Kantenalgorithmen getrennt auf die einzelnen Kanäle anzuwenden und die Resultate anschließend zu überlagern, da die Gradienten in unterschiedliche Richtungen zeigen oder sich sogar gegenseitig auslöschen können. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu beheben, zeigt ebenfalls [Steger 00] auf: als Erweiterung der Gradientenbildung im n-dimensionalen Raum wird der metrische Tensor G eingeführt. Dieser enthält die partiellen Ableitungen der Bilder in den einzelnen Kanälen, die wiederum durch entsprechende Gradientenfilter erzeugt werden:

$$G = \begin{pmatrix} \sum_{i}^{n} \frac{\partial f_{i}}{\partial x} \frac{\partial f_{i}}{\partial x} & \sum_{i}^{n} \frac{\partial f_{i}}{\partial x} \frac{\partial f_{i}}{\partial y} \\ \sum_{i}^{n} \frac{\partial f_{i}}{\partial x} \frac{\partial f_{i}}{\partial y} & \sum_{i}^{n} \frac{\partial f_{i}}{\partial y} \frac{\partial f_{i}}{\partial y} \end{pmatrix}$$
(4.9)

Prinzipiell weisen Kantendetektionen in Grauwertbildern mindestens dieselbe Genauigkeit auf wie entsprechende Farbbilder, da in letzteren in den einzelnen Kanälen bis zu 75 % der Information aus den umliegenden Pixeln interpoliert werden muss (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Nutzung von Farbinformation kann jedoch die Vollständigkeit der extrahierten Kanten verbessern, wenn die Grauwertrepräsentationen unterschiedlich farbiger Objekte nahe beieinander liegen und daher eine Unterscheidung in nur einem Kanal nicht möglich ist. Bei der Darstellung des Farbtestmusters aus Abb.4.4 rechts in Graustufen lassen sich beispielsweise Rot und Blau nicht im Histogramm unterscheiden – sie bilden gemeinsam das 2. Maximum (Abb.4.7). Ebenfalls ununterscheidbar sind Grün und Violett (3. Maximum), obwohl beide Farbpaare im mehrdimensionalen Raum der Abb.4.5 segmentierbar sind und ein mehrkanaliger Kantenfilter sie trennen kann.

Kanten und ihre Schnittpunkte werden meist nicht nur als Merkmale von Objekten, sondern als Grenzverläufe zwischen Objekten interpretiert. Sie sind in der Regel bei einem erkannten Zielobjekt auch die Grundlage für die endgültige Zielpunktfindung auf dem Zielobjekt.

4.2.3 Geometrie

Auf Basis der einem Objekt zugeordneten Kanten oder Segmentierungsflächen lassen sich in der Folge geometrische Objektmerkmale ableiten. Diese können für einzelne Umrissgrenzen als Linienmerkmale oder für den Gesamtumriss als Flächenmerkmale ausgeprägt sein. Dabei sind rein geometrische Merkmale, die sich aus den (reellen) Koordinaten der Konturen unmittelbar berechnen lassen, sowie statistische (Momenten-)Merkmale aus deren räumlicher Verteilung berücksichtigt [Burger u. Burge 05]. Die wichtigsten sind Fläche F, Umfang U, Kreisförmigkeit C, Kompaktheit K, Orientierung t und Exzentrizität e.

Es gilt

$$C = \frac{F}{r^2 \pi} \qquad \text{mit } r = \text{ Radius des minimalen Umkreises}$$
(4.10)

$$K = \frac{U^2}{4\pi F} \tag{4.11}$$

und für die zentralen Momente μ_{pq} der Ordnung p, q bezogen auf den Objektschwerpunkt $(\overline{x}, \overline{y})$

$$\mu_{pq} = \sum_{u,v} I(u,v) \cdot (u-\overline{x})^p (v-\overline{y})^q \tag{4.12}$$

wobei (u, v) reellwertige Anteile von Pixelelementen mit der Teilfläche I(u, v) sein können.



Abb. 4.8: HDS-Zielmarkierung bestehend aus zwei geometrischen Grundformen (links) und Extraktionsergebnisse in unterschiedlichen Größen und Ausrichtungen nach formbasierten Merkmalen

Dann folgt

$$t = \frac{1}{2}\arctan\frac{2\mu_{11}}{\mu_{22} - \mu_{22}}$$
(4.13)

$$e = \frac{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}{(\mu_{20} + \mu_{02})^2} \tag{4.14}$$

Nach [Hu 62] lassen sich aus normierten Zentralmomenten sieben weitere abgeleitete Momente entwickeln, die invariant gegen Verschiebung, Skalierung und Rotation sind. Nicht invariant sind die Größen jedoch gegen perspektivische Verzerrung.

Geometrische Merkmale spielen vor allem in den Fällen eine Rolle, in denen man ein gesuchtes Objekt in geometrische Grundformen aufspalten kann, deren Lage zueinander bekannt ist. Dann genügt das Auffinden hinreichend vieler entsprechender Formmerkmale in topologisch korrekter Anordnung, um mit ausreichender Zuverlässigkeit auf das Gesamtobjekt schließen zu können.

Die Detektion eines HDS-Zielzeichens ist über Formmerkmale möglich. Es besteht aus zwei identischen Grundformen (Abb.4.8 links) mit jeweils einem Kreisförmigkeitswert von etwa 0,50 und einem Kompaktheitswert von etwa 1,25. Stimmt bei zwei extrahierten Formen mit diesen Merkmalen zudem die Orientierung überein und sind sie unmittelbar benachbart, werden die Einzelformen als zusammengehörendes Zielzeichen identifiziert. Ein anderer Ansatz könnte nach einer sich selbst durchdringenden Figur mit nahezu verschwindender Fläche bei annähernd kreisförmiger konvexer Hülle suchen.

Diese Merkmale sind unabhängig von der Größe und Ausrichtung des Zielzeichens und erlauben so eine entfernungs- und richtungsunabhängige Objekterkennung. Die Zielzeichen in Abb.4.8 sind nach diesem Algorithmus bestimmt; auch die Detektion von flächenförmigen Objekten wie Blobs (Abb.5.22) kann über geometrische Merkmale durchgeführt werden. Eine geometrische Formbeschreibung ist jedoch von der Qualität der Bilddaten und damit der Detektierbarkeit von Einzelelementen abhängig. Es ist möglich, dass Teile des Objekts verdeckt, außerhalb des Bilds liegend oder radiometrisch bzw. über Kantendetektoren nicht extrahierbar sind. In diesen Fällen versagt ein Verfahren, das auf mehrteiligen Grundformen basiert. Flexibilität erreicht man dann durch Reduktion auf geometrische Primitive wie Geraden- und Bogenstücke und anschließende Rekombination zu komplexeren Elementen.

Die Erkennung von Objekten mittels merkmalsbasierter Ansätze ist in all jenen Fällen praktikabel, in denen ein Objekt eindeutig durch die beschreibenden Merkmale von seiner Umgebung unterschieden werden kann. Der Ansatz versagt, wenn unterschiedliche Objekte entweder im Merkmalsraum nicht getrennt oder wenn keine belastbaren Merkmale identifiziert werden können. Für eine Vielzahl von natürlichen Objekten ist dies der Fall.

4.3 Matching

Während die Ableitung von Merkmalen geeignet ist, eine bestimmte Klasse von Objekten im Bild zu lokalisieren, verwendet man Matching-Algorithmen, um einzelne Objektinstanzen bekannten Aussehens zu detektieren. In der Photogrammetrie wird Matching seit der Verwendung digitaler Bildsysteme eingesetzt; [Baltsavias 99] nennt es mit Blick auf die Detektion von Rahmenmarken, Pass- und homologen Punkten "die nützlichste und meist benutzte Funktion der digitalen Photogrammetrie".

Beim Matching muss im Vorfeld eine Schablone (Template) des zu identifizierenden Objekts generiert werden; zur Laufzeit werden Instanzen genau dieser Schablone im Bild gesucht. Die Verfahren zur Erstellung des Templates unterscheidet man in korrelationsbasiert, grauwertbasiert, formbasiert und komponentenbasiert, wobei die ersten beiden zum Typus der intensitätsbasierten Verfahren zusammengefasst werden. Eine Übersicht über die jeweilige Eignung der Methoden in Abhängigkeit von der Bildqualität gibt [MVTec 07], eine übersichtliche Erläuterung der Verfahren findet sich in [Steger et al. 08].

Matching-Verfahren unterliegen Problemen, wenn sich die Repräsentation des Objekts geometrisch bzw. radiometrisch ändert. Von gutmütiger Natur sind dabei reine Ähnlichkeitstransformationen in einer Ebene senkrecht zur Aufnahmerichtung (Rotation des Objekts im Bild, unterschiedlich große, ansonsten jedoch identische Objekte oder Entfernungsänderung eines Objekts). In diesem Fall kann auch das Template entsprechend transformiert werden. Dies wirkt sich jedoch negativ auf die Berechnungszeit aus: erlaubt man beispielsweise fünf Rotations- und Skalierungsschritte, so sind insgesamt 25 Einzeltemplates zu generieren und zu prüfen. Schwieriger zu handhaben sind bei intensitätsbasierten Methoden, die mit dem Vergleich von Grauwerten arbeiten, vor allem Inhomogenitäten in der Beleuchtung; bei den Methoden höherer Ordnung sind es affine oder perspektivische Verzerrungen, die von Bewegungskomponenten außerhalb der Aufnahmeebene herrühren. Eine weitere Beeinträchtigung von Matching-Algorithmen stellen fehlende bzw. verdeckte Teile der zu erkennenden Instanz dar; des Weiteren muss geregelt sein, wie der Algorithmus mit mehreren in einem Bild vorhandenen Instanzen verfährt.

4.3.1 Intensitätsbasiertes Matching

Intensitätsbasiertes Matching nutzt die Bildinformation in Form der Grauwerte direkt. Im einfachen Fall des grauwertbasierten Matchings wird dem Suchfenster ein Grauwertmuster überlagert und die Position der größten Übereinstimmung bestimmt. Die Laufzeit hängt dabei unmittelbar von der Größe des Suchfensters und damit der Güte der Näherungslösung ab. Template und zu suchende Instanz müssen in Maßstab und Belichtung übereinstimmen und es darf nicht zu Teilverdeckungen oder Unschärfeeffekten kommen.

Bessere Resultate liefert die korrelationsbasierte Methode (vgl. z. B. [Bähr u. Vögtle 98]). Sie beruht auf der Berechnung des zentrierten und normalisierten Kreuzkorrelationskoeffizienten NCC

$$NCC(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(g^B(x_i, y_j) - \overline{g}^B \right) \cdot \left(g^T(x_i, y_j) - \overline{g}^T \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(g^B(x_i, y_j) - \overline{g}^B \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left(g^T(x_i, y_j) - \overline{g}^T \right)^2}}$$
(4.15)

 mit

- M,N Anzahl der Zeilen bzw. Spalten im Template, zentriert um die
- x, y Zentrumspixelkoordinaten des Templates im Suchbereich
- g^B, g^T Grauwert des entsprechenden Bild- bzw. Templatepixels
- $\overline{g}^B, \overline{g}^T$ Mittelwerte des Suchbereichs bzw. Templates

Durch die Zentrierung mit $\overline{g}^B, \overline{g}^T$ ist das Ergebnis unsensibel für lineare Beleuchtungsänderungen und durch die Normalisierung für Kontrastschwankungen. Der *NCC*-Wert liegt dabei im Intervall von [-1;1] mit hohen positiven Werten für erfolgreich identifizierte Matches. Im Anschluss wird die Lösung mit dem besten Wert zusammen mit den Werten für die unmittelbar benachbarten Pixel einer Parabel-Anpassung unterzogen und die Extremstelle dieser Kurve gesucht. Auf diese Weise kann aus der lediglich pixelbasierten Kreuzkorrelationsbestimmung ein subpixelgenaues Maximum abgeleitet werden [Baltsavias 99]. Neben der *NCC* gibt es weitere, ähnlich aufgebaute Verfahren, z. B. mittels der Summe der absoluten Grauwertdifferenzen oder ihrer Quadrate [Brown 92].

Ein weiterer grauwertbasierter Ansatz ist das Matching mit der Methode der kleinsten Quadrate (LSM) nach [Ackermann 84], [Grün 95] u. a. Der Kreuzkorrelationskoeffizient kann dabei als erste Näherungslösung dienen. Neben der Zuordnung der Grauwerte innerhalb des Suchbereichs sind je nach gewähltem Modell iterativ auch geometrische und radiometrische Transformationen bis zu einem gewissen Grad möglich, unter anderem auch die Nutzung affiner Parameter oder die Helmerttransformation. Dieser Ansatz ist insbesondere für synthetisch generierbare Zielmarken-Templates geeignet, wie sie z. B. in der Luftbild-, aber auch in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt werden, und ist damit auch für die Anwendung mit Videotachymetern interessant. Je nach Größe der Templates sind Genauigkeiten von 0,1 Pixel und besser zu erreichen.

4.3.2 Formbasiertes Matching

Die gegenüber den intensitätsbasierten Vorgehensweisen komplexeren Verfahren des formbasierten Matchings verwenden extrahierte Kanten zur Objektlokalisation. In früheren Ansätzen (z. B. [Borgefors 88], [Rucklidge 97]) wird dabei die Kantenlage bestimmt, das Bild entsprechend binarisiert und auf Basis der so reduzierten Daten ein Ähnlichkeitsmaß zwischen dem Template und dem Suchraum abgeleitet. In einer Weiterentwicklung verwenden [Olson u. Huttenlocher 97] zusätzlich Informationen über die Kantenrichtungen, um Fehlzuordnungen zu minimieren. Dieser Ansatz ist jedoch sehr rechenintensiv. Die Binarisierung führt zudem zu einer erhöhten Anfälligkeit der Algorithmen gegenüber geringem Kontrast. Fallen einzelne Kantensegmente aus, ist dies gleichbedeutend mit einer scheinbaren Verdeckung und kann je nach verwendetem Ähnlichkeitsmaß zu fehlerhaften Kantenzuordnungen und damit zu einem Versagen des Matchings führen.

Ein stabiles Verfahren schlägt [Steger 02] vor. Dabei wird jedem Template- und Suchraumpixel ein Richtungsvektor über identische Kantenfilterung zugeordnet; das Ähnlichkeitsmaß ist dann die Summe der Skalarprodukte, welches unkritisch auf Verdeckungen und Störkanten reagiert. Normalisiert man diese Größe, erreicht man zusätzlich die Beleuchtungsinvarianz. Der Zuordnungskoeffizient s bestimmt sich dann mittels

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\langle e_i^T, e_i^B \rangle}{\|e_i^T\| \cdot \|e_i^B\|}$$
(4.16)

 mit

n Anzahl der Templatepunkte

 e_i^B, e_i^T Richtungsvektoren der Bild- bzw. Templatepunkte

und einem Maximalwert für s von 1.



Abb. 4.9: Template eines Kirchturmkreuzes auf verschiedenen Hierarchiestufen einer Bildpyramide. Die Auflösung nimmt von links nach rechts jeweils um den Faktor 4 ab.

Durch die Wahl der Richtungsprodukte als Maß tragen diejenigen Punkte, für die es entweder im Template oder im Suchbereich keine Kante und damit eine rauschbedingte, zufällige und kleine Richtungskomponente gibt, im Mittel nicht zum Gesamtwert bei. Dieser kann folglich auch als Maß für die Gesamtsichtbarkeit eines detektierten Objekts aufgefasst werden.

Werden zusätzlich diskrete Rotationen und Skalierungen zugelassen, muss für jede Transformationskombination ein eigenes Modell generiert werden. Um die Rechenzeit dennoch begrenzen zu können, arbeiten aktuelle Verfahren nach dem Prinzip von Bildpyramiden: In mehreren Stufen wird die Auflösung der Templates jeweils um ein Viertel reduziert, bis auf der obersten Hierarchiestufe nur mehr wenige Modellpixel übrig bleiben (Abb.4.9). Zur Laufzeit wird ebenfalls mit geringer Bildauflösung begonnen und so der Suchbereich in der jeweils folgenden Pyramidenstufe deutlich reduziert. Zusätzliche Abbruchkriterien erhöhen die Prozessierungsgeschwindigkeit weiter. Durch Polynomapproximation oder durch eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung der Kanteninformation wird in diesem Ansatz ebenfalls Subpixelgenauigkeit erreicht.

Das vorgestellte Verfahren ist eines der Kernstücke des Softwarepakets HALCON und zum gegenwärtigen Zeitpunkt führend im Bereich des Objektmatchings. Untersuchungen weisen eine hohe Robustheit auch bei Teilverdeckungen von 50% und mehr bei einer Genauigkeit von 0,05 Pixeln und besser nach [Ulrich u. Steger 02], sodass es insbesondere für die hochgenaue Messung in Bildern und damit für die Anzielung im Sinne präziser geodätischer Richtungsmessungen mit Videotachymetern geeignet ist.

4.3.3 Komponentenbasiertes Matching

Beim komponentenbasierten Matching sollen Objekte detektiert werden, die aus mehreren, relativ zueinander beweglichen Einzelobjekten bestehen. Im 2D-Fall sind folglich Translationen und Rotationen zu berücksichtigen. Als einfache Lösungsstrategie bietet sich die getrennte Detektion der Teilobjekte und anschließende Plausibilitätskontrolle der gegenseitigen Objektlage an (vgl. z. B. [Kratchounova et al. 96]).

Idealerweise berücksichtigt ein Algorithmus jedoch schon während des Matchings mögliche relative Objektpositionen. Einen laufzeitoptimierten Ansatz, der dies leistet, stellt [Ulrich 03] vor. Durch Trainingsinformationen werden die Lagemöglichkeiten relativ zueinander analysiert und daraus Einschränkungen für die Suchbereiche, bezogen auf benachbarte Objektteile, ermittelt. Zur Laufzeit wird dann ein geeignetes Ausgangsobjekt gewählt, durch absolutes Matching lokalisiert, und ausgehend von diesem die Suche baumartig ausgedehnt. Mit dem beschriebenen Verfahren ist Echtzeitmatching möglich.

Im Rahmen ingenieurgeodätischer Messungen kann komponentenbasiertes Matching geeignet sein, mehrere gleichzeitig im Bild befindliche Zielmarkierungen relativ zueinander auszuwerten, z. B. eine Referenzmarke und eine Marke auf einem beweglichen Objekt, etwa bei Schwingungsmessungen. Da relative Lagebedingungen berücksichtigt werden, ist zudem eine schnelle Unterscheidung mehrerer identischer Markierungen bezüglich einer Referenzmarkierung möglich.

4.3.4 3D-Matching

Neben den bisher angesprochenen Matchingverfahren, die das Finden eines ebenen Objekts zum Ziel haben, existieren auch Verfahren zur Suche von 3D-Objekten in Einzelbildern. Die Komplexität des 3D-Matchings beruht dabei auf der großen Zahl von sechs Freiheitsgraden, mit denen ein Objekt gegenüber der Kamera gelagert sein kann (drei Translationen, wobei diejenige in Aufnahmerichtung dem Maßstab entspricht, und drei Rotationen). Da die Projektion einer räumlichen Struktur in die Ebene folglich unterschiedlichste Abbildungen erzeugt, ist neben einer ausreichenden Schärfentiefe der Kamera auch eine vollständige Beschreibung des Objekts, z. B. mittels eines CAD-Modells, notwendig.

Darauf aufbauend entwickeln [Wiedemann et al. 08] einen hierarchischen Ansatz unter Ausnutzung von Bildpyramiden. In der Lernphase werden innerhalb eines aus einem (λ, φ, d) -Kugelschalensegment bestehenden Parameterraums in unterschiedlichen Auflösungsstufen virtuelle Kameras platziert. Durch diese Anordnung werden drei Freiheitsgrade abgedeckt. Die übrigen drei entsprechen dann zwei Translationen und einer Rotation in der Ebene, sodass für jede virtuelle Kameraposition das oben beschriebene kantenbasierte 2D-Matching durchgeführt werden kann. Im vorgestellten Ansatz werden sie jedoch durch drei Rotationen der virtuellen Kamera um ihr optisches Zentrum ersetzt. Diese Vorgehensweise resultiert in einem sechsdimensionalen Suchraum, der dadurch handhabbar wird, dass in höheren Auflösungsstufen die Parameterintervalle immer stärker eingeschränkt werden können. Für die gefundenen Instanzen wird abschließend durch eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung über dem gesamten Parameterraum mit den bisherigen diskreten Werten als Näherungslösung die beste räumliche Ausrichtung ermittelt.

3D-Matching ist ein geeignetes Werkzeug, wenn sich die Ausrichtung von Objekten gegenüber der Kamera ändert (Eigenrotation). Für geodätische Anwendungen kann das auch einen Einsatz bei der Objektverfolgung bedeuten; dies gilt insbesondere, da Videotachymeter über die Schrittmotoren ihre Ausrichtung nachregeln können. Durch die Notwendigkeit einer CAD-Beschreibung des Objekts, bestehend aus Flächenelementen, kommen hierfür jedoch nur künstlich geformte Objekte in Frage.

Der Rechen- und Speicherbedarf ist durch die Vielzahl der notwendigen Modelle sehr hoch. Die Ausführungszeit ist dabei auch unmittelbar von der Auflösung der Kamera abhängig und verhindert bei voller Ausnutzung der 5 Megapixel einen Echtzeiteinsatz, sodass entweder Subsampling oder eine Ausschnittbegrenzung notwendig wird.

4.4 Zusammenfassung der Vorgehensweise

Für automatisierte Verfahren der Punktbestimmung sind robuste und zuverlässige Algorithmen der Bildverarbeitung elementar. Bei herkömmlichen Verfahren im industriellen Umfeld ist dies gewährleistet, indem die verwendeten Instrumente (Kamera, Objektiv, Beleuchtung etc.) explizit mit Blick auf die jeweilige Aufgabe gewählt und die Parameter der Auswertung entsprechend konfiguriert werden können. Diese Möglichkeiten bestehen beim Einsatz der Videotachymetrie nur sehr begrenzt, da deren notwendige Flexibilität sonst verloren ginge.

Um dennoch funktionelle Algorithmen mit geringer Fehleranfälligkeit entwickeln zu können, müssen diese auf einen qualitativ breiten Bereich an Eingangsdaten reagieren können. Dazu gehören zuallererst die Methoden der Bildbearbeitung. Hierbei sind Fehler der Aufnahme und Störeinflüsse weitgehend zu eliminieren und die radiometrischen Eigenschaften des Bildes hinsichtlich der späteren Verwendung zu optimieren. Dazu sind global vergleichbare Merkmale zu wählen und entsprechend einem bekannten, auf die Parameter folgender Analyse-Operatoren abgestimmten Werteintervall zu harmonisieren. Eine gewisse Glättung reduziert dabei zwar die Pixelgenauigkeit eines einzelnen Objektelements, ermöglicht aber u. U. überhaupt erst die spätere Auswertbarkeit mit einem vordefinierten Satz an Operatoren und ist daher hinzunehmen.

Die weitere Vorgehensweise hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Verhältnismäßig einfach ist die Anwendung von Matching-Algorithmen zur wiederholten Lokalisierung von aus einer Lernphase bekannten Objekten. Aktueller Stand der Technik sind kantenbasierte Operatoren. Die individuellen objektbeschreibenden Merkmale sind dabei für jedes Einzelziel bekannt und ändern sich in geodätischen Fragestellungen üblicherweise nur geringfügig zwischen den einzelnen Messepochen. Bei entsprechend homogener Bildqualität bzw. nach adäquater Vorverarbeitung gelingt das Matching mit sehr großer Zuverlässigkeit und Genauigkeiten im Bereich von ca. $\frac{1}{10}$ Pixel. Bei längeren Beobachtungszeiträumen kann das Template regelmäßig aus aktuellen Matchingergebnissen hoher Vollständigkeit neu erstellt werden, sodass z. B. auch Objektdrehungen die Detektion nicht zunehmend verschlechtern.

Von größerer Komplexität ist die automatische Suche nach Objekten, von denen nur eine allgemeine Merkmalsstruktur bekannt ist und die nicht explizit für jede Einzelinstanz in einer Lernphase vorbereitet worden sind. Je nach Ausrichtung der Kamera zum Objekt und abhängig von der Bildqualität sind die beschreibenden Merkmale unterschiedlich stark ausgeprägt oder verrauscht. Das Hauptproblem liegt hier meist darin, den Objektbereich vom Hintergrund zu trennen, sodass vor allem passive künstliche Zielzeichen (wie das HDS-Target) und Ziele vor gleichmäßigem Hintergrund (Betonwand, Himmel) mit klaren Konturen und maximalen Kontrasten geeignet sind. Die Erstellung robuster Algorithmen ist aufwendig und erfordert in der Konzeptphase umfangreiche Tests mit Beispielbildern unter verschiedenen in der Praxis erwarteten Blickwinkeln und Aufnahmebedingungen. Verfahren der autonomen Zielpunkterkennung sind üblicherweise im semiautomatischen Einsatz nutzbar und können zuverlässig die herkömmliche automatische Zielfindung mit retroreflektierenden Prismen ersetzen.

Bei nicht überwachten Detektionen ist als zusätzliches Zielpunktattribut die Ausgabe eines Verhältniswerts vorzusehen, der Auskunft über die Übereinstimmung des erkannten Objekts mit den vorgegebenen Kriterien gibt. Im Fall des Matchings kann dies die Vollständigkeit sein, bei einer auf Merkmalen basierenden Objektsuche ist eine aus diesen kombinierte Größe zu wählen. Der Wert muss als objektives, qualitatives Kriterium für die Zuverlässigkeit betrachtet werden können, dass das gefundene Objekt tatsächlich eine Instanz der gesuchten Klasse ist, um ggf. bei einer späteren Auswertung der Messdaten Fehlzuordnungen aufdecken und beheben zu können.

5 Genauigkeitspotential

5.1 Definitionen

Geodätische Messmittel werden hinsichtlich ihres Einsatzspektrums auf Grundlage der mit ihnen erreichbaren Genauigkeitsaussagen klassifiziert. Nach [Schwarz 95] unter Bezug auf die DIN 55350 Teil 13 und auch [Deumlich u. Staiger 02] unterscheidet man dabei folgende Begriffe:

- Die Auflösung entspricht dem Vermögen, zwei nahe beieinander liegende Messwerte gerade noch als unterschiedlich zu erkennen. Es handelt sich folglich um die bei einem System kleinste mögliche Zähleinheit. Bei digitalen Messsystemen ist sie in der Regel gleichbedeutend mit der kleinsten Anzeigeeinheit; allerdings kann sie davon auch abweichen: Messwerte liegen meist in einem Speicherformat vor, das über mehr Nachkommastellen verfügt als für die zu erfassende Größe signifikant zu erwarten sind. Je nach Wahl der verwendeten Stellen ist es daher ggf. möglich, eine Auflösung vorzutäuschen, die in Wahrheit bereits zufällige Anteile beinhaltet, oder bei zu pessimistischer Auslegung eine Unterabtastung in Kauf zu nehmen.
- Die Präzision ist ein Maß für die Reproduzierbarkeit eines Messwertes bei mehrfacher Anwendung desselben Messverfahrens unter identischen Messbedingungen und damit für dessen Streuung. Üblich sind auch die Begriffe "innere Genauigkeit" und "Wiederholungsgenauigkeit". Die Präzision einer Messung lässt sich als zufällige, normalverteilte Größe auffassen und somit mittels ihrer Standardabweichung hinsichtlich des Mittelwerts vergleichbar beschreiben. Man unterscheidet zwischen Wiederholungspräzision (repeatability mehrmalige identische Messung durch denselben Beobachter in derselben Messungebung am Stück) und Vergleichspräzision (reproducibility mehrmalige Messungebungen), welche entsprechend zu Wiederholstandardabweichungen bzw. Vergleichsstandardabweichungen führen. Systematische Abweichungen durch den Beobachtungsvorgang können von Messungen unter Wiederholbedingungen nicht erfasst werden, bilden sich jedoch in der Streuung von Messungen unter Vergleichsbedingungen ab.
- Die Genauigkeit beschreibt die Abweichung des Erwartungswerts einer Messung vom wahren bzw. richtigen Wert. Dabei sind systematische Abweichungen berücksichtigt. Dies ist letztlich das Kriterium, mit dem ein Messwert in ein übergeordnetes System eingepasst werden kann; man spricht daher auch von "äußerer Genauigkeit".

Eine gegenseitige Bedingtheit ist möglich: Bei zu gering angesetzter Auflösung wird eine unzulässig hohe Präzision vorgetäuscht; eine unpräzise Messmethode hat Einfluss auf die Genauigkeit. Umgekehrt ist über die Bestimmung der Standardabweichung die mögliche Auflösung bestimmbar.

Bei modernen Instrumenten werden Messwerte durch die Kombination einer Vielzahl von Sensoren generiert. Genauigkeitsaussagen, die in diesem Zusammenhang für Einzelsensoren getroffen werden, nutzt man zur Optimierung von Messanordnungen und -abläufen sowie zur Fehlerbudgetierung externer Einflüsse. Das Genauigkeitspotential des Gesamtsystems dient der stochastischen Beschreibung der ermittelten und davon abgeleiteter Größen im Sinne der Fehlerfortpflanzung und ist damit der Vergleichsmaßstab unterschiedlicher Messsysteme.

Bei der Integration neuer Sensoren in ein bestehendes System sind diese zuerst hinsichtlich ihres Genauigkeitspotentials als Einzelsensoren näher zu untersuchen. Dadurch ist die prinzipielle Eignung nachzuweisen, die Spezifikationen des bestehenden Systems aufrecht erhalten oder sogar verbessern zu können. Zusätzlich sind ggf. Beschränkungen sowie Anforderungen an den Messablauf aufzudecken, die bei der späteren Datengewinnung zu berücksichtigen sind.

5.2 Tachymeter

Das beim vorliegenden Prototyp verwendete Basistachymeter TCRP1201+ gehört hinsichtlich der Genauigkeitsspezifikationen zum oberen Marktsegment. Die Anzeigegenauigkeit der Winkelmessung beträgt 0,1 mgon, wobei elektronisch eine höhere Auflösung ausgelesen werden kann. Weitere Stellen sind jedoch nicht mehr signifikantes Ergebnis eines Messprozesses, sondern beinhalten Rauschen. Die Standardabweichung für absolute Richtungsmessungen beträgt 0,3 mgon nach ISO 17123-3, wobei Untersuchungen zeigen, dass die relative Winkelauflösung die Anzeigegenauigkeit erreicht.

Die typische Anwendung eines Videotachymeters ist jedoch nicht die Fixausrichtung auf ein Ziel zur Bestimmung relativer Bewegungen; diese Aufgabe ist durch eine einzelne, fest montierte Kamera billiger zu lösen. Die Stärke der Kamera-Tachymeter-Kombination liegt gerade in der veränderlichen, beliebigen Ausrichtung auf unterschiedliche Ziele, sodass die Absolutgenauigkeit als Kriterium zu wählen ist.

Die Distanzmessung erfolgt für Aufgabenstellungen mit IATS reflektorlos. Hier verfügt das verwendete Tachymeter über eine Standardabweichung von 2 mm + 2 ppm bei Distanzen bis 500 m nach ISO 17123-4. Im Bereich bis 500 m ist die Richtungsgenauigkeit folglich stets höher als die Streckengenauigkeit. Dies ist insbesondere für die Erfassung von dreidimensionalen Lageänderungen zu berücksichtigen, die nicht ausschließlich in Zielachsrichtung oder senkrecht dazu auftreten. Zwar zeigen Untersuchungen auch hier eine deutlich höhere relative Auflösungsgenauigkeit unter identischen Bedingungen, doch auch in diesem Fall ist für die Vergleichbarkeit von Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Absolutwert als Grundlage anzusetzen.

Bei der Verwendung von Videotachymetern werden zwar zusätzliche Sensoren eingesetzt, an den resultierenden Messgrößen aus der Tachymetrie ändert sich dadurch jedoch nichts. Insbesondere gilt, dass bekannte Verfahren zur Genauigkeitssteigerung, wie Messung in beiden Lagen oder redundante Messwertbestimmung, auch für diese neue Geräteklasse geeignet sind. Das Basistachymeter gibt für sämtliche Erfassungssensoren einen Bezugswert für die zu erreichende Genauigkeit vor; zwar kann diese durch neue Komponenten nicht wesentlich verbessert werden, jedoch darf sie auch nicht hinter die Möglichkeiten des herkömmlichen Tachymeters zurückfallen.

Die neu integrierten Komponenten – Kamerachip und Schrittmotor für die Fokussierung – werden daher hinsichtlich ihres Genauigkeitseinflusses auf das Gesamtsystem näher untersucht.

5.3 Kamera

5.3.1 Auflösungsvermögen

Entsprechend der Definition der Auflösung ist das Auflösungsvermögen bei einem Abbildungssystem der Fähigkeit gleichzusetzen, zwei im Objektraum getrennte Objekte auch im Bild als solche darzustellen. Früher verwendete man dazu schwarz-weiße Linienmuster unterschiedlicher Dichte (gemessen in Linienpaaren pro Millimeter, Lp/mm), und bestimmte den Grenzwert, an dem diese nur noch als homogene graue Fläche dargestellt werden konnten. Der so definierte Auflösungsbegriff gilt als Maß für die Schärfeleistung.


Abb. 5.1: Abbild eines Siemenssterns durch die Okularkamera

Da in der Praxis der subjektive Schärfeeindruck einer Abbildung geringerer geometrischer Maximalauflösung, aber höheren Kontrastes größer sein kann, ist heute überwiegend die Kombination von Kontrastübertragung und Auflösung in der *Modulationsübertragungsfunktion MTF* gebräuchlich [Bähr u. Vögtle 98]. Man bestimmt dabei die Helligkeitsverteilung des sinusförmig gebeugten beleuchteten Abbilds eines Strichgitters im Vergleich zu dessen (nicht abgebildeter) Helligkeitsverteilung im Objektraum. Diese Messungen führt man bei unterschiedlichen Strichdichten und damit Frequenzen durch und trägt den Quotienten von abgebildeter und originaler Helligkeitsamplitude als Graph dagegen auf. Bei einer idealen Bildwiedergabe beträgt das Verhältnis 1, an der Auflösungsgrenze geht er auf 0 zurück. Da das menschliche Auge nur etwa 5 Lp/mm auflösen kann, bemüht man sich bei heutigen Objektiven, Frequenzen von bis zu 40 Lp/mm mit einem MTF-Faktor von mindestens 50 % abzubilden; höhere Frequenzen sind von untergeordneter Bedeutung.

Für die Verwendung als geodätische Messkamera ist im Gegensatz dazu die maximale Auflösung durchaus von elementarem Interesse. Sie beschreibt die Fähigkeit des Messsystems, orthogonal zur Beobachtungsrichtung liegende kleine Zielpunktbewegungen quantifizieren zu können. Damit ist die Richtungsauflösung des Videotachymeters (eine ausreichende Auflösung der Teilkreisablesungen vorausgesetzt) direkt vom Auflösungsvermögen der Kamera abhängig. Bei einer herkömmlichen optischen Anzielung gilt dies analog für den Beobachter bzw. die Auflösung der ATR-Kamera.

Eine einfache Möglichkeit der Auflösungsbestimmung im Bild ist die Verwendung eines Siemenssterns (Abb.5.1). Er besteht aus n abwechselnd schwarzen und weißen Keilsegmenten, deren Dicke vom Mittelpunkt aus proportional zum Radius zunimmt (vgl. [Dolezalek 03]). Kennt man den Durchmesser des Sterns D, so kann man für den gewählten Beobachtungsabstand B die Auflösung A bestimmen als

$$A = \frac{p \cdot D \cdot \pi}{n} \tag{5.1}$$

wobei in der Abbildung p der Quotient aus den Durchmessern des nicht mehr aufgelösten, als graue Fläche erscheinenden Mittelbereichs und des gesamten Sterns ist.

Für die erreichbare Winkelauflösung α gilt dann einfach

$$\alpha = \arctan \frac{A}{B} \tag{5.2}$$

Messungen mit der Tachymeterkamera erbrachten mit diesem Verfahren bei einem Graustufenbild für ein Ziel in knapp 18 m Entfernung eine Winkelauflösung von 0,76 mgon, was in 25 m Entfernung einer Auflösung von ca. 0,3 mm entspricht. Eine andere Bestimmungsmethode der maximalen Auflösung ergibt sich aus der Chipgeometrie selbst. Zwei Objektpunkte sind dann getrennt wahrnehmbar, wenn die von ihnen ausgehenden Abbildungsstrahlen auf unterschiedlichen Pixeln abgebildet werden. Die nominelle Mindestdifferenz im Einfallswinkel lässt sich folglich aus der Pixelgröße und der Kamerakonstante berechnen. Für die in der Kalibrierung bestimmten Werte beträgt sie 0,61 mgon (geringer Fokus) bis 0,64 mgon (hoher Fokus) in Zeilen- bzw. Spaltenrichtung bzw. bei Verwendung von Farbbildern aufgrund der notwendigen Interpolation das Doppelte. Entsprechend liegt der geringste zulässige Richtungsabstand für 45°-Kanten bei knapp 0,9 mgon bzw. 1,8 mgon bei Farbbildern.

Eine Verbesserung kann erzielt werden, indem nicht punktförmige Elemente abgebildet werden, sondern Strukturen mit gewisser Ausdehnung herangezogen werden, die eine Interpolation zwischen den Pixelreihen ermöglichen. Die meisten subpixelgenauen Auswertealgorithmen ermöglichen im Mittel eine Steigerung um etwa den Faktor 10, wobei dies jedoch stark von Größe, Form und Ausrichtung des jeweiligen Objekts abhängig ist. Im Fall einer ideal horizontalen oder vertikalen Kante beispielsweise bringt ein Subpixel-Algorithmus keine Verbesserung, während er im Fall der 45°-Kante maximal wirken kann. Runde Zielformen umgehen dieses Problem.

Die hardwarebedingten Grenzwerte können durch diese heute üblichen Standardverfahren nicht reduziert, das Auflösungsvermögen für bestimmte Anwendungen aber softwaretechnisch optimiert werden. In der Praxis finden sich selten ideal sensorparallele Kanten; allerdings sollte bei der Auswahl von Zielpunktvisualisierungen stets berücksichtigt werden, dass dies in Einzelfällen dennoch möglich ist und dann ggf. zu deutlich verminderter Genauigkeit führen kann.

Moderne Tachymeter wie der TCRA1201+ besitzen Standardabweichungen ihrer Winkelmessung von 0,3 mgon bei einer Anzeige auf 0,1 mgon (vgl. [Leica 07a]). Das Auflösungsvermögen der Kamera bei lediglich pixelgenauer Messung fällt dabei um den Faktor 2–4 zurück. Für Präzisionsaufgaben sind daher automatisierte Messalgorithmen heranzuziehen, welche ebenfalls auf ihre prinzipielle Eignung zu prüfen sind.

Zur Untersuchung des durch softwarebasierte Auswertung verbesserten Auflösungsvermögens wurde ein HDS-Zielzeichen mit einem Durchmesser von 37 mm in einer Entfernung von knapp 15 m auf einem Kreuzsupport angebracht, sodass eine Bewegung senkrecht zur Aufnahmerichtung möglich war (vgl. Abb.3.14 links). Insgesamt konnte mit dem Support eine Bewegung um 12 mm realisiert werden, die vollständig in 0,5 mm-Schritten und in zwei jeweils 2 mm langen Intervallen in 0,1 mm-Schritten durchgeführt wurde. Die Ausrichtung des Tachymeters sowie die Fokusstellung und damit die verwendeten Kalibrierparameter waren während der gesamten Messung konstant, sodass die bestimmten Ergebnisrichtungen ursächlich auf die Bewegung des Zielzeichens zurückgeführt werden können.

Die Zielpunktbestimmung erfolgte über einen automatischen Detektionsalgorithmus, wobei zur Vermeidung von nicht repräsentativen Ausreißern jeweils drei aufeinanderfolgende Bilder herangezogen und die Ergebnisse gemittelt wurden. Eine einfache Rechnung führt für eine seitliche Bewegung von 0,1 mm auf eine Richtungsänderung von 0,43 mgon und damit etwa 0,7 Pixel.

Wie erwartet zeigt sich der hochgradig lineare Verlauf der Horizontalrichtungsänderung bei einer Bewegung quer zur Blickrichtung (Abb.5.2 links). Die Abweichungen von der Regression liegen im Bereich von $< \pm 0.15$ mgon und damit an der Grenze des Anzeigebereichs, die hier die minimale Auflösungsschranke vorgibt (Abb.5.2 rechts).

Die Verwendung von noch feineren Verschiebungsbeträgen in 0,02 mm-Schritten (Abb.5.3) bestätigt das Ergebnis zusätzlich, wobei diese bereits unterhalb der Rundungsgenauigkeit der Messdatenaufzeichnung liegen. Als Folge zeigen sich die bekannten Treppeneffekte in den Verbesserungsdarstellungen. Eine tangentiale Verschiebung in vertikaler Bildrichtung zeigt bei einer Anzielung annähernd im Horizont erwartungsgemäß ein identisches Resultat (Abb.5.4).



Abb. 5.2: Horizontale Auflösung: Richtungsänderung bei horizontaler Verschiebung in 0,5 mm bzw. 0,1 mm-Schritten (links) und Abweichung von der Regression (rechts)



Abb. 5.3: Horizontale Auflösung: Richtungsänderung bei horizontaler Verschiebung in 0,02 mm-Schritten (links) und Abweichung von der Regression (rechts)



Abb. 5.4: Vertikale Auflösung: Richtungsänderung bei vertikaler Verschiebung in 0,5 mm bzw. 0,1 mm-Schritten (links) und Abweichung von der Regression (rechts)



Abb. 5.5: Vertikale Auflösung: Richtungsänderung bei vertikaler Verschiebung in 0,01 mm-Schritten (links) und Abweichung von der Regression (rechts)

Die Aufzeichnung der Messdaten wurde auf 0,1 mgon gerundet, da die Kombination mit den aktuellen am Tachymeter abgegriffenen Richtungen diesen Wert vorgibt. Für ein unbewegtes Tachymeter mit konstantem Winkelabgriff über die gesamte Messzeit (Fixausrichtung) kann die erreichbare Winkelauflösung ggf. weiter bis zur Grenze des Detektionsoperators verbessert werden. In einem weiteren Versuch wurde daher die Aufzeichnung lediglich auf 0,01 mgon gerundet, und eine Verschiebung um 0,01 mm-Schritte durchgeführt (Abb.5.5). Mit einer Ausnahme liegen alle Verbesserungen bezüglich der Regression in einem Band von $\pm 0,065$ mgon, was in etwa 0,015 mm Auflösung in der Messentfernung und 0,1 Pixel auf dem CMOS-Chip entspricht.

Die Untersuchungen zeigen, dass unter kontrollierten Bedingungen die Auflösungsgenauigkeit des Kamerachips in Kombination mit subpixelgenauer Punktdetektion um den Faktor 2–4 besser ist als die zu erwartende Winkelgenauigkeit des Tachymeters. Im Gesamtsystem ist der Einsatz der Okularkamera für hochpräzise Anwendungen aus dieser Sicht zulässig.

5.3.2 Reproduzierbarkeit

5.3.2.1 Thermische Stabilität

Elektronische Komponenten moderner Tachymeter erzeugen im Betrieb Wärme, die sowohl das Bauteil selbst als auch – durch Wärmeleitung – benachbarte Bauteile beeinflussen kann. Führen diese Einflüsse bei ansonsten konstanten Bedingungen zu messbaren Änderungen von Sensorwerten, spricht man von thermisch bedingten Instabilitäten. [Hennes 03] führt in diesem Zusammenhang "die thermische Verformung von mechanischen Komponenten, zu denen auch optische Bauteile und insbesondere deren Halterungen zählen, die Änderung physikalischer Parameter [von Sensorbauteilen, z. B. Viskosität] und Drifterscheinungen elektronischer Komponenten" auf.

Dabei sind folgende Einflüsse zu unterscheiden:

• Einflüsse, die durch Standardkomponenten bereits auf den herkömmlichen Aufbau eines Tachymeters wirken (z. B. temperaturabhängige Änderungen der Teilkreisablesungen). Sie sind bei ausgeschalteter Kamera als Einlaufeffekte an den rohen Tachymeter-Richtungen zu erkennen.

Die Gerätehersteller sind bemüht, diese Einflüsse möglichst gering zu halten. [Flach u. Naterop 99] und [Hennes 03] weisen jedoch darauf hin, dass sie in abgeleiteten Messdaten wie den Zielachs- und vor allem Höhenindexfehlern für viele Instrumente nachweisbar sind. Die Auswirkungen sind vergleichbar einer Änderung der Umgebungstemperatur und wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben kalibrierbar, weisen jedoch in der Regel andere Beträge auf.

Das Videotachymeter auf Basis des TCRP1201+ zeigt bei ansonsten akklimatisiertem Gehäuse beim Einschalten eine Zunahme der Geräteinnentemperatur um ca. 4,5 °C während der ersten zwei Stunden. Danach bewegen sich die Schwankungen in einem Bereich von < 1 °C. Die Ablesungen der Teilkreise weisen damit deutliche Korrelationen mit dem Temperaturverlauf auf (vgl. Abb.5.6). Auffällig ist vor allem bei der Hz-Richtung, dass diese unmittelbar nach dem Einschalten um etwa 0,2 mgon steigt, um in den folgenden 30 Minuten wieder auf den Ausgangswert abzusinken und dann der Temperaturkurve folgend mit etwa 0,1 mgon/°C wieder anzusteigen. Dieses Anfangsverhalten ist reproduzierbar. Demgegenüber sinkt die Zenitrichtung mit einem Betrag von ca. 0,1 mgon/°C.

Die Beträge der Richtungsänderung während der ersten beiden Stunden überschreiten die Messgenauigkeit des geprüften Instruments und müssen daher für hochpräzise Messungen durch Modellbildung, regelmäßigen Abgleich mit festen Bezugsrichtungen oder entsprechende Gerätevorlaufzeit eliminiert werden.



Abb. 5.6: Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die Tachymeter-Richtungen



Abb. 5.7: Auswirkungen der Erwärmung der Kamerakomponenten auf die Tachymeter-Richtungen

• Einflüsse, die durch die neu integrierten Komponenten (vor allem Schrittmotor und Kamerachip) am Tachymeter zusätzlich erzeugt werden. Sie erscheinen beim Zuschalten dieser Komponenten als Einlaufeffekte an den rohen Tachymeter-Richtungen bei auf Betriebstemperatur befindlichem Tachymeter.

Idealerweise sollte der Einbau von zusätzlichen Komponenten die Temperaturstabilität des Basissystems nicht verändern. Sie können jedoch als zusätzliche Wärmequellen wirken, sodass die notwendige thermische Korrektur im Vergleich zu einem nicht modifizierten Tachymeter zunimmt. Der Einsatz der Kamerakomponenten führt zu einer zusätzlichen Erwärmung im Instrument um 0,7 °C mit einer Konsolidierung nach knapp 2 Stunden. In der Hz-Richtung ist wieder eine Korrelation von gut 0,1 mgon/°C zu erkennen; in V-Richtung beträgt die Änderung 0,5 mgon/°C (Abb.5.7). Dieser hohe Wert hat eine andere Ursache und wird im Anschluss noch näher erläutert.

• Einflüsse, die sich durch das Zuschalten der neuen Komponenten auf die Kameraausrichtung auswirken. Sie führen zu Variationen der Zielpunktmessung im Kamerabild, die nicht durch die Änderung der rohen Tachymeter-Richtungen verursacht werden.

Hier ist vor allem zu prüfen, ob es durch Erwärmungseffekte des optischen Systems inklusive des Kamerachips zu signifikanten Veränderungen der äußeren oder inneren Kameraorientierung und



Abb. 5.8: Auswirkungen der Erwärmung der Kamerakomponenten auf die gemessenen Richtungen

als Folge daraus zu Ablagen eines konstanten Zielpunkts im Messbild kommen kann. [Walser 05] führt diese Untersuchungen für den Prototyp der IATS basierend auf einem TCRA1101 durch und ermittelt eine maximale Drift von <0,4 mgon sowie eine Stabilisierung nach 1,5 Stunden. Für die im letzten Punkt genannte Messreihe wurden auf die Zielmarkierung aus Abb.3.14 links gleichzeitig Messungen im Kamerabild vorgenommen. Naturgemäß ist deren Streuung deutlich größer als die des reinen Richtungsabgriffs am unbewegten Tachymeter, daher wird die Kurve geglättet (Abb.5.8).

Die daraus abgegriffenen Zielrichtungen weisen über die Messdauer nur einen leichten Trend in Hz auf, der in der Größenordnung der rohen Richtungsänderung liegt und durch diese verursacht ist. In V ist die Zielpunktfindung weitgehend trendfrei (mit Ausnahme der letzten 15 Minuten, die auf meteorologische Effekte im Messraum zurückzuführen sind). Eine signifikante Korrelation mit der Temperaturkurve ist nicht nachweisbar.

• Einflüsse, die durch das Tachymeter auf die Kameraausrichtung wirken. Sie führen beim Einschalten des Tachymeters zu Variationen der Zielpunktmessung im Kamerabild, die sich nicht aus den Änderungen der rohen Tachymeter-Richtungen und den Einflüssen der Kamera-Eigenerwärmung ableiten lassen.

Diese Effekte haben identische Auswirkungen wie die Eigenerwärmung der Kamera, sind aber eben nicht durch diese, sondern durch die Änderung der Geräteinnentemperatur verursacht. Bestimmt werden können sie durch die Messung der Bildposition eines unbewegten Zielpunkts. Abb.5.9 zeigt für die x-Achse des Sensorsystems (Hz-Richtung) bei Erwärmung um 5°C eine Verschiebung um knapp 3 Pixel, für die y-Achse (V-Richtung) um etwa 1 Pixel. Dieser Effekt korreliert zeitlich mit dem Startverhalten der Tachymeter-Richtungsablesung. Eine Auswirkung dieser Pixeländerung auf die prozessierte Richtung müsste etwa 1,8 mgon betragen, ist jedoch in dieser nicht erkennbar. Es ist also zu vermuten, dass es sich dabei um eine tatsächliche Bewegung der Alhidade handelt, wobei Verschiebung im Bild und rohe Teilkreisablesung sich gegenseitig aufheben.

Die Änderungen in der Bildposition in beiden Achsrichtungen liegen, von tatsächlichen Teilkreisdriften bereinigt, deutlich unter 1 Pixel und können somit als ausreichend gering eingestuft werden.

Da in der Anwendung keine Pixelwerte, sondern bereits daraus abgeleitete Richtungen bestimmt werden, sind diese ebenfalls zu betrachten. Im Versuch weist das Tachymeter wieder eine Zunahme der Innentemperatur um 4,5 °C auf (Abb.5.10), die sich über einen Zeitraum von 3 Stunden auf



Abb. 5.9: Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die Bildposition



Abb. 5.10: Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die gemessenen Richtungen

die Richtungsmessung auswirkt. Die Änderung in der Horizontalrichtung zum Zielpunkt kann wieder mit 0,1 mgon/°C abgelesen werden; dies entspricht der zuvor festgestellten Änderungsrate der rohen Hz-Richtungsablesung. Die Vertikalrichtung ändert sich nur um ca. 0,1 mgon und ist daher nicht signifikant von der Erwärmung abhängig.

Die Auswirkungen der Tachymeterkomponenten auf die Orientierung des Kamerachips können als gering eingestuft werden. Die Abweichungen in den Messdaten sind durch die Änderungen in den rohen Tachymeterrichtungen zu erklären.

Gesondert ist daneben noch das Zusammenspiel von Änderungen in den rohen Richtungswerten am Tachymeter und den gemessenen Richtungen im Kamerabild zu betrachten.

Die Versuchsreihen zeigen, dass eine horizontale Teilkreisdrift sich ohne große Abschläge in eine Messdrift übersetzen lässt (Abb.5.6 und 5.10 sowie 5.7 und 5.8 jeweils links im paarweisen Vergleich). Der Einfluss auf die Messung im Bild selbst ist folglich gering; die Abweichungen sind einem herkömmlichen Tachymeter identisch.

Anders verhält es sich bei Betrachtung der Abbildungen 5.7 und 5.8 rechts. Hier verändert sich der Zenitwinkel signifikant, ohne dass sich dies im Messergebnis niederschlägt. Denselben Effekt zeigen die Abbildungen 5.6 und 5.10, jeweils rechts. Es kann sich folglich – identisch zu den geringen Pixelverschiebun-



Abb. 5.11: Kombinierte Aufwärmeffekte auf die Kameramessung

gen in Abb.5.9 – nicht um eine Kreisdrift bei physikalisch unveränderter Zielachsausrichtung handeln, sondern muss tatsächlich mit einer leichten Fernrohrbewegung einhergehen. Da diese auch zu einer Verschiebung des Zieles im Bild führt, bleibt dessen Messung unbeeinflusst.

Es ist zu vermuten, dass die Ursache im noch nicht vollständig austarierten Fernrohr zu suchen ist. Die neu integrierten Komponenten sind etwas schwerer als das ursprüngliche Okular, sodass es nach dem Aufstellen und ggf. verstärkt durch die Geräteerwärmung zu einem Kriechen des Fernrohrgehäuses kommt. Für den Prototyp wurde daher ein geringes Gegengewicht am Okular angebracht, welches den Einfluss in der Folge verringert hat.

Die in diesem Abschnitt aufgezeigten Systematiken sind qualitativ reproduzierbar; in ihren jeweiligen Auswirkungen (Einlaufdauer, Maximalabweichung) variieren sie jedoch. In der Kombination aller Effekte ist vor allem die temperaturabhängige Drift der rohen Tachymeter-Horizontalrichtung zu erkennen. Diese kann mit dem mehrfach ermittelten Wert von 0,1 mgon/°C ausreichend abgeschätzt werden. Ein Einfluss auf die Vertikalrichtung ist ohne das Fernrohrkriechen nicht zu erkennen. Die Abbildungen 5.10 und 5.11 gleichen sich daher signifikant; auf eine gesonderte Berücksichtigung durch die Erwärmung der Kamerakomponenten kann verzichtet werden.

In der Praxis ist eine getrennte Wertung der möglichen Einflussgrößen ohnehin schwierig oder sogar unmöglich. Die Inbetriebnahme von Tachymeter und Kamera muss zeitnah erfolgen; für stationäre Anwendungen kann es jedoch möglich sein, die Komponenten, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt über getrennte Stromversorgungen verfügen, auch unabhängig voneinander einzuschalten.

Da nachweislich die Erwärmung des Instruments und deren Auswirkungen auf die rohen Richtungsablesungen – wie beim herkömmlichen Tachymeter – die größten Einflüsse auf die Zielbestimmung ausüben, ist diese für Präzisionsanwendungen zu berücksichtigen. Durch die lange Aufwärmzeit ist hierbei eine rechnerische Korrektur gegenüber einer internen Akklimatisierung zu bevorzugen.

5.3.2.2 Wiederholgenauigkeit der Bildmessung

Bei der Arbeit mit herkömmlichen Tachymetern ist die Zielpunktbestimmung abhängig von der Anzielgenauigkeit und individuellen Interpretation des Operateurs. Dies hat manche Vorteile (intuitive zeitliche Integration bei Luftflimmern, kontextuelle Detektion des richtigen Zielpunkts), kann aber auch fehlerhafte Einflüsse hervorrufen (systematische Fehlinterpretation, notwendige manuelle Einstellung des Zielpunkts). Die (teilweise) Substitution menschlichen Sehens durch Bildverarbeitungs- und -analyseoperationen ist in der Lage, einzelne Schwächen zu beheben, ist jedoch ebenfalls limitiert. Bei der Zielfindung in Kamerabildern müssen zuerst zwei verschiedene Anwendungsfälle unterschieden werden: die Detektion eines oder mehrerer bestimmter, im Aussehen vorher bekannter und beschreibbarer Ziele (Einzelpunktdetektion) und die Detektion einer beliebigen Anzahl möglicher, im Vorfeld nicht näher spezifizierbarer, aber möglicherweise objektbeschreibender Punkte (Points of Interest, PoI). Letzterer Ansatz dient hauptsächlich der halbautomatischen Messunterstützung und wird zur Zeit z. B. von [Reiterer et al. 03] verfolgt. Für wiederholungsfähige Messaufgaben, wie sie z. B. Deformationsmessungen darstellen, sind hingegen beschreibbare Einzelpunkte zu verwenden.

Während die Bestimmung des richtigen Zielpunkts durch den Menschen unmittelbar kontext- und objektbasiert vorgenommen wird, steht dem Bildanalyse-Algorithmus im ersten Schritt nur die reine Pixelinformation, d. h. eine Farb- oder Grauwertverteilung, zur Verfügung. Erst in weiterführenden Verarbeitungsschritten kann versucht werden, diese durch Segmentierung in entsprechende Objektinformationen umzuwandeln. Dabei ist der Algorithmus auf feste Vorschriften und/oder Vergleichsmodelle (Templates) angewiesen.



Abb. 5.12: Identische HDS-Zielmarke unter verschiedenen Blickwinkeln

Die möglichen Vorschriften für ein und dasselbe Ziel sind vielgestaltig: Eine HDS-Zielmarkierung lässt sich beispielsweise beschreiben als derjenige Punkt, auf den zwei schwarze (oder auch weiße) Kreissektoren zeigen; als Schwerpunkt der schwarzen (oder weißen) Flächenanteile; als (rechtwinkliger) Schnittpunkt der geradlinigen Kanten der Markierung oder auch als Mittelpunkt des die schwarzen (oder weißen) Sektoren umschreibenden Kreises.

Die Vorschriften sind so zu formulieren, dass sie eine Vielzahl von Ausprägungen des Erscheinungsbilds des beschriebenen Ziels abdecken. Dazu gehören insbesondere Ansichten unter unterschiedlichen Blickwinkeln und Entfernungen (Vergrößerung, Detaillierungsgrad). Die Abbildungen 5.12 zeigen dieselbe Zieltafel mit je unterschiedlichen Kippungen, wodurch sich sowohl die geometrische Form als auch die gegenseitige Lage der einzelnen Objektteile zueinander verändert. Während dem Menschen die jeweilige Position des Ziels intuitiv klar erscheint, ist für eine automatisierte Detektion ein stabiler Algorithmus, ggf. mit mehreren Spezialfällen, zu entwickeln. Ein Beispiel für eine entsprechende Auswertung zeigt Abb.5.13 mit mehreren HDS-Zieltafeln unterschiedlicher Ausrichtung an den Seiten eines Würfels.

Detektionsregeln lassen sich vereinfachen, wenn die zu Grunde liegenden radiometrischen Bedingungen in allen auszuwertenden Bildern vergleichbar sind. Dies führt zu Bildvorverarbeitungsschritten, die noch nicht das Ziel verfolgen, Informationen zu extrahieren, sondern die Messbilder lediglich aufbereiten. Vor allem zu nennen sind hier Histogrammmanipulationen, die zu Aufhellungen und Kontrastverstärkungen führen können, Rauschunterdrückung durch Tiefpassfilter wie Mittelwert oder Median und Schwellwertoperatoren zur Vorsegmentierung. Diese Eingriffe können auch die manuelle Messung unterstützen (z. B. deutlichere Darstellung von Einzelstrukturen in Bildern mit nicht ausgenutztem Grauwertbereich durch Histogrammspreizung).



Abb. 5.13: Ausgewerteter Würfel mit HDS-Zielmarken

Der ermittelte Zielpunkt ist das Resultat einer Funktion der Eingangsinformationen (Grauwerte, Kanten, Templates). Diese Funktion ist ihrem Wesen nach mittelnd und/oder ausgleichend, sodass die zu erwartende Genauigkeit im Einzelbild sowie die Präzision mehrerer aufeinanderfolgend detektierter Zielpunkte abhängig von der Redundanz der Eingangsgrößen und damit der flächenmäßigen Verteilung im Messbild ist. Eine möglichst bildfüllende Repräsentation der Objektinstanz ist demnach vorteilhaft.

Nachteile ergeben sich bei der Bildmessung durch die zeitliche Diskretisierung des Aufnahmeintervalls in einzelne Abbildungen. Jede Bildszene stellt, auch bei Auswertungen mit hoher Bildrate, lediglich eine Momentaufnahme der Messszene dar und unterliegt mindestens zufälligen Abweichungen. Diese können radiometrischer (Sonnenstand, Schattenwurf), geometrischer (Luftflimmern) oder inhaltlicher (Verdeckungen, Bewegungen) Art sein, und führen ihrerseits auf Basis eines festen Auswertealgorithmus zu unterschiedlichen Zielpunktwerten. Stochastisch normalverteilte Einflüsse können durch Mittelbildung über mehrere Aufnahmen reduziert werden. Sind zudem grobe Ausreißer zu erwarten, so bietet sich eine robuste Mittelung oder die Medianbildung an.

Die automatische Detektion eines Zielpunkts unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Diese sind je nach Anwendung zu berücksichtigen bzw. zu gewichten. Als Ausgangspunkt ist daher zu untersuchen, welche Wiederholgenauigkeit für den einfachen Fall einer statischen Zielmarkierung unter unveränderten Umgebungsparametern zu erwarten ist. Den Haupteinfluss bei diesen Untersuchungen stellt der jeweilige verwendete Erkennungsalgorithmus. Je nach Sensibilität und Zuverlässigkeit kann die Standardabweichung deutlich variieren. Die in den folgenden Beispielen verwendeten Algorithmen haben sich in ihrer Klasse als zuverlässig erwiesen ohne bereits das Optimum darzustellen, und sind daher für einen ersten Untersuchungsansatz durchaus repräsentativ.

Der Algorithmus für die HDS-Zieltafel aus Abb.5.12 basiert auf einer Vorsegmentierung in Grauwert-Intervallen mit anschließender Kantenextraktion. Gesucht wird der Schnittpunkt jeweils zweier Geradenelemente. Die Detektion der IR-Diode aus Abb.5.14 basiert auf einem einfachen Schwerpunktalgorithmus für Blobs.

Abb.5.15 zeigt die ausgewerteten Horizontal- und Vertikalrichtungen zur HDS-Zieltafel bezogen auf ihre Mittelwerte. Während der ersten Stunde sind die bekannten Einlaufeffekte zu beobachten. Die Streuung der Messwerte liegt für beide Richtungen im Bereich von $\pm 2 \text{ mgon}$, wobei die Standardabweichung nur 1,8 $\frac{\text{mgon}}{10}$ (Hz) bzw. 1,2 $\frac{\text{mgon}}{10}$ (V) beträgt. Das entspricht einer Quote signifikanter Ausreißer von 2,85 % bzw. 1,21 % (auf 3σ -Niveau). Betrachtet man nur die Messdaten nach der ersten Stunde, so sinkt die Standardabweichung auf jeweils 1,1 $\frac{\text{mgon}}{10}$ mit einer signifikanten Ausreißerquote von 1,17 % bzw. 1,33 %.



Abb. 5.14: IR-Diode mit deutlich sichtbarem Strahlungs-Blob



Abb. 5.15: Wiederholgenauigkeit bei Messung auf eine HDS-Zieltafel (Mittelwert und Median)

Eine deutliche Verbesserung erreicht man, wenn mehrere aufeinanderfolgende Messwerte gemittelt werden. Im einfachsten Fall verwendet man dazu nur drei Werte. Die Standardabweichung für die Messdaten nach dem Einlaufeffekt sinkt dadurch auf $0,6 \frac{\text{mgon}}{10}$ mit einer maximalen Streuung von $3,4 \frac{\text{mgon}}{10}$.

Zum Schutz vor Ausreißern, die ggf. den Mittelwert verfälschen, kann der Median verwendet werden. Im einfachsten Fall verwendet man auch hier nur drei aufeinanderfolgende Werte. Die Standardabweichung liegt erwarteterweise mit $0.6 \frac{\text{mgon}}{10}$ im selben Bereich wie beim Mittelwert, die maximale Streuung fällt jedoch mit $< 1.9 \frac{\text{mgon}}{10}$ geringer aus.

Deutlich geringer ist die Streuung bei der Schwerpunktmessung eines IR-Blobs. Dieses Verfahren ist nicht kanten-, sondern grauwertbasiert und liefert deshalb bei einem gleichmäßig strahlenden symmetrischen Ziel konstantere Ergebnisse. Abb.5.16 zeigt wieder die ausgewerteten Richtungen bezogen auf ihre Mittelwerte. Das Instrument war bereits längere Zeit eingeschaltet, deshalb ist kein Einlaufeffekt sichtbar. Die Streuungen liegen im Bereich von <0,5 mgon mit Standardabweichungen von 1,1 (Hz) bzw. 0,6 (V) $\frac{\text{mgon}}{10}$, was einer Quote signifikanter Ausreißer von 0,0 % bzw. 0,9 % entspricht. Die Mittelwert- und Medianbildung aufeinanderfolgender Messwerte bewirkt hier wegen



Abb. 5.16: Wiederholgenauigkeit bei Messung auf eine Infrarot-Diode (Mittelwert und Median)

der präzisen Rohdaten nur noch eine geringe Verbesserung und reduziert die maximale Streuung auf $3,0 \frac{\text{mgon}}{10}$.

Die Untersuchungen weisen nach, dass geeignete Detektionsalgorithmen sowohl auf Grauwert- als auch auf Kantenbasis in der Lage sind, in mehreren vergleichbaren Bildern desselben Objekts reproduzierbar dieselben Zielpunktrichtungen abzuleiten. Die zu erwartende Genauigkeit liegt dann an der Auflösungsgrenze der Tachymeterteilkreise und ist der manuellen Beobachtung mindestens gleichwertig. Notwendig ist dazu jedoch ein geeignetes Mittelungsverfahren über mehrere Aufnahmen sowie eine Ausreißererkennung.

Die Vorverarbeitung der Aufnahmen, die als Eingangsdaten für die Erkennungsalgorithmen dienen, muss als elementarer Bestandteil der Auswertung gelten und ist mitentscheidend für die Zuverlässigkeit der Operatoren.

5.3.3 Überlappende Messungen

Ein entscheidender Vorteil der Kombination von hochauflösender Kamera mit einem Tachymeter im Vergleich zu der reinen Kameramessung mit bekannter, fixer Ausrichtung ist die Möglichkeit, ausgedehnte Objekte durch die Kombination mehrerer Aufnahmen vollständig erfassen zu können. Da das Mosaiking von Messbildern zu Überlappungen insbesondere an den Randbereichen der Aufnahmen und damit auch der Kalibrierparameter führt, ist zu untersuchen, ob es an den Stoßstellen zu Inkonsistenzen (Koordinatensprüngen) kommen kann.

Erste Anhaltspunkte liefern die Restklaffungsbilder der Kamerakalibrierung für an verschiedenen Bildpositionen abgebildete Zielpunkte (vgl. Abb 3.14 und 3.15). Bei korrekter, systematikfreier Kalibrierung verbleiben an beliebigen Aufnahmeorten im Bild nur mehr zufällige Anteile, deren Auswirkungen im Bereich der tachymetrischen Messgenauigkeit liegen. Um dies explizit für die Erfassung durchgehender Kanten eines länglichen Gegenstands zu prüfen, wurden die Überlappungsbereiche der Einzelaufnahmen eines Metallstabs für Durchbiegungsmessungen (vgl. Abb.6.6) näher untersucht.

Die Überlappungsbereiche beschränken sich dabei auf jeweils 50–150 Pixel, was in etwa 30–90 mgon Horizontalwinkelbereich entspricht. Am Objekt in etwa 12,60 m Entfernung entspricht dies rund 1–2 cm redundant aufgenommener Objektkanten pro Stoßstelle. Einen Ausschnitt der Überlappung zeigt Abb.5.17. Die extrahierten Kantenpunkte wurden dabei bereits in polare Tachymetermesswerte und daraus in Raumkoordinaten umgerechnet. Die Unterschiede zwischen den Koordinaten identischer Bereiche liegen in der Größenordnung von $\leq 0, 1$ mm resultierend aus polaren Winkelunterschieden von $<0,25\,{\rm mgon},$ überlagert durch das Rauschen der Kantendetektion im Einzelbild. Dieses Ergebnis reproduziert die bei der Kalibrierung abgeschätzte erreichbare mittlere Genauigkeit von knapp 0,2 mgon in Entfernungen bis 15 m (vgl. Abschnitt 3.2.4). Bei überlappenden Messungen sind folglich keine Inkonsistenzen bezüglich der Kalibrierparameter an den Rändern festzustellen.

5.3.4 Schärfentiefe

Objektiv- und Fokussierlinse eines Fernrohrs lassen sich auch als Gesamtsystem auffassen, für das gemeinsame optische Parameter abgeleitet werden können. [Walser 05] nutzt dies für die Ableitung der Kamerakonstanten aus den Linsenwerten und der Fokusposition. Umgekehrt kann so für eine gegebene Stellung der Fokussierlinse die jeweilige Entfernung bestimmt werden, in der sich ein Objekt befinden muss, um scharf abgebildet zu werden.

Befindet sich ein Punkt in einer davon abweichenden Entfernung, so trifft das von ihm ausgehende Strahlenbündel auf der Bildebene nicht in einem Punkt zusammen, sondern wird in einem annähernd kreisförmigen Bereich, dem Zerstreuungskreis, dargestellt. Dessen Durchmesser wird in der Folge mit u bezeichnet.

Bei digitalen Bildsensoren gilt ein Objektpunkt auch dann noch als scharf abgebildet, wenn sein Zerstreuungskreis nicht größer ist als ein Pixel [Luhmann 03]. Daher werden nicht nur Objekte in der exakt fokussierten Distanz a, sondern in einem Distanzbereich $[a_v; a_h]$ als scharf wahrgenommen.

Es gilt

mit

$$a_v = \frac{a}{1+K} \qquad a_h = \frac{a}{1-K}$$

$$K = \frac{k(a-f)u}{f^2}$$
(5.3)

wobe
ikdie Blendenzahl und fdie Objektiv
brennweite bezeichnen.

Da beim geodätischen Fernrohr die Änderung der Blendenzahl zur Steuerung der Schärfentiefe nicht möglich ist, ist für jede Fokusposition der Bereich der Schärfentiefe fest vorgegeben. Bei bekannten optischen Parametern kann die Gesamtbrennweite eines geodätischen Fernrohrs aus der Objektivbrennweite f_1 , der Fokussierlinsenbrennweite f_2 und dem Abstand der Fokussierlinse vom Objektiv ebestimmt werden nach der Formel

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{f_1 + f_2 - e} \tag{5.4}$$



Abb. 5.17: Überlappungsbereich zweier Kamerabilder um ca. 125 Pixel



Abb. 5.18: Empirische Schärfentiefebereiche unterschiedlicher Fokussierungen

Da vom Hersteller für das verwendete Instrument keine optischen Parameter zu erhalten waren, kann die Brennweite lediglich für die Fokussierung auf ∞ abgeleitet werden, da sie in diesem Fall ausreichend genau der Kamerakonstanten entspricht. Es gilt dann

$$f \approx 228,5mm$$
 $k = 5,71$

Mit der Voraussetzung, dass ab einer Entfernung von ca. 500 m die Fokussierung auf annähernd ∞ angebracht ist, ergibt sich ein Schärfentiefebereich von [446,33 m; 568,34 m].

Für weitere Fokuslinsenstellungen sind die Grenzen ohne Kenntnis der optischen Parameter nicht ableitbar. Eine Vorstellung davon können jedoch die empirischen Daten der Kalibrierung aus Abschnitt 3.2 bieten, bei welcher bewusst die Ränder der Scharfabbildung gewählt wurden. Teilweise ist der Zerstreuungskreisdurchmesser von einem Pixel dabei jedoch deutlich überschritten. Den so bestimmten Korridor akzeptabler Schärfentiefe für den Bereich bis 100 m zeigt Abb.5.18; auszugsweise sind die Daten in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Im Nahbereich, wo ein großer Linsenweg nur eine kleine Änderung

Fokus	Entfernung [m]	Schärfentiefeintervall [m]
1030	1071,50	1392,60
1100	244,70	227,40
1250	86,40	23,03
2000	22,50	1,53
3000	11,60	0,62
6000	4,85	0,13
10000	2,78	0,04
19000	1,59	$0,\!02$

Tab. 5.1: Schärfentiefeintervalle in unterschiedlichen Entfernungen

der fokussierten Distanz bewirkt, ist die Schärfentiefe entsprechend gering (wenige cm), sodass hier als Ziele hauptsächlich ebene Objekte und Zielzeichen in Frage kommen. Durch den großen Linsenweg sind jedoch auch feinere Distanzunterschiede einfach fokussierbar.

Mit zunehmender Entfernung schrumpft die notwendige Bewegung des Fokussierglieds und damit auch die Möglichkeit, die Fokussierposition exakt einzustellen. Als Kompensation nimmt der Schärfentiefebe-

reich entsprechend zu; in einer Entfernung von 100 m beträgt er etwa 25 m. Bei Verlassen des Nahbereichs sind somit auch Strukturen mit räumlicher Tiefe hinreichend scharf auf einer Einzelaufnahme abbildbar.

Zur Gewinnung höchster Genauigkeit sollten die Intervallgrenzen jedoch nicht ausgereizt werden. Das menschliche Auge vermag durch seine Akkomodationsfähigkeit auf unterschiedliche Bildlagen den Schärfentiefebereich bei Okularsicht zu vergrößern [Naumann u. Schröder 87] und auch in leicht unscharfen Bildern Objekt- und Zielpunktinformationen durch semantische Verknüpfungen ausreichend genau zu extrahieren. Bildverarbeitungsroutinen, insbesondere solche, die kantenbasiert arbeiten, verlieren jedoch mit zunehmender Unschärfe an Zuverlässigkeit.

5.3.5 Refraktionseffekte

Refraktionseinflüsse auf Strecken- und Richtungsmessungen sind in der Geodäsie lange bekannt und beschrieben (vgl. z. B. [Moritz 61]). Sie haben ihre Ursache in Dichte- und damit Brechungsindex-Unterschieden der unterschiedlichen von einem Messstrahl durchquerten Luftschichten. Der Brechungsindex n ist dabei definiert als das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Trägerwelle des Messstrahls c:

$$n = \frac{c_0}{c} \tag{5.5}$$

Luft als Medium wirkt dispersiv, sodass eine Abhängigkeit von der Wellenfrequenz bzw. der Wellenlänge λ besteht, für welche von der IUGG in einer Resolution aus dem Jahr 2000 folgende Berechnungsformel für den Brechungsindex von Wellengruppen vorgeschlagen wurde (veröffentlicht durch [Torge 2000]):

$$N_g = (n_g - 1) \cdot 10^6 = 287,6155 + \frac{4,88660}{\lambda^2} + \frac{0,06800}{\lambda^4}$$
(5.6)

Diese Formel gilt für Luft unter den Standardbedingungen von 0,0375% CO₂-Gehalt bei 0 °C Lufttemperatur, 1013,25 hPa Luftdruck und 0,0 hPa Partialwasserdampfdruck. Sie ist angesetzt für Wellenlängen von 650 nm bis 850 nm und entspricht damit den Anforderungen moderner elektronischer Distanzmessung.

Des Weiteren ist der Brechungsindex eine Funktion der am jeweiligen Ort vorherrschenden atmosphärischen Bedingungen. Zeitliche und räumliche Änderungen der chemischen Zusammensetzung des Mediums über den Partialdruck des Wasserdampfs e, die Temperatur T und den Luftdruck p, verändern die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Der Bezugsbrechungsindex muss also entsprechend angepasst werden und genügt somit der Beziehung

$$N_L = (n_L - 1) \cdot 10^6 = \frac{273, 15 \cdot N_g \cdot p}{1013, 25 \cdot T} - 11, 27\frac{e}{T}$$
(5.7)

Da der Brechungsindex für natürliche, in der Geodäsie relevante Medien stets größer ist als 1, folgt daraus unmittelbar eine Beschränkung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit im Produkt $s = c \cdot \Delta t$ ein längerer optischer als geometrischer, d. h. auf c_0 bezogener, Weg. Man spricht von einer optischen Verzögerung, die Einfluss auf die Distanzmessung mittels EDM hat.

Daneben führen Änderungen im Brechungsindex auch zu geometrischen Verzögerungen, da Wellen in Bereichen unterschiedlicher Dichte unterschiedlich stark gebrochen werden und sich damit nicht mehr geradlinig ausbreiten. Dieser Effekt beeinflusst nicht nur die Distanzmessung, sondern hat auch Auswirkungen auf die Richtungsmessung. Nach dem Fermatschen Prinzip gilt das Brechungsgesetz mit ε als Winkel zwischen der Bewegungsrichtung der Welle und dem Lot auf die Trennfläche unterschiedlich dichter Medien. Um im Infinitesimalen dessen Änderung $d\varepsilon$ zu bestimmen, bildet man das totale Differential in der Form

$$n_l \cos \varepsilon d\varepsilon + \sin \varepsilon dn_L = 0 \tag{5.9}$$

und erhält schließlich

$$d\varepsilon = -\frac{1}{n_L} \tan \varepsilon dn_L \tag{5.10}$$

 dn_L ließe sich aus Gleichung (5.7) bestimmen, wenn die differentiellen Änderungen über den gesamten Lichtweg bekannt wären.

Daraus ließe sich unmittelbar die Richtungsänderung berechnen, welche in der Ebene aufgespannt durch die Wellenrichtung und den Gradientenvektor von n_L liegt. Bei Messungen im Freien ist der Gradient in der Regel vertikal am stärksten ausgeprägt, sodass sich der typische Effekt der Vertikalrefraktion einstellt. Entlang von vertikalen Wärmequellen ist jedoch auch eine zunehmende Komponente der Seitenrefraktion möglich.

Refraktionseinflüsse verfälschen unmittelbar die Einstellung der Zielrichtung am Instrument. Unter Annahme örtlich konstanter Gradienten im Raum sind sie durch die Messung auf einem einzelnen Standpunkt nicht aufdeckbar, sondern müssen durch die zusätzliche Bestimmung der atmosphärischen Parameter entlang des Messwegs oder über gegenseitige Messung von Stand- und Zielpunkt aus ermittelt werden. Verschiedene Korrekturansätze, z. B. [Eschelbach 07], beschäftigen sich mit den Verbesserungen refraktionsbehafteter Messungen unter bestmöglicher Kenntnis vor allem der Temperaturverläufe. In anderen Untersuchungen, exemplarisch genannt sei [Kabashi 03], wird versucht, die Refraktion durch Messstrategien mit automatisierten Verfahren zu berücksichtigen.

Als zusätzliche Refraktionseffekte wirken auch höherfrequente, turbulente Dichteschwankungen. Diese sind nicht durch gleichmäßige atmosphärische Schichtungen verursacht, sondern eine Folge von Konvektionsströmungen oder zufälliger Bewegungen im Medium. Typische Effekte sind das Luftflimmern über heißen Oberflächen, bzw. das Flirren von in größerer Entfernung betrachteten Objekten.

Dieser Einfluss, der in der Astronomie je nach Erscheinungsbild *Seeing* oder *Szintillation* genannt wird, stellt eine gravierende Beschränkung der Messung in Kamerabildern dar. Im Einzelnen beeinträchtigt er die Ergebnisse durch

• scheinbare Positionsänderungen eines Zielpunkts

Durch zufällige Komponenten der Dichteschwankungen ändert sich der Lichtweg vom Zielpunkt zum Tachymeter. Dies führt zu veränderlichen Einfallswinkeln ins Objektiv und damit zu unterschiedlichen Abbildungspositionen auf dem Kamerachip. Da jede ausgewertete Szene einen diskreten Aufnahmezustand abbildet, ist dieser Einfluss im Einzelbild weder quantifizierbar noch korrigierbar.

Im Falle einer optischen Anzielung ist der Beobachter daher bestrebt, durch zeitliche Integration der Beobachtung den bestmöglichen Schwerpunkt der Zielabbildung einzustellen. Bei der Verwendung eines Videotachymeters kann dies durch die Auswertung mehrerer unmittelbar aufeinanderfolgender Aufnahmen versucht werden.

• scheinbare Verformungen von Zielstrukturen

Refraktionsbedingte Positionsänderungen können auch Teilbereiche der Abbildung relativ zueinander verschieben. Geometrische Strukturen, z. B. Zielkreuze, werden dadurch scheinbar im Bild verformt. Die automatische Detektion geometrischer Primitive durch Bildanalyse wird erschwert.

• Unschärfeeffekte

Sind die Fluktuationen schneller als die durchschnittliche Belichtungszeit, führt dies zu "Verschmierungen" in der Abbildung. Der Effekt ist vergleichbar der Bewegungsunschärfe in der Fotografie. Eine punktförmige Lichtquelle wird während des Belichtungsintervalls nicht nur an einer, sondern an mehreren benachbarten Stellen auf dem Kamerachip abgebildet. Umgekehrt werden durch ein einzelnes Sensorelement mehrere Zielpunkte im Objektraum überlagernd erfasst.

Das Resultat ist ein Schärfeverlust in der Abbildung: vor allem Kanten werden verwischt und kleine Strukturen können je nach relativer Helligkeit zur Umgebung verloren gehen oder aber vergrößert dargestellt werden. Im Histogramm werden lokale Extremwerte abgeschwächt, sodass Schwellwert- und Texturoperatoren beeinflusst werden.

Luftflimmern kann an durchschnittlich warmen Tagen und auch ohne besonders gefährdete Oberflächen wie Asphalt bereits ab Zielentfernungen von deutlich weniger als 100 m wahrgenommen werden. Messungen in geschlossenen Räumen sind meist weniger anfällig; ggf. lassen sich hier Quellen turbulenter Wärmegradienten wie z. B. Lüftungen oder Heizkörper erkennen und durch geeignete Gegenmaßnahmen abschwächen.

Für erste Untersuchungen der Effekte wurden verschiedene Objekte in unterschiedlichen Entfernungen unter dem Einfluss deutlich sichtbarer Refraktion unter konstanter Fernrohrausrichtung mehrmals in Folge aufgenommen. Mittels Matching-Algorithmen wurden Templates im ersten Bild erstellt, die dann in den übrigen Bildern zugeordnet werden sollten oder Schwellwertalgorithmen für die Zielzuordnung benutzt. Die folgenden Beispiele decken unterschiedliche Abbildungsszenarien ab.

5.3.5.1 Abhängigkeit von der Modellgröße und natürliche Modelle





Abb. 5.19: Modell für ein Kantenmatching an einem Felsen in 20 m Entfernung und Detailausschnitt

Abb.5.19 links zeigt einen Felsen in einem Abstand von knapp 20 m. Die Tiefenstrukturen sind voneinander und vom Hintergrund nur schwer zu trennen und daher nicht geeignet für ein kantenbasiertes Matching. Verwendet werden können Einschlüsse und Flechtenbewuchs, die als helle bzw. dunkle Bereiche detektierbar sind. Die Kantensuche für das Template wurde folglich auf diese Bereiche reduziert. Das Modell selbst ist stark fragmentiert, da die gefundenen Kanten analytisch nicht beschreibbar sind.

Bild	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Drehung [mgon]	Score [%]
	$\Delta Hz \ [mgon]$	$\Delta V [mgon]$		
1	1133,840	847,572	0,00	99,46
	0,00	0,00		
2	1133,350	847,053	$16,\!25$	$96,\!16$
	0,31	0,31		
3	1132,890	847,084	$6,\!88$	97,07
	$0,\!59$	0,28		
4	1133,640	847,490	-27,59	96,03
	0,12	$0,\!05$		

Tab. 5.2: Matchingergebnisse unter Refraktionseinfluss des Felsens aus Abb.5.19 links in mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmen

Bild	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Drehung [mgon]	Score [%]
	$\Delta Hz [mgon]$	$\Delta V [mgon]$		
1	1098,370	931,723	0,00	98,83
	0,00	0,00		
2	1097,730	931,202	3,82	97,96
	0,40	0,31		
3	$1097,\!360$	931,347	-23,23	$98,\!37$
	$0,\!62$	0,21		
4	$1096,\!510$	930,868	-23,16	97,81
	1,16	0,49		

Tab. 5.3: Matchingergebnisse unter Refraktionseinfluss des Details aus Abb.5.19 rechts

Der Matching-Algorithmus liefert als Resultat den Schwerpunkt des Kantenmodells (umrechenbar in Tachymeterrichtungen), die Verdrehung des Modells im Bild sowie einen Vollständigkeitswert (Score), der über die Anzahl der tatsächlich zuordenbaren Templatepixel Auskunft gibt.

Obwohl die Refraktionseinflüsse zwischen den Aufnahmen mit bloßem Auge deutlich sichtbar sind, liefert das Matching zuverlässige Resultate mit Abweichungen < 1 mgon (Tab.5.2). Die Standardabweichung aus dem Mittel aller vier Messungen liegt sogar nur im Bereich weniger $\frac{\text{mgon}}{10}$. Die maximal auftretende Templateverkantung bewirkt in der Bildecke einen Einfluss von < 0,70 Pixel; in Templatemitte ist deren Einfluss also vernachlässigbar.

Verwendet man nur ein einzelnes Detail, z. B. die Flechte aus Abb.5.19 rechts, so sind prozentual mehr zugeordnete Modellpunkte zu erwarten (Tab. 5.3). Durch die kleinere Stichprobe sinkt jedoch die Wiederholgenauigkeit auf Werte von > 1 mgon und etwa die doppelte Standardabweichung.

Dieser Effekt ist durch zufällige Refraktionseffekte erklärbar. Kleine Einzelbereiche unterliegen geringfügigen Verschiebungen bzw. Verzerrungen zwischen zwei Aufnahmen, welche sich über eine größere Bildfläche weitgehend aufheben. Zur Vermeidung von refraktiv bedingten Fehlern bei der Zielpunktschätzung sollte das Modell also eine gewisse Mindestausdehnung nicht unterschreiten, sodass nicht alle Pixel eines Objekts dieselbe lokalsystematische Verschiebung erfahren. Bei der Generierung von Modellen für natürliche Objekte aus atmosphärisch beeinflussten Bildern ist – gerade bei kleineren Objekten und größeren Entfernungen – Vorsicht geboten. Es besteht die Gefahr, dass nur ein geringer Teil der Modellinformation tatsächlich dem Objekt, ein großer Teil aber Störkanten und Rauschen geschuldet ist. Ohne Vorsegmentierung auf Grauwertbasis ist z.B. in Abb.5.19 kein brauchbares Modell ableitbar.

5.3.5.2 Farbinformation und synthetische Modelle mit Skalierung



Abb. 5.20: Synthetische HDS-Zielmarke als Matching-Prototyp (links) und überlagerte Verteilung der Matchingergebnisse in mehreren Bildern (rechts)

Einfacher ist die Modellerstellung bei künstlichen Markierungen wie den HDS-Zielmarken. Hier ist man nicht auf die Auswertung von Templatebildern angewiesen, sondern kann die Formgebung geometrisch beschreibbar erstellen. In diesem Fall sind jedoch zumindest eine geringfügige Rotation und eine Skalierung des Templates zuzulassen, um vom idealen synthetischen Modell geringfügig abweichende Erscheinungsformen zuverlässig handhaben zu können.

Ein Beispiel für ein wiederholtes Matching mit einem synthetischen Template unter identischer Tachymeterausrichtung zeigt Abb. 5.20. Das Ziel befindet sich in 133 m Entfernung und weist im Bild noch eine Ausdehnung von etwa 120 Pixeln auf. Das geometrische Modell wurde daher mit diesen Dimensionen erzeugt, um den Maßstab nahe an 1 zu halten.

Messungen wurden sowohl im Farbbild (Tab. 5.4) als auch im Grauwertbild (Tab. 5.5) durchgeführt. Die verwendeten Matching-Algorithmen sind so strukturiert, dass sie in RGB- und Grauwertbildern streng mathematisch dieselben Genauigkeiten erzeugen [MVTec 08]. Durch die notwendige Interpolation des Bayer-Gitters auf die Farbkanäle kann es jedoch, verstärkt durch die Verwischungseffekte der Konvektion, zu erhöhten Ungenauigkeiten in Farbbildern kommen.

Beide Reihen zeigen vergleichbare Resultate mit Abweichungen bis zu knapp 2 mgon und einer Standardabweichung von ca. 0,7 mgon, wobei die Zuordnung selbst mit hoher Zuverlässigkeit erfolgt. Die schlechtere Wiederholgenauigkeit im Vergleich zur Felsen-Testreihe begründet sich durch die mehr als sechsmal so große Entfernung und das kleine Zieltemplate, wodurch die Einflüsse der Konvektion verstärkt werden. Bei ungünstigen Bedingungen muss in Einzelmessungen dementsprechend mit noch größeren mittleren Abweichungen gerechnet werden, die über ± 2 mgon liegen können. Als Beispiel zeigt Abb.5.21 einen mit Matchingalgorithmen getrackten Punkt einer Brücke in etwa 100 m

Bild	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Drehung [gon]	Maßstab	Score [%]
	$\Delta Hz [mgon]$	$\Delta V [mgon]$			
1	952,047	1262,370	-1,7077	0,949408	93,93
	0,00	0,00			
2	$950,\!532$	1263,080	-1,5792	0,928669	94,28
	0,92	-0,46			
3	950,122	$1262,\!540$	-2,1326	0,924028	94,69
	1,18	-0,14			
4	952,321	1262,210	-3,0885	0,919857	94,42
	-0,17	0,10			
5	$951,\!695$	1262,770	-2,2136	0,946204	94,35
	0,21	-0,25			

 Tab. 5.4: Matchingergebnisse der HDS-Zielmarke unter Refraktionseinfluss mit synthetischem Modell (Abb.5.20)

 im Farbbild

Bild	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Drehung [gon]	Maßstab	Score [%]
	$\Delta Hz [mgon]$	$\Delta V [mgon]$			
1	946,394	1262,010	-2,6560	0,916134	$95,\!35$
	0,00	0,00			
2	945,768	1261,710	-2,6565	0,933523	$95,\!14$
	0,39	$0,\!17$			
3	943,273	1260,320	-2,6026	0,894886	$95,\!53$
	1,94	$0,\!98$			
4	943,224	1260,430	-2,1476	0,932424	95,34
	1,97	0,91			
5	944,289	1261,500	-2,4515	0,946967	$95,\!57$
	1,30	0,28			

 Tab. 5.5: Matchingergebnisse der HDS-Zielmarke unter Refraktionseinfluss mit synthetischem Modell (Abb.5.20)

 im Grauwertbild

Entfernung längs des Mittleren Rings in München. Die aufsteigenden Autoabgase über dem sonnenbeschienenen Asphalt führen zu deutlichen Zielpunktfluktuationen, die nur durch Mittelung einer Vielzahl von Einzelmessungen über einen längeren Zeitraum zuverlässig in den Griff zu bekommen sind.

Synthetische Modelle werden stärker als natürliche durch scheinbare Verformungen beeinflusst, welche die beschriebene Zielpunktgeometrie verfälschen. Als Folge daraus kann es beim Matching leicht zu Rotationen kommen. Um den Modellschwerpunkt stabil zu halten, sind für künstliche Modelle daher symmetrische Strukturen zu bevorzugen.

Da das Ziel nominell in jedem Bild einer zeitlich eng aufeinanderfolgenden Serie in derselben Größe erscheinen muss, lässt sich über die Schätzung des Template-Maßstabs auch die Größenverzerrung durch die Refraktion aufdecken. Sie beträgt etwa 5 % zwischen den einzelnen Vergleichsaufnahmen und damit bezogen auf das synthetische Modell knapp 6 Pixel. Dieser Wert kann als Vergleichsmaß für



Abb. 5.21: Trackingmessung eines Matchingpunktes über einer stark befahrenen Straße in ca. 100 m Entfernung



Abb. 5.22: IR-Blobs und die zugeordnete Fläche

die Einflussstärke der Refraktion zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei gleichbleibender Zielentfernung herangezogen werden (vgl. Abschnitt 5.3.5.4).

5.3.5.3 Schwellwertalgorithmen

Objekte, die sich durch ihren Grauwert von der Umgebung abgrenzen, lassen sich auch ohne Matching durch einfache Schwellwertbildung auffinden. Ein Beispiel ist die Infrarot-Diode aus Abb.5.14. In ca. 70 m Entfernung erscheint sie mit einem Durchmesser von 36 Pixeln zwar klein, aber noch deutlich sichtbar.

Schwellwertoperatoren werden durch refraktionsbedingte Verschmierungen beeinflusst, welche die Ränder des Blobs im Grauwert unscharf erscheinen lassen. Luftwirbel variieren zudem die Umrissfigur. Die Auswertung ist in diesem Beispiel sowohl schwerpunktbasiert als auch bezogen auf einen ausgleichenden Kreis durch die Blob-Grenze möglich (Tabelle 5.6), wobei letztere Lösung bei lokal einseitig beeinflussten, d. h. "eingedellt" aussehenden Strukturen, vorzuziehen ist. Die Abweichungen in Fläche bzw. Radius liegen wie bei der HDS-Zieltafel bei 4–6 %; die Abweichungen der einzelnen Zielpunktrichtungen betragen bis zu 1 mgon.

Bei Schwellwertoperatoren können zum Mitteln von Refraktionseffekten mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen addiert und anschließend nur die Grauwertsumme segmentiert werden. Dieses Vorgehen spart Rechenzeit im Vergleich zu Matchingverfahren, bei denen separate Auswertungen für jedes Einzelbild nötig sind. Allerdings geht dabei die Möglichkeit verloren, eine Aussage über die Wiederholgenauigkeit der Einzelmessung zu treffen.

	Blob-Fläche			ausgl. Kreis		
Bild	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Fläche	Spalte [Pixel]	Reihe [Pixel]	Radius [Pixel]
	$\Delta Hz [mgon]$	$\Delta V [mgon]$		$\Delta Hz [mgon]$	$\Delta V [mgon]$	
1	762,54	1137,41	1020,5	762,39	1137,32	18,197
	0,00	0,00		0,09	0,05	
2	762,14	1136,67	985,0	762,65	1136,73	17,953
	0,26	0,45		-0,06	0,42	
3	761,54	1137,58	960,5	761,48	1137,67	17,472
	0,61	-0,12		$0,\!65$	-0,18	
4	760,92	1136,47	987,0	761,21	1136,53	17,868
	1,01	$0,\!55$		0,83	0,52	
5	762,71	1136,86	959,5	$762,\!25$	1136,81	17,711
	-0,09	0,34		0,19	0,36	

Tab. 5.6: Schwerpunktsuche der IR-Diode in den Abbildungen 5.22

5.3.5.4 Referenzziele

Den negativen Auswirkungen meteorologischer Effekte auf tachymetrische Richtungsmessungen, insbesondere aus Kamerabildern, kann mittels eines geeigneten Referenzziels teilweise begegnet werden. Dazu ist eine eindeutige Zielmarkierung im Stabilbereich zu wählen, deren Lage und Orientierung gegenüber der IATS als konstant angenommen werden kann. Der Zielstrahlverlauf zum Referenzziel muss den entsprechenden Messwegen zu den Objektpunkten hinsichtlich überquerter Oberfläche, Sonneneinstrahlung, Länge etc. vergleichbar sein. Die Messungen zur Referenz können dann Aufschluss geben über

• die notwendige Belichtungszeit und Arbeitsparameter

Anhand eines künstlichen, unveränderlichen Zielmusters lassen sich die globale Helligkeitsverteilung und aktuelle Kontrasteigenschaften vergleichbar ableiten. Dies wird für die allgemeine Qualität der Messaufnahmen genutzt sowie für die Definition variabler Parameter z. B. der Sensitivität oder des Bezugskontrasts bei der Kantendetektion zur Laufzeit.

- den momentanen Refraktionskoeffizienten Bei bekanntem Höhenunterschied zwischen Tachymeter und Referenzziel lässt sich der Refraktionskoeffizient direkt ermitteln. Ist der Absolutwert nicht bekannt, kann über die Änderung zum Vergleichswert die Änderung des Refraktionskoeffizienten gegenüber dem Zeitpunkt der Vergleichsmessung bestimmt werden.
- den aktuellen Einfluss der Konvektion Durch mehrere Vergleichsmessungen lässt sich die zu erwartende Streuung samt ihrer Standardabweichung bestimmen. Über den so gewonnenen Wert kann dann wiederum die notwendige Anzahl von Einzelmessungen zu den Objektpunkten abgeschätzt werden, um eine gegebene Genauigkeitsforderung einhalten zu können.

In der Praxis sind geeignete Referenzzielpositionen nur schwer zu finden, da gerade bodennahe Konvektionsströmungen lokal stark differierende und zeitlich variable Auswirkungen haben. Dies trifft insbesondere zu, wenn Stabil- und Objektbereich nicht benachbart sind und damit nur schwer vergleichbare Strukturen aufweisen. Abhilfe kann hier ggf. geschaffen werden, indem gutmütige Ziele innerhalb der Objektpunkte ausgewertet und die Resultate auf die schwieriger zu detektierenden Objektpunkte übertragen werden.

5.4 Fokusmotor

Die Position der Fokussierlinse entlang des optischen Wegs wird durch die Encoderposition des Schrittmotors relativ zum integrierten Endschalter als Referenzposition beschrieben. Die Kalibrierparameter für unterschiedliche Fokusstellungen beziehen sich damit ebenfalls auf die Encoder-Angabe. Ist die Encoder-Position ungenau oder fehlerhaft, wirkt sich dies unmittelbar auf die Abbildung von Pixel- in Richtungsinformation aus und stellt damit einen zusätzlichen Genauigkeitseinfluss dar.

Ein typenähnlicher Motor desselben Herstellers wurde von [Walser 05] bereits untersucht, sodass für diese Arbeit auf eine wiederholte Durchführung seiner Testverfahren verzichtet werden kann. Die Ergebnisse sind auch auf Elektromotoren anderer Typen übertragbar und decken generell Einschränkungen auf, die für die Anwendung als Stellmotoren bei Fokussierlinsen beachtet werden müssen. Zu berücksichtigen sind

• Variationen des Referenzpunkts

Das Anfahren des die Referenzposition kennzeichnenden Endschalters muss reproduzierbar dieselbe Positionierung der Fokussierlinse zur Folge haben. Nur in diesem Fall ist eine konstante absolute Positionierung möglich. Eine Änderung führt zu einer fehlerhaften Zuordnung der Kalibrierwerte zur jeweils aktuellen Fokuslinsenstellung über den gesamten Linsenweg. Es ist darauf zu achten, dass die Referenzposition stets aus derselben Richtung und mit identischer Geschwindigkeit angefahren wird, um ein reproduzierbares Auslöseverhalten am Endschalter zu gewährleisten.

Zusätzlich muss die Referenzposition zeitlich konstant bleiben. Dies gilt sowohl über die gesamte Lebensdauer des Instruments (zumindest jedoch zwischen zwei Kalibrierzeitpunkten) infolge von Alterung und mechanischer Beanspruchung als auch für einzelne Betriebszyklen, z. B. infolge von Aufwärmeffekten.

• Hysterese bei der Positionierung

Durch die mechanische Verbindung zwischen Motor und Fokussierlinse kommt es bei einer Richtungsumkehr zu Totgang-Effekten, d.h., es wird bereits eine Änderung der Encoderschritte und damit eine scheinbare Bewegung erfasst, obwohl die Linse noch nicht verschoben wurde. Dies führt bei der Einstellung desselben Encoderwerts von beiden Seiten zu unterschiedlichen Linsenpositionen und damit zu einem typischen Hystereseeffekt.

Das Anfahren einer Sollposition muss daher ebenfalls stets aus derselben Richtung geschehen, bevorzugt von der Seite der Referenzposition aus. Insbesondere ist zudem darauf zu achten, dass diese Richtung auch bei den Kalibriermessungen benutzt wird.

Handelsübliche Schrittmotoren weisen eine Einstellung auf, die die maximale Abweichung der tatsächlichen Positionierung vom Soll regelt. Insbesondere bei der Hysterese greift dies jedoch nicht, da sich die Zuordnung von Motorbewegung und resultierender Linsenbewegung verschiebt. [Walser 05] weist durch Kontrastmessungen einen deutlichen Einfluss in der Größenordnung von knapp 90 Encoderschritten nach. Berücksichtigt man, dass für nahe Ziele Schärfeunterschiede und damit die Einflüsse auf die Bildqualität bereits bei einer Linsenverschiebung um ca. 25 Schritte erkennbar sind, müssen oben genannte Effekte zwingend durch Steueralgorithmen minimiert werden.

Verbleibende unvermeidbare Abweichungen sind in der Regel klein (< 20 Schritte). Sie stören vor allem die Ableitung der aktuell fokussierten Entfernung im Bereich größerer Distanzen. Da in diesem

Bereich auch die Kalibrierparameter nur geringfügigen Änderungen unterliegen, sind die Auswirkungen vertretbar.

5.5 Zusammenfassung der Genauigkeitsbetrachtungen

Die in der IATS2 neu integrierte Sensorik ist in ihrem ableitbaren Genauigkeitspotential kompatibel mit dem Basistachymeter TCRA1201+. Unmittelbare Einflüsse auf elektronischer oder mechanischer Ebene liegen mit Ausnahme des erhöhten Erwärmungspotentials durch die zusätzlichen Komponenten und der davon abhängigen Richtungsmessungen, nicht vor.

Auf der Ebene der eigentlichen Messung ist weniger die Sensorik als solche zu vergleichen, sondern vielmehr die jeweils durch einen Operateur bzw. durch Messalgorithmen erreichbare Genauigkeit. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass geeignete Auswertealgorithmen im Kamerabild das Potential der Winkelmessung eines modernen Präzisionstachymeters ausreizen und bei relativer Messung oder kontrollierter, laborähnlicher Messungebung sogar deutlich überschreiten können. In den meisten Anwendungsfällen herkömmlicher Messung erzielen sie menschlichen Operateuren vergleichbare Resultate. Unter schwierigen (Regen, Schneefall, Dämmerung) oder stark veränderlichen (Refraktion, Beleuchtungsvariationen) Bedingungen hingegen muss mit verminderter Genauigkeit und Zuverlässigkeit bis hin zu Teil- oder Totalausfällen bei der Zielpunktfindung gerechnet werden. In diesen Fällen sind adaptive Bildbearbeitungs- und -auswertealgorithmen vonnöten, die intuitives menschliches Verhalten nachahmen. Dies ist design- und rechenintensiv und erfordert ein hochkomplexes Entscheidungsmodell.

Die IATS2 ist in allen Fällen als semiautomatisches Messsystem einsetzbar. Ein Operateur zielt dabei entweder selbst interaktiv am Bildschirm oder überwacht automatisch generierte Zielpunktvorschläge. Als vollkommen autonomes Messsystem ist sie zudem für Aufgaben in definierter Messumgebung, z. B. für Industrieanwendungen oder Überwachungsmessungen, geeignet (vgl. Abschnitt 6.4). Die Qualität der Ergebnisse ist dann in erster Linie abhängig von der Robustheit und Genauigkeit der Auswertealgorithmen.

6 Deformationsbestimmung

Neben der Punktaufnahme und der Absteckung, welche als bauprozessbegleitende Vermessung betrachtet werden können, stellt die Überwachungsmessung den dritten Hauptsektor der ingenieurgeodätischen Aufgaben. Es ist dies eine periodisch wiederkehrende, zeitlich und geometrisch diskrete Bestimmung eines Objekts mit dem Ziel, Änderungsraten zwischen den einzelnen Messzeitpunkten zu bestimmen. Bei ausreichend häufiger und genauer Bestimmung der Messgrößen lassen sich die Änderungsraten somit qualitativ deuten (Beschleunigung oder Verzögerung einer Änderung), Trends und Perioden ableiten [Wunderlich 06] und ggf. Gefährdungspotentiale festlegen.

Die Messgrößen der Ingenieurgeodäsie, und damit auch die gesuchten Änderungsraten, sind in der Regel geometrischer Natur. Bei der Bestimmung von Änderungen ist insbesondere Augenmerk auf deren Signifikanz zu legen. Ein aussagekräftiges Genauigkeitsmodell ist daher eine wichtige Bedingung.

Die Begriffe Überwachungsmessung und Deformationsmessung werden häufig synonym verwendet; allerdings können Deformationen nicht unmittelbar gemessen werden. Sie sind vielmehr abgeleitete Größen der Auswertung einer Überwachungsmessung, die nicht zwangsläufig auftreten müssen [Welsch et al. 00].

Überwachungsmessungen dienen der Gefahrenabwehr bzw. der Quantifizierung unvermeidbarer oder bewusst hervorgerufener Deformationen, und sind daher primär als Dienstleistung zu betrachten. Der jeweilige Messaufbau und -ablauf hat sich direkt an den Erfordernissen des Auftraggebers zu orientieren und ist ggf. im Lauf der Überwachung an Veränderungen anzupassen. Flexibel einsetzbare Messinstrumente wie die Videotachymetrie vereinfachen die Erfüllung dieser Bedingung.

Die Vorteile der Videotachymetrie können bei allen Überwachungsmessungen eingesetzt werden, bei denen nicht erreichbare bzw. mit Instrumenten nicht besetzbare Punkte im Deformationsbereich von einem oder mehreren Standpunkten im Stabilbereich aus koordiniert werden müssen. Großräumige Deformationsnetze mit jeweils gegenseitigem Beobachtungsaufbau hingegen bieten kaum Ansätze für die Verwendung bildgebender Tachymetrie.

Die Bestimmung von 1D/2D/3D-Objektpunkten von mehreren Standpunkten aus durch (überbestimmten) Vorwärtsschnitt stellt dabei eine Fortführung der Messprinzipien von ECDS-Systemen oder der photogrammetrischen Stereobildauswertung dar. Idealerweise finden korrespondierende Messungen zeitgleich mit mehreren Instrumenten statt, wobei eines davon Steuerungsfunktionen übernimmt. Es ist jedoch auch möglich, identische Punkte als Templates in einem Zielspeicher zu hinterlegen und mit nur einem Instrument nacheinander die Standpunkte zu besetzen. Die jeweils erreichbaren Genauigkeiten sind abhängig von den Messbedingungen und der Schnittkonfiguration und in der ingenieurgeodätischen sowie der photogrammetrischen Literatur beschrieben (z. B. [Möser et al. 00], [Luhmann 03]).

Die klassische Konfiguration eines Permanent-Monitoringsystems schließlich sieht lediglich ein fest installiertes Tachymeter vor, von dem aus durch regelmäßige Polarpunktbestimmung unabhängige, einzelne Objektpunkte koordiniert werden. Hier liegt keine Überbestimmung vor; es ist jedoch möglich, durch mehrere Zielpunkte auf demselben starren Objekt die Positionsänderung des Gesamtobjekts redundant zu schätzen. Videotachymetrie bietet dabei die Möglichkeit, eine Vielzahl homologer Punkte zwischen den Epochen ohne weitere Signalisierung zu nutzen.

6.1 Charakterisierung von Deformationen

Die Deformation eines Objekts zeigt sich dadurch, dass eine Gruppe von Objektpunkten ihre relative Lage zu einer anderen, unbewegten Gruppe von Punkten (auf demselben Objekt oder außerhalb des Objekts) ändert. Diese geometrische Änderung kann durch einen Transformationsansatz zwischen den Beobachtungsepochen beschrieben werden. Je nach Art unterscheidet man dabei verschiedene Grundtypen von Deformationen:

• Starrkörperbewegung

Ein starrer Körper ist ein idealisiertes Objekt, das keinen inneren Verformungen unterworfen ist. Alle Objektpunkte behalten bei einer Deformation ihre relative Lage zueinander; ein einziges Transformationsmodell besitzt Gültigkeit für alle Punkte des Objekts. Der freie starre Körper besitzt die sechs Freiheitsgrade einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation ohne Maßstab – drei Translationen und drei Rotationen im kartesischen Bezugssystem.

• Nicht-ähnliche Verformung

Gruppen von Objektpunkten ändern bei einer Deformation ihre relative Lage zueinander. Kommt es zu Dehnungen und Scherungen des Gesamtobjekts, so sind diese in Analogie der entsprechenden Größen einer 3D-Affintransformation (Verschiebungsgradient) durch neun Parameter des Greenschen Verzerrungstensors beschreibbar [Ettemeyer et al.]. Biegungen und Torsionen führen zu geometrischen Lageänderungen entlang von Biege- bzw. Torsionslinien in Abhängigkeit des jeweiligen Biege- bzw. Torsionswinkels. Sie folgen Differentialgleichungen und sind daher nicht unmittelbar durch herkömmliche geodätische Transformationsansätze beschreibbar.

• Selbstähnliche Verformung

Alle Objektpunkte ändern bei einer Deformation ihre relative Lage zueinander im selben Verhältnis. Dies entspricht einer reinen Maßstabsänderung, und damit dem einzigen nicht freien Parameter einer Ähnlichkeitstransformation bei der Starrkörperbewegung.

In der Realität tritt häufig die Überlagerung von verschiedenen Deformationstypen auf. In der Regel ist es in diesen Fällen äußerst schwierig, die einzelnen Anteile ohne zusätzliche Kenntnisse bzw. Restriktionen zu trennen. Für definierte Aufgabenstellungen kann jedoch meist die Art erwarteter bzw. kritischer Deformationen im Vorfeld angegeben und das Messsystem entsprechend ausgelegt werden (z. B. Wölbung einer Staumauer unter Staulast). Für den Einsatz der Videotachymetrie in der Deformationsmessung ist daher zu prüfen, für welche Objektbewegungen er sich zur Detektion eignet.

6.2 Abbildung von Deformationen im Kamerabild

Bei der Verwendung des reinen Kamerabilds einer IATS zur Detektion von Deformationen kommt es stets zum bekannten Informationsverlust durch die Reduktion der abgebildeten 3D-Szene auf die 2D-Bildebene. Beliebige Bewegungsabläufe des beobachteten Objekts werden folglich auf Positionsänderungen seiner Punkte im Kamerabild reduziert. Stellt man vorerst nur die Grundbedingung auf, für eine Dimensionierung der Bewegungen zumindest eine Strecke im Bild als Maßstab nutzen zu können, so stellt sich die Aufgabe, aus der Richtung der Änderungsvektoren die auslösende Objektbewegung zu rekonstruieren. Dieses Vorgehen ist der verlustbehafteten Umkehrung einer der Grundaufgaben moderner Computeranimation gleichzusetzen, bei der räumliche Objekte während determinierter Bewegungsabläufe für beliebige Kamerapositionen verebnet werden (vgl. z. B. [Foley et al. 05]).

Auf lediglich einem Bildsensor basierende Systeme sind ohne zusätzliche Hilfsmittel nicht in der Lage, den Abbildungsdefekt zu beheben. [Luhmann 05] entwickelte dazu z. B. einen Aufsatz-Strahlteiler, der über Spiegel mit definierter Basis zwei Abbildungen einer Szene auf je einer Hälfte des Kamerachips

darstellt und ist so in der Lage, über Passpunkte die räumliche Lage von Objektpunkten ableiten zu können.

Mittels reflektorloser Distanzmessung besitzt die Videotachymetrie ebenfalls die Möglichkeit, den Projektionsdefekt zu beheben. Dies führt dabei unmittelbar auf eine geometrische Diskretisierung des beobachteten Objekts in Einzelpunkte mit 3D-Koordinaten und entspricht damit dem herkömmlichen Ansatz eines deformierbaren Punktfelds.

Nicht für alle Zielpunkte ist jedoch eine Distanzmessung möglich bzw. gewünscht. Gewisse Deformationen sind zudem über eine reine Bildmessung zuverlässig, vollständig und zudem schneller aufdeckbar; manche Deformationen eines Punktfelds können vollständig abgeleitet werden, indem 2D- und 3D-Messungen kombiniert werden. Die oben genannten Grundtypen werden daher hinsichtlich ihrer Abbildungseigenschaften untersucht.

6.2.1 Translationen

In einem gemeinsamen kartesischen Koordinatensystem weise die Zielachse der IATS den Richtungsvektor $\vec{z} = (z_x | z_y | z_z)^T = (0 | 0 | 1)^T$ auf, für die Translation gelte der Richtungsvektor $\vec{t} = (t_x | t_y | t_z)^T$. Dieses kamerabezogene System lässt sich leicht durch Rotation um die Teilkreisablesungen aus dem übergeordneten kartesischen System ableiten.

Der räumliche Winkel zwischen Beobachtungs- und Bewegungsrichtung bestimmt sich somit aus dem Kreuzprodukt und sein Sinus

$$\sin \alpha = \frac{|\vec{z} \times \vec{t}|}{|\vec{z}| \cdot |\vec{t}|} \tag{6.1}$$

entspricht (bei Annahme einer schwach perspektivischen Projektion) dem in die Bildebene projizierten Anteil des Translationsvektors. Für $\sin \alpha = 1$ (Translationsvektor senkrecht auf der Zielachse) ist entsprechend die gesamte Bewegung im Bild sichtbar; für $\sin \alpha = 0$ (Translationsvektor parallel zur Zielachse) ist die Bewegung nicht aufdeckbar. Überlagert wird der abgebildete Anteil durch eine scheinbare Seitwärtskomponente, die für Punkte außerhalb der Zielachse durch die Zentralprojektion verursacht wird. Eine Objektzielung im Schwerpunkt minimiert diesen Einfluss.

Die unbekannte Komponente in Zielachsrichtung kann entweder über Distanzmessung vor und nach der Translation abgeleitet werden oder aus der a priori-Kenntnis über den Bewegungsablauf (z. B. rein vertikale Messung einer Brückensetzung). Theoretisch besteht durch die perspektivische Abbildung zudem die Möglichkeit, den Anteil der t_z -Komponente mittels der Strahlensatzgleichungen über eine Maßstabsänderung eines aus mehreren Punkten gebildeten Objekts zu bestimmen. Ein entsprechender Versuch mit einer in ca. 12 m Entfernung befindlichen Zieltafel mit klaren Kanten wurde im Labor durchgeführt. Die Größe des Objekts im Bild betrug etwa 700 × 700 Pixel, und die Standardabweichung eines aus mehreren aufeinanderfolgenden Bildern bestimmten Maßstabs lag bei ca. 20 ppm. Parallel dazu wurden die tatsächlichen Verschiebungsbeträge in Zielachsrichtung gemessen. Die Abweichungen sind in Abb.6.1 aufgetragen. Sie betragen in diesem Fall bis zu 3 mm, was einem absoluten Maßstabsfehler von 250 ppm im Bild entspricht. Auswertungen der Aufnahmen des ca. 20 m entfernten und weitgehend bildfüllenden Felsens aus Abb.5.19 zeigen Abweichungen bis zu 7 mm.

Während Matching-Algorithmen sehr robust den Schwerpunkt eines Objekts und damit dessen Richtung ermitteln, weisen die detektierten Maßstäbe deutlich höhere absolute Abweichungen auf. Bei größeren Zielweiten (über 15 m), deutlichem Refraktionseinfluss, verändertem Schattenwurf oder kleinen Zielobjekten ist ihre Bestimmung naturgemäß limitiert. Für das Turmkreuz der Abb.4.9 ergeben sich z. B. scheinbare Entfernungsänderungen von bis zu 10 m.



Abb. 6.1: Entfernungsschätzung aus Abbildungsmaßstab

Die erzielbare Genauigkeit der Translationsbestimmung im Bild lässt sich durch Fehlerfortpflanzung aus den Kollinearitätsgleichungen 3.12 einfach herleiten. Unter Berücksichtigung der verwendeten Größen der Kamerakalibrierung ergeben sich

$$\Delta(X - X_0) = \Delta m \cdot (x \cos \kappa - y \sin \kappa) + (m + \Delta m) \cdot (\Delta x \cos \kappa - \Delta y \sin \kappa)$$

$$\Delta(Y - Y_0) = \Delta m \cdot (x \sin \kappa + y \cos \kappa) + (m + \Delta m) \cdot (\Delta x \sin \kappa - \Delta y \cos \kappa)$$

$$\Delta(Z - Z_0) = \Delta m \cdot c$$
(6.2)

und daraus, bei Verwendung der Kalibrierergebnisse aus Abschnitt 3.2 und einer angenommenen Messgenauigkeit im Bild von 0,1 Pixel, für Bewegungen rechtwinklig zum Zielstrahl Standardabweichungen von $< 0, 2 \cdot m$ Meter, wobei m der Abbildungsmaßstab in $\left[\frac{m}{\text{Pixel}}\right]$ ist. Diese Rechnung führt – begründet in den etwas pessimistischen Annahmen – zu einem geringfügig schlechteren Resultat als die empirischen Untersuchungen des Auflösungsvermögens in Abschnitt 5.3.1.

Die Standardabweichung der Maßstäbe der Abb.6.1 vom jeweiligen Soll beträgt 117 ppm. Schätzt man die t_z -Komponente mit, so ergeben sich für das genannte Beispiel und 5 mm Verschiebeweg Standardabweichungen senkrecht zur Zielachsrichtung von $< 20 \ \mu$ m und in Zielachsrichtung von 1,375 mm.

Unter kontrollierten Bedingungen und für den Nahbereich kann die Schätzung des Maßstabs folglich zur Unterstützung herangezogen werden, wobei dessen Genauigkeitspotential gegenüber der subpixelgenauen Messung seitlicher Translationen im Bild aber wie gesehen um zwei Größenordnungen zurückfällt.

Bei mehreren, flächenhaft ausgeprägten Zielpunkten im Bild ist unter den genannten Einschränkungen auch eine Abschätzung von relativen Entfernungsänderungen in Aufnahmerichtung möglich. Dies gilt insbesondere, wenn einige Punkte als unbewegte Referenzmarkierungen vorausgesetzt werden können, und ihre Maßstabsänderung zwischen zwei Epochen auf tatsächlich bewegte Punkte als globaler zufälliger Anteil verbessernd berücksichtigt werden kann.

Besitzt man zusätzliche Informationen, die die möglichen Translationsrichtungen einschränken, können diese ebenfalls genutzt werden, um den vollständigen Translationsvektor aus dem abgebildeten Anteil zu rekonstruieren. Dies ist z.B. der Fall, wenn sich der Zielpunkt innerhalb einer Ebene bewegen muss.



Abb. 6.2: Die Rotationsachse **a** als Schnitt der streckenhalbierenden Ebenen zwischen Punktepaaren vor und nach der Rotation

6.2.2 Rotationen

Die Rotation eines starren Körpers ist definiert durch die Rotationsachse $\mathbf{a} : A + \lambda \cdot \vec{a}$ mit Aufpunkt $A = (x_A | y_A | z_A)^T$ und normiertem Richtungsvektor $\vec{a} = (a_x | a_y | a_z)^T$ sowie den mathematisch positiven Rotationswinkel φ . Durch je ein Punktepaar vor und nach der Rotation, die jeweils eine zu \mathbf{a} windschiefe Gerade definieren, lässt sich im \mathbb{R}^3 die Rotationsachse eindeutig festlegen: es ist dies der Schnitt der streckenhalbierenden Ebenen (Abb.6.2). Auch eine Translation ist so als Rotation um einen Fernpunkt definierbar.

Als kartesisches Gleichungssystem wird die Drehung um eine beliebige Raumachse durch Kombination verschiedener Translations- und Rotationsschritte erzeugt (vgl. [Hildenbrand 08] u.a.). Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} x' &= r_{11}(x - x_A) + r_{12}(y - y_A) + r_{13}(z - z_A) + x_A \\ y' &= r_{21}(x - x_A) + r_{22}(y - y_A) + r_{23}(z - z_A) + y_A \\ z' &= r_{31}(x - x_A) + r_{32}(y - y_A) + r_{33}(z - z_A) + z_A \end{aligned}$$
(6.3)

mit der Rotationsmatrix

$$R = \begin{bmatrix} a_x^2(1 - \cos\varphi) + \cos\varphi & a_x a_y(1 - \cos\varphi) - a_z \sin\varphi & a_x a_z(1 - \cos\varphi) + a_y \sin\varphi \\ a_x a_y(1 - \cos\varphi) + a_z \sin\varphi & a_y^2(1 - \cos\varphi) + \cos\varphi & a_y a_z(1 - \cos\varphi) - a_x \sin\varphi \\ a_x a_z(1 - \cos\varphi) - a_y \sin\varphi & a_y a_z(1 - \cos\varphi) + a_x \sin\varphi & a_z^2(1 - \cos\varphi) + \cos\varphi \end{bmatrix}$$
(6.4)

Mittels der Teilkreisablesungen lässt sich die Rotationsachse wieder in ein kamerafestes System transformieren. Die Rotation eines Punktfeldes führt somit zu individuellen Verschiebungsvektoren jedes



Abb. 6.3: Projektion der Rotationsspur als Ellipse aus schiefem Kegelschnitt

einzelnen Punktes, deren Längen zu ihren Abständen von der Rotationsachse proportional sind. Im Kamerabild werden analog zu Gleichung 6.1 wieder nur die Anteile senkrecht zur Zielachse abgebildet, also idealerweise bei einer Rotationsachse parallel zur Zielachse. Bei kleinen Rotationswinkeln liegen die Unterschiede der Verschiebungsrichtungen nicht im signifikanten Bereich, sodass Translations- und Rotationsanteile nicht getrennt werden können.

Da ein rotiertes Objekt sein Aussehen im Bild verändert, ist eine Schätzung der Tiefenänderung einzelner Punkte über eine Maßstabsbestimmung nicht möglich. Die vollständige Schätzung der Rotationsparameter durch Ausgleichung des Systems (6.3) gelingt folglich nur mit zusätzlichen Entfernungsmessungen in beiden Epochen.

Für praktische Anwendungen können jedoch die Rotationsachse und die Radien zu detektierbaren Punkten manchmal im Vorfeld angegeben werden, z. B. bei der vermuteten Kippung eines Objekts (Felsblocks) über eine Kante oder bei einem künstlichen, drehbar gelagerten Objekt. Die räumliche Bewegungsspur der Zielpunkte wird dann in die Bildebene in Abhängigkeit vom Rotationsbetrag als Teil einer Ellipse (allgemein als Teil eines schiefen Kegelschnitts) abgebildet [Fucke et al. 07], welche analytisch eindeutig beschreibbar ist. In der Projektion sind Ausrichtung und Betrag ihrer Halbachsen abhängig vom Raumwinkel τ , den die Zielachse zum Rotationszentrum und die Rotationsachse einschließen (vgl. Abb.6.3). Die große Halbachse *a* liegt mit dem Betrag des vollen Rotationsradius senkrecht zu beiden, die kleine Halbachse *b* liegt in der gemeinsamen Ebene und erscheint mit den Kosinus des eingeschlossenen Winkels verkürzt.

Ist die mittlere Punktentfernung und damit der Bildmaßstab genähert bekannt, genügt somit der (x, y)-Anteil zur Ableitung des unbekannten Winkels gegenüber der großen Halbachse aus der



Abb. 6.4: Projektion der Rotationsspur bei Rotationsachse senkrecht zur Zielachse

Polargleichung der Ellipse, und als Differenz zweier Epochen folgt der jeweilige Rotationswert:

$$d^{2} = \frac{b^{2}}{1 - \varepsilon^{2} \cos^{2} \varphi} \quad \text{mit} \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{a^{2} - b^{2}}}{a}$$
(6.5)

Dieser Ansatz kann für die Praxis auch umgekehrt werden, indem aus den bekannten Rotationsbedingungen für beliebig feine Rotationswinkel die entsprechende Projektion ins Kamerabild vorausberechnet und in einer Lookup-Tabelle gespeichert wird. Durch Messung der Bildkoordinaten bzw. ihrer entsprechenden Teilkreiswerte kann damit die zugehörige Rotation rechenzeitsparend direkt aus der Tabelle interpoliert werden.

Gleichung (6.5) versagt im Extremfall einer auf der Rotationsachse senkrechten Ziellinie, da dann die projizierte Ellipse zu einer Linie zusammenfällt. In diesem Fall liegen alle Bewegungsvektoren auf einer Geraden senkrecht zur projizierten Rotationsachse. Setzt man in diesem Fall wieder die Näherung einer schwach perspektivischen Projektion an, so gilt mit d_1 als Abstand eines Punktes von der Rotationsachse vor und mit d_2 nach der Rotation für den Rotationswinkel φ mit Radius r

$$\varphi = \arccos \frac{d_2}{r} - \arccos \frac{d_1}{r} \tag{6.6}$$

Abb.6.4 zeigt ein Beispiel mit zur Stehachse des Tachymeters in SP paralleler Rotationsachse A im Grundriss. In der Bildebene B bewegt sich der Objektpunkt zwischen den Epochen von O_1 nach O_2 und resultiert im Beispiel in einem Vektor in x-Richtung.

Nicht alle Rotationen sind in diesem Fall detektierbar, da der Objektpunkt für je zwei unterschiedliche Rotationswinkel auf demselben Abbildungsstrahl liegen kann. Für $d_i \rightarrow r$ sind zudem die Abstandsänderungen von der Rotationsachse nur unscharf bestimmt.

Zur Untersuchung der Rotationsbestimmung bei bekannter Rotationsachse wurden vier Zielmarkierungen an einem Sekundentheodolit mit Stehachse in 9,753 m Entfernung angebracht. Die Markierungen wurden für verschiedene definierte Drehwinkel des Theodolit-Horizontalkreises automatisch erfasst und analog oben genanntem Beispiel ausgewertet. Die absoluten Abweichungen liegen bei den Rotationsschritten von bis zu einem Gon im Bereich von wenigen 10er mgon, darüber hinaus proportional höher bei unter 2 % der Gesamtdrehung. (vgl. Abb.6.5) Diese Abweichungen sind hauptsächlich auf die nur



Abb. 6.5: Abweichungen der im Bild bestimmten Rotationen von den Sollwerten

millimetergenau bekannten Radialabstände der Messpunkte von der Rotationsachse und auf die Näherung durch die schwach perspektivische Projektion zurückzuführen. Während der erstgenannte Einfluss stärker bei Punkten nah der Drehachse (wie in diesem Fall) zur Geltung kommt, wirkt sich der zweitgenannte vor allem bei großen Rotationshebeln und den damit verbundenen starken Tiefenänderungen aus. Die Standardabweichungen der aus den einzelnen Zielmarken bestimmten Rotationsbeträgen liegen im mgon-Bereich mit Zunahme auf Zehntel gon für die größeren Beträge.

Die Bestimmung von Rotationsbeträgen bei bekannter Rotationsachse kann zur Näherung herangezogen werden. Unter kontrollierten Bedingungen ist es möglich, kleinere Rotationen mit Genauigkeiten von einigen mgon zu detektieren. Größere Beträge im gon- und 10er-gon-Bereich können zumindest quantitativ abgeschätzt werden. Durch den Abbildungsdefekt ist eine präzise Ableitung der Drehungen jedoch im Allgemeinfall nur mit Hilfe zusätzlicher Entfernungsmessungen aus 3D-Koordinaten möglich. Steht die Rotationsachse senkrecht auf der Bildebene, so ergibt sich die Ausnahme, dass die Rotation vollständig bestimmt werden kann.

6.2.3 Dehnungen und Scherungen

Dehnungen (bzw. Stauchungen) und Scherungen beschreiben die innere Änderung einer Objektgeometrie zwischen zwei Messepochen. Spaltet man den translatorischen Anteil der Deformation ab, so erhält man für einen dreidimensionalen Objektkörper in Erweiterung von [Welsch et al. 00] die formale Deformationsmatrix

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{yx} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{zx} & f_{zy} & f_{xz} \end{bmatrix} = \mathbf{R} + \mathbf{E}$$
(6.7)

Dabei beschreiben die Hauptdiagonalelemente die Maßstäbe (Dehnungen) relativ zur Ausgangsepoche, die Nebendiagonalelemente die Scherwinkel der jeweiligen erstindizierten Achse gegenüber der zweitindizierten über ihre Tangens. Die Deformationsmatrix kann weiter unterteilt werden in die verbliebenen Rotationsanteile der Starrkörperbewegung \mathbf{R} sowie die eigentliche Verzerrungsmatrix (Verzerrungstensor) \mathbf{E} . Im Regelfall betrachtet man nur kleine Verformungen in lokal begrenzten Gebieten, sodass die Größen in

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 \end{bmatrix}$$
(6.8)

und

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix}$$
(6.9)

als infinitesimal zu betrachten sind und folglich getrennt voneinander behandelt werden können.

Dreidimensionale Dehnungen und Scherungen sind durch Messung von einem einzelnen Kamerastandpunkt aus nicht bestimmbar. Wegen der Vielzahl der möglichen Freiheitsgrade und der gleichzeitigen Abhängigkeiten der einzelnen Deformationsbeträge von allen diesen Größen können hier auch stützende Restriktionen für den Verformungsablauf nicht berücksichtigt werden. Beschränkt man die Deformation auf eine (beliebig gelagerte) 2D-Ebene, ist hingegen die vollständige Verzerrungsmatrix aus dem Bild ableitbar, solange die Ebenennormale nicht senkrecht auf der Zielachse steht. In diesem Fall können die Achsen der jeweiligen Deformationsebene direkt auf die Bildachsen transformiert werden.

Solche ebenen affinen Verzerrungen treten z.B. ein, wenn sich Oberflächenelemente (an Bauwerken oder ebenen Flächen) in Folge von äußeren Krafteinflüssen oder Deformationen der tragenden Konstruktionen planparallel verformen. Dies trifft beispielsweise auch auf einseitige Setzungen von Fassaden zu, kann also bei gleichmäßig strukturierten Gebäuden (Glasfassaden) elementweise zur Deformationsmessung in der Vertikalebene herangezogen werden. Dieser Ansatz wird in den Arbeiten von [Lehmann u. Reiterer 08] und [Miljanović 08] verwendet.

6.2.4 Biegungen und Torsionen

Die Biegeverformung v(x) entlang eines idealisierten Trägers (elastische Verformung bei ebenen Querschnitten) bei einem Biegemoment M_b unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit als konstantem Produkt $E \cdot I$ aus Elastizitätsmodul und Flächenträgheitsmoment wird beschrieben durch eine Differentialgleichung 2. Ordnung (siehe [Dankert u. Dankert 94]):

$$\frac{v''}{(1+v'^2)^{3/2}} = -\frac{M_b}{EI} \tag{6.10}$$

Da die Durchbiegungen oft sehr klein sind, gilt dies insbesondere für das Quadrat ihrer Ableitungen, die daher ohne großen Fehler gegen 1 vernachlässigt werden dürfen. Für kleine Verformungen erhält man so

$$EIv'' = -M_b \tag{6.11}$$

Das Aussehen der Biegekurve ist in der Folge abhängig von der Art des Biegemoments (welches selbst eine Funktion von x ist, da es mit dem Abstand vom Aufbringungspunkt der Kraft linear veränderlich ist) und der Nebenbedingungen zur Lösung der Integrationskonstanten (in den Auflagern). Die analytische Beschreibung entspricht daher einer Polynomialfunktion in Abhängigkeit von der Position entlang des Trägers. In der Praxis betrachtet man oft nicht die Durchbiegung eines Objekts aus homogenem Material sondern aus Materialverbünden mit herstellungsbedingten Imperfektionen, sodass die mit hoher Genauigkeit ausgeführte empirische Messung zur Bestimmung der tatsächlichen Biegelinie gegenüber der theoretischen Ableitung von Vorteil ist.



Abb. 6.6: Auf zwei Punkten gelagerter Metallstab ohne Belastung (oben), mit 10kg Belastung (Mitte) und die gemessene Durchbiegung (unten)
Meist ist die (beliebig im Raum gelagerte) Ebene, in der eine Biegeverformung stattfindet, bekannt (z. B. Vertikalebene) und somit zuverlässig mittels reiner Bildmessung bei bekanntem Maßstab erfassbar. Die Normale auf die Verformungsebene sollte dabei wieder möglichst parallel der Zielachsrichtung sein.

Die Abbildungen 6.6 zeigen einen Laborversuch zum Nachweis von Biegedeformationen. Ein Metallstab liegt frei auf zwei Auflagern in 1,11 m gegenseitiger Entfernung. Das Tachymeter schließt mit der Normalen auf die Biegeebene einen Winkel von ca. 16,5 gon ein, steht also etwas seitlich versetzt. Zur Maßstabsgewinnung sind die Auflager mit Zielmarkierungen versehen, zu denen Schrägdistanzen von 12,816 m bzw. 12,540 m bestimmt wurden. In der Nullmessung ist der Stab unbelastet; für die Biegungsmessung wurde er in der Mitte mit einem 10 kg-Gewicht versehen. Aufgrund seiner Länge ist der Metallstab nicht auf einer einzelnen Aufnahme abbildbar; ein Mosaik aus vier Bildern ist notwendig. Da die Deformationsebene durch die beiden Passpunkte und die Vertikalrichtung eindeutig festgelegt ist, kann in jedem Einzelbild unmittelbar der abgebildete Teil des Metallstabs durch Kantendetektion extrahiert und ausgewertet werden. Insgesamt konnten die Kanten auf einer Länge von 1,08 m detektiert werden. Die Darstellung der Höhenkomponente (Deformation) erfolgt trotz des seitlichen Blickwinkels unmittelbar projiziert in die Biegeebene.

Durch die hohe Redundanz der Messung (1 Messwert pro Pixel entlang der Stablänge) ist eine sehr präzise Schätzung des ausgleichenden Polynoms der Biegekurve möglich, welches dann unmittelbar mit der theoretischen Biegelinie aus bekannten Materialparametern verglichen werden kann. Die Schwankungen benachbarter Einzelmessungen liegen im Bereich < 0,1 mm; dies bestätigt die bereits nachgewiesene hohe Messauflösung im Kamerabild. Dasselbe gilt für die Bereiche der Stoßstellen zwischen den einzelnen Bildern. Hier zeigt sich einer der großen Vorteile eines Videotachymeter-Systems gegenüber einer fest installierten Messkamera: Neuausrichtungen der Kamera sind ohne signifikante Beeinträchtigung der Genauigkeit möglich und erlauben so das kombinierte Messen ausgedehnter Objekte in einem Gesamtverbund.

Bei der Verformung durch Torsion gilt für den relativen Verdrehwinkel $\Delta \varphi$ zweier Endquerschnitte eines Bereichs der Länge l mit konstantem Torsionsmoment M_t bei konstanter Torsionssteifigkeit als Produkt $G \cdot I$ aus Schubmodul und Flächenträgheitsmoment die Beziehung [Dankert u. Dankert 94]

$$\Delta \varphi = \frac{M_t l}{GI} \tag{6.12}$$

Daraus ergibt sich ein linearer Zusammenhang des Verformungswinkels von der Position entlang der Torsionsachse.

Da eine Torsion nicht mit einer Verformung des Objektumrisses verbunden ist, ist sie mittels Messung im Kamerabild nur mit Hilfe von Zielmarkierungen bzw. bekannten Texturen möglich. Zusätzlich muss die Lage der Torsionsachse bezüglich der texturierten Oberfläche sowie deren analytische Form bekannt sein. Für jeden Messpunkt lässt sich dann analog der Rotationsbestimmung aus Abschnitt 6.2.2 ihr Rotationsbetrag und daraus die Torsion ableiten. Dieses Verfahren ist jedoch aufwendig und unterliegt den genannten Genauigkeitsbeschränkungen, wenn auch die Verdrehungen bei Torsionserscheinungen in der Regel sehr klein sind.

Für die Praxis hat die Bestimmung von direkten Torsionsverformungen untergeordnete Bedeutung; sie werden mit bekannten Verformungsmodellen aus diskreten 3D-Punktmessungen rückgerechnet. Ihre Messung im Kamerabild ist somit theoretisch möglich, aber unpraktikabel.

Die Bestimmung von Biegelinien aus Kamerabildern bei bekanntem Maßstab und bekannter Biegeebene ist mit hoher Genauigkeit möglich. Voraussetzung ist dabei, dass das deformierte Objekt detektierbare Kanten bzw. Textur entlang der Biegung aufweist. Durch die hohe Redundanz ist auch der Ausfall einzelner Kantenstücke ohne Schwierigkeiten kompensierbar. Die Messung ist ebenso für ausgedehnte Objekte möglich, welche nur über die Aneinanderreihung mehrerer Bilder vollständig erfasst werden können.

Die Bestimmung von Torsionen aus Kamerabildern ist möglich, aber meist nicht praktikabel. Die Torsionsachse sollte in jedem Fall möglichst senkrecht auf der Zielachse des Tachymeters stehen.

6.2.5 Maßstabsänderungen

Die Maßstabsänderung als selbstähnliche Verformung (wie sie z. B. einer Ballonhülle beim Aufblasen widerfährt) kann in der Zentralperspektive nicht von einer Translation in Zielachsrichtung unterschieden werden. Es ist folglich eine Vorinformation über das Verformungsmodell notwendig. Zur Maßstabsbestimmung können beliebige, jedoch eindeutige, Objektteile benutzt werden, indem sie im Rahmen eines Matchings auf Größenänderungen oder auf relative Abstandsänderungen im Bild untersucht werden. Die im Abschnitt 6.2.1 angeführten Genauigkeitsbetrachtungen und Einschränkungen gelten hierfür analog.

Im Nahbereich unter kontrollierten Bedingungen gelingt die Maßstabsschätzung in der Regel auf wenige 10er ppm genau. Unter Refraktionseinfluss und auf größere Distanzen zeigen sich dagegen scheinbare Maßstabsänderungen von 5 % und mehr auch ohne tatsächliche Deformation. In jedem Fall ist die gemittelte Auswertung einer größeren Anzahl von Einzelaufnahmen unbedingt zu empfehlen.

6.3 Kombination von 3D- und 2D-Messungen

Die Integration von Bildinformationen in die Auswertung eines gemessenen Punktfeldes wird bisher vor allem im Bereich der Photogrammetrie, insbesondere der Nahbereichsphotogrammetrie, und dem Laserscanning angewandt. Fest auf Laserscannern aufgesetzte Kameras ermöglichen einen hybriden Ausgleich bei bekannter gegenseitiger äußerer Orientierung [Ullrich et al. 03]. In einem Ansatz von [Schneider 07] werden die Daten der baulich nicht verbundenen Komponenten Laserscanner, Panoramaund zentralperspektivischer Kamera von unterschiedlichen Standpunkten in einer gemeinsamen Ausgleichung zusammengefügt. Durch unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Sensoren wird dabei ein ausgewogenes stochastisches Modell erreicht. [Al-Manasir u. Fraser 06] verwenden Matchingverfahren, um über identische, codierte Punkte Punktwolken unterschiedlicher Standpunkte automatisch zu registrieren. Eine Zuordnung von Bildpixeln zu Richtungsinformationen des Scanners ermöglicht auch hier die Kombination.

Gemeinsam ist den bisher vorhandenen Kombinationsverfahren, dass feste Zielpunkte verwendet werden, um mittels hybridem räumlichen Rückwärtsschnitt bzw. freier Stationierung durch Ausgleichung Messungen unterschiedlicher Aufnahmestandpunkte in einem gemeinsamen System zu fusionieren. Der umgekehrte Weg – ein einzelner, stabiler Messstandpunkt und bewegte Zielpunkte – wird bisher mit kameragestützten Systemen ohne Fixausrichtung nicht beschritten. Diese Lücke kann mit Hilfe von Videotachymetern geschlossen werden.

Der übliche Ansatz einer geodätischen Deformationsmessung ist die Untersuchung eines (beliebig ausgedehnten) Punktfeldes auf signifikante Koordinatenänderungen. Dazu werden Messanordnungen basierend auf als stabil vorausgesetzten Punkten aufgebaut und in den möglicherweise bewegten Bereich fortgesetzt. Die Anlage von Netzen dient dabei der Redundanz und damit der Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung; es ist jedoch auch eine Deformationsanalyse ausschließlich auf Grundlage von polar angehängten, redundanzfreien Punkten möglich. Der Datumsdefekt eines tachymetrisch gemessenen Raumnetzes beträgt vier (drei Translationen und die Rotation um die z-Achse) und kann durch Verfügung über den Gerätestandpunkt und eine Orientierungsrichtung behoben werden. Die Bestimmung von Polarpunkten mittels Videotachymetrie bietet – neben dem möglichen Verzicht auf Signalisierung – keine besonderen messtechnischen Vorteile. Es wird mit Unterstützung der reflektorlosen Distanzmessung genau die notwendige Anzahl an Messelementen bestimmt, um die Zielpunkte eindeutig festlegen zu können.

Die Ableitung von Deformationen aus Koordinatenänderungen zwischen zwei Epochen resultiert in einem diskreten Punktfeld mit jeweils einem zugeordneten Translationsvektor. Eine qualitative Aussage über die Punktgruppen kann dabei nur durch Kombination der Einzelbeobachtungen gewonnen werden. Basis ist die Ausgangshypothese, nach der alle Punkte einer Gruppe sich auch tatsächlich aufgrund derselben Wirkung und demselben Modell aus Abschnitt 6.1 folgend bewegen. Dabei ist durchaus möglich, dass unterschiedliche Punktgruppen einer Gesamtmenge unterschiedlichen Bewegungsmodellen folgen, z. B. wenn sich an einem Rutschhang Massenpunkte in der Hangmitte deutlich schneller talwärts bewegen als an den Rutschungsgrenzen oder das Absinken eines Bauwerkteils das seitliche Verschieben eines anderen verursacht.

Das jeweils gewählte Deformationsmodell entspricht einer Vorschrift, mit deren Hilfe die Koordinaten der Zielepoche einer Funktion der Koordinaten der Ausgangsepoche sowie zusätzlicher modellbeschreibender Parameter zugeordnet werden. Die abgeleiteten Parameter sind dann üblicherweise das Ergebnis einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Verbesserungsquadrate. Mittels der entstehenden Restklaffungen lassen sich so die Zulässigkeit des angesetzten Deformationsmodells sowie die Zugehörigkeit einzelner Punkte zur Deformationsgruppe prüfen.

Da die Anzahl der zu schätzenden Modellparameter unabhängig von der Punkteanzahl in der Gruppe ist, weist das Gesamtmodell auch bei lediglich polar bestimmten Einzelpunkten Redundanz auf. Bei ausreichender Anzahl von Punkten ist es also möglich, auf einzelne Messelemente zu verzichten, ohne das Resultat unzulässig zu verfälschen. Im Zusammenhang mit der Videotachymetrie betrifft dies gewinnbringend vor allem den Verzicht auf Streckenmessungen, da Richtungsinformationen im Gegensatz zu diesen sehr schnell und teilweise simultan (direkt aus einem Bild) gewonnen werden können. Dies gilt vor allem auch bei Zielpunkten, auf die eine reflektorlose Distanzmessung nicht oder nur schwer möglich ist, z. B. weil der Messstrahl zu stark gestreut oder gespiegelt wird oder der Zielpunkt zu klein für eine Messung ist (Zielspitze).

6.3.1 Videotachymetrie bei der 3D-Ähnlichkeitstransformation

Das am häufigsten genutzte Deformationsmodell ist die bereits genannte Ähnlichkeitstransformation mit sieben Parametern **p**. Sie ist geeignet für ein in sich starres Punktfeld (Bewegung eines nicht plastisch deformierbaren Objekts), wird jedoch auch bei fehlender Vorkenntnis über die Bewegungsursache als erster Ansatz verwendet. Die geodätischen Grundlagen der Ähnlichkeitstransformation als linearer Transformation im kartesischen Koordinatensystem sind in zahlreichen Veröffentlichung beschrieben (z. B. [Welsch et al. 00], [Luhmann 03], [Heck 95], [Wunderlich 03]) und werden deshalb hier nur für die weitere Verwendung zusammengestellt.

Es gilt

$$\mathbf{x_2} = f(\mathbf{p}, \mathbf{x_1}) = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + m \cdot \mathbf{R}(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) \cdot \mathbf{x_1}$$
(6.13)

mit der Rotationsmatrix

$$\mathbf{R}(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z) = \mathbf{R}(\varepsilon_z)\mathbf{R}(\varepsilon_y)\mathbf{R}(\varepsilon_x) = \\ = \begin{pmatrix} \cos\varepsilon_y \cos\varepsilon_z & \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \cos\varepsilon_z - \cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_z & \cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \cos\varepsilon_z + \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_z \\ \cos\varepsilon_y \sin\varepsilon_z & \sin\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \sin\varepsilon_z + \cos\varepsilon_x \cos\varepsilon_z & \cos\varepsilon_x \sin\varepsilon_y \sin\varepsilon_z - \sin\varepsilon_x \cos\varepsilon_z \\ -\sin\varepsilon_y & \sin\varepsilon_x \cos\varepsilon_y & \cos\varepsilon_x \cos\varepsilon_y \end{pmatrix}$$
(6.14)

in einem geodätischen Linkssystem mit positiven Drehwinkeln im Uhrzeigersinn. Bewegungen zwischen zwei zeitlich nah beieinander liegenden Epochen sind üblicherweise klein; dies gilt insbesondere für die Rotationsbeträge. Mit den üblichen Vereinfachungen $\cos \varepsilon = 1$ und $\sin \varepsilon = \varepsilon$ sowie $m \cdot \varepsilon = \varepsilon$ gilt dann

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & m & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$
(6.15)

als lineares System bezüglich der Transformationsparameter. Beide Gleichungssysteme sind unter Verwendung von mindestens sieben homologen Koordinatenpaaren aus beiden Epochen lösbar.

Im Tachymeterbild bestimmte Zielpunktkoordinaten können direkt in Richtungsinformationen umgewandelt werden. Damit wird der Übergang vom Bildsystem ins Tachymetersystem hergestellt, sodass diese gemessenen Richtungen unmittelbar als zusätzliche Beobachtungen für die Bestimmung der Parameter der Ähnlichkeitstransformation genutzt werden können.

Ausgangspunkt der Transformation sei ein vollständiger Koordinatensatz $\mathbf{X}_{1}^{\mathbf{n}}$ für *n* Punkte in der 1. Epoche. Alle Ziele $\mathbf{X}_{2}^{\mathbf{n}}$ mit Streckenmessung in der 2. Epoche gelten als Vollpasspunkte (VPP), sodass für sie jeweils drei Gleichungen nach (6.13) oder direkt mittels $(Hz, V, D)_{i}^{n} = f(\mathbf{p}, \mathbf{x}_{i}^{n})$ angesetzt werden können. Punkte mit lediglich Richtungsmessung (RPP) führen zu je zwei zusätzlichen Gleichungen als Funktionen der Transformationsparameter und der bekannten Koordinaten der 1. Epoche. Unter der Voraussetzung kleiner Rotationswinkel gilt

$$Hz = \arctan \frac{y_2 - y_S}{x_2 - x_S} = \arctan \frac{y_0 + \varepsilon_z x_1 + my_1 - \varepsilon_x z_1 - y_S}{x_0 + mx_1 - \varepsilon_z y_1 + \varepsilon_y z_1 - x_S}$$
(6.16)

$$V = \arccos \frac{z_2 - z_S}{\sqrt{(x_2 - x_S)^2 + (y_2 - y_S)^2 + (z_2 - z_S)^2}} = = \arccos \frac{z_0 - \varepsilon_y x_1 + \varepsilon_x y_1 + m z_1 - z_S}{D}$$
(6.17)

$$D = \sqrt{\frac{(y_0 + \varepsilon_z x_1 + my_1 - \varepsilon_x z_1 - y_S)^2 + (x_0 + mx_1 - \varepsilon_z y_1 + \varepsilon_y z_1 - x_S)^2 + (z_0 - \varepsilon_y x_1 + \varepsilon_x y_1 + mz_1 - z_S)^2}$$
(6.18)

 $S(y_S, x_S, z_S)^T$ ist dabei der Tachymeterstandpunkt.

Hinsichtlich der Ableitungen zur Linearisierung des Gleichungssystems und des Aufstellens der Designmatrix sei auf Anhang A.3 verwiesen. Die Verwendung großer Drehwinkel ist durch Einsetzen der Beziehungen aus 6.13 ebenfalls möglich; im Rahmen üblicher Deformationsbeträge ist sie jedoch nur von marginaler Bedeutung.

Sind zusätzliche Bedingungsgleichungen bekannt, z. B. konstante Raumdistanzen zwischen zwei Punkten, können diese ebenfalls in das Modell integriert werden. Bei bekannten Bewegungsrestriktionen kann zudem auf das Schätzen einzelner Parameter verzichtet werden; im Fall von Festkörperbewegungen z. B. üblicherweise auf den Maßstab, in dessen Standardabweichung sich Spannungen zwischen Strecken- und Richtungsinformationen jedoch bevorzugt zeigen. Um einen möglichst allgemeinen Ansatz zu wählen, werden im Beispiel alle Parameter genutzt.



Abb. 6.7: Aus Kartonagen erstelltes 3D-Objekt mit acht verteilten Messmarken.

Zur Validierung des kombinierten Ansatzes wurde ein Objekt mit guter räumlicher Punktverteilung mit der IATS in zwei Epochen automatisch gemessen (Abb.6.7). Stationierung und Orientierung der IATS können dabei als konstant vorausgesetzt werden. Die Messung erfolgte in zwei Lagen und im Nahbereich, sodass zwischen den einzelnen Anzielungen deutliches Umfokussieren notwendig war.

Wie in Abschnitt 5.3 gezeigt, ist die Genauigkeit der Bildmessung unter kontrollierten Umgebungsbedingungen der Teilkreisgenauigkeit des Basistachymeters überlegen. Für die Versuchsmessungen mit motorisiertem Tachymeter kann deshalb für das stochastische Modell mit der Richtungsgenauigkeit des Tachymeters $\sigma_{Hz,V}=0,3$ mgon gerechnet werden. Die Streckengenauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung wird absolut mit $\sigma_s=2$ mm angesetzt; da die Epochen in kurzen Abständen bestimmt wurden, kann jedoch relativ betrachtet eine bessere Genauigkeit erwartet werden. Die Schätzung des Varianzfaktors a posteriori erlaubt im vorliegenden Fall eine Erhöhung des Genauigkeitsansatzes auf $\sigma_s=1$ mm.

6.3.1.1 Konfigurationen mit reduzierter Distanzanzahl

Ist die Berechnung der Transformationsparameter deutlich überbestimmt, kann ggf. auf einzelne Messelemente verzichtet werden, ohne die Ergebnisse signifikant zu verändern. Dies kann zum einen den Verzicht auf vollständige Passpunktpaare bedeuten, zum anderen können jedoch auch lediglich einzelne, schwer oder nur ungenau bestimmbare Messgrößen unberücksichtigt bleiben. Bei polarer Messung, vor allem im Nahbereich, betrifft dies in erster Linie die Streckenmessung. Umgekehrt besteht bei Konfigurationen mit nur wenigen geeigneten Passpunkten die Möglichkeit, durch zusätzliche reine Richtungspunkte die vorhandene Redundanz zu erhöhen und die Bestimmung der Transformationsgrößen damit zusätzlich zu stützen. Im Folgenden soll der Einfluss von Richtungsmessungen auf die Transformationsergebnisse näher untersucht werden.

a)	VPP	Para	meter	Std.Abw.	signifikant?
/	$1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8$	x_0 -0.0716		0,0024	ja
	RPP	y_0	0,1746	0,0025	ja
	keine	z_0	0,0060	0,0025	ja
		ε_x	-0,0179	0,0267	nein
	$\hat{\sigma}_0^2 = 0,720$	ε_{u}	0,1000	0,0266	ja
	r = 17	ε_z	-2,6191	0,0424	ja
		$\tilde{m-1}$	-0,0003	0,0005	nein
b)	VPP	Para	meter	Std.Abw.	signifikant?
	$3\ 4\ 5\ 6\ 7\ 8$	x_0	-0,0740	0,0013	ja
	RPP	y_0	$0,\!1755$	0,0008	ja
	1 2	z_0	0,0096	0,0014	ja
		ε_x	-0,0447	0,0125	ja
	$\hat{\sigma}_{0}^{2} = 0,363$	ε_y	$0,\!1356$	0,0173	ja
	r = 15	ε_z	$-2,\!6553$	0,0166	ja
		m-1	0,0002	0,0002	nein
c)	VPP	Para	meter	Std.Abw.	signifikant?
	347	x_0	-0,0728	0,0003	ja
	RPP	y_0	0,1777	0,0002	ja
	568	z_0	0,0025	0,0003	ja
	_	ε_x	-0,0397	0,0033	ja
	$\hat{\sigma}_{0}^{2} = 0,350$	ε_y	0,0225	0,0048	ja
	r = 8	ε_z	-2,6395	0,0032	ja
		m - 1	-0,0008	0,0001	ja
				,	_
d)	VPP	Para	meter	Std.Abw.	signifikant?
d)	VPP 4	Para x_0	meter -0,0736	Std.Abw. 0,0021	signifikant? ja
d)	VPP 4 RPP	Para x_0 y_0	meter -0,0736 0,1773	Std.Abw. 0,0021 0,0023	signifikant? ja ja
d)	VPP 4 RPP 1235678	Para x_0 y_0 z_0	meter -0,0736 0,1773 0,0077	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032	signifikant? ja ja ja
d)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8	Para x_{0} y_{0} z_{0} ε_{x}	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351	signifikant? ja ja ja nein
d)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105, 183$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0363	signifikant? ja ja nein ja
d)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105, 183$ r = 10	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365	signifikant? ja ja nein ja ja
d)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105,183$ r = 10	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ -0,0436 \\ 0,1096 \\ -2,6646 \\ -0,0002 \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein
d) e)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105, 183$ r = 10 VPP	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0365 0,0013 Std.Abw.	signifikant? ja ja nein ja ja nein signifikant?
d) e)	VPP 4 RPP $1 2 3 5 6 7 8$ $\hat{\sigma}_0^2 = 105,183$ $r = 10$ VPP 4 DPD	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter -0,0711 0,1726	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002	signifikant? ja ja nein ja ja nein signifikant? ja
d) e)	VPP 4 RPP $1 2 3 5 6 7 8$ $\hat{\sigma}_0^2 = 105,183$ $r = 10$ VPP 4 RPP $2 6 8$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ \hline -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ \hline -0,0436 \\ 0,1096 \\ \hline -2,6646 \\ \hline -0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0003 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0002	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja
d) e)	$VPP \\ 4 \\ RPP \\ 1 2 3 5 6 7 8 \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105,183 \\ r = 10 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 4 \\ RPP \\ 2 6 8 \\ VPP \\ 2 7 8 \\ VP$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter -0,0711 0,1726 0,0098 0,0231	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003	signifikant? ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja
d) e)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105, 183$ r = 10 VPP 4 RPP 2 6 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 0.617$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \end{array}$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter -0,0711 0,1726 0,0098 -0,0331 0,1515	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0003 0,0003 0,0033	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja
d) e)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105,183$ r = 10 VPP 4 RPP 2 6 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 0,617$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ \hline -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ \hline -0,0436 \\ 0,1096 \\ \hline -2,6646 \\ \hline -0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ \hline -0,0331 \\ 0,1515 \\ 2,6025 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0033 0,0041 0,0025	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja
d) e)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ \cdots \\ 1 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ \hline -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ \hline -0,0436 \\ 0,1096 \\ \hline -2,6646 \\ \hline -0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ \hline -0,0331 \\ 0,1515 \\ \hline -2,6025 \\ 0,0002 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,00041 0,0035 0,0001	signifikant? ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \hline \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \\ \hline \text{VPP} \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ \hline -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ \hline -0,0436 \\ 0,1096 \\ \hline -2,6646 \\ \hline -0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ \hline -0,0331 \\ 0,1515 \\ \hline -2,6025 \\ 0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0035 0,0041 0,0001	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105,183$ r = 10 VPP 4 RPP 2 6 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 0,617$ r = 2 VPP 1	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ -0,0436 \\ 0,1096 \\ -2,6646 \\ -0,0002 \\ \text{meter} \\ \hline 0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ -0,0331 \\ 0,1515 \\ -2,6025 \\ 0,0002 \\ \text{meter} \\ \hline 0,0747 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0035 0,0001 Std.Abw.	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \\ \text{VPP} \\ 1 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ w_0 \\ \varepsilon_z \\ w_0 \\ w$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ \hline -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ \hline -0,0436 \\ 0,1096 \\ \hline -2,6646 \\ \hline -0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ \hline -0,0331 \\ 0,1515 \\ \hline -2,6025 \\ 0,0002 \\ \hline \text{meter} \\ \hline -0,0747 \\ 0,1934 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0001 Std.Abw. 0,00057 0,0072	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	VPP 4 RPP 1 2 3 5 6 7 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 105, 183$ r = 10 VPP 4 RPP 2 6 8 $\hat{\sigma}_0^2 = 0, 617$ r = 2 VPP 1 RPP 2 3 4	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ c_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ c_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \ \ \text{Para} \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ -0,0436 \\ 0,1096 \\ -2,6646 \\ -0,0002 \\ \text{meter} \\ \hline 0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ -0,0331 \\ 0,1515 \\ -2,6025 \\ 0,0002 \\ \text{meter} \\ \hline -0,0747 \\ 0,1934 \\ 0,0604 \\ \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0035 0,00041 0,0035 0,0001 Std.Abw. 0,0057 0,0072 0,0148	signifikant? ja ja ja nein ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 1 \\ \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 3 \ 4 \\ \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_0 \\ \varepsilon$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter -0,0711 0,1726 0,0098 -0,0331 0,1515 -2,6025 0,0002 meter -0,0747 0,1934 0,0604 -0,5833	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,00041 0,0035 0,0001 Std.Abw. 0,0057 0,0072 0,0148 0,1527	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \\ \text{VPP} \\ 1 \\ \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 3 \ 4 \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 37, 620 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \hline x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ \hline x_0 \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ -0,0436 \\ 0,1096 \\ -2,6646 \\ -0,0002 \\ \hline \\ \text{meter} \\ \hline \\ -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ -0,0331 \\ 0,1515 \\ -2,6025 \\ 0,0002 \\ \hline \\ \text{meter} \\ \hline \\ -0,0747 \\ 0,1934 \\ 0,0604 \\ -0,5833 \\ 0,6280 \\ \hline \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0001 Std.Abw. 0,00057 0,0072 0,0148 0,1527 0,1552	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 1 \\ \\ \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 3 \ 4 \\ \\ \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 37, 620 \\ r = 2 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon$	$\begin{array}{c} \text{meter} \\ -0,0736 \\ 0,1773 \\ 0,0077 \\ -0,0436 \\ 0,1096 \\ -2,6646 \\ -0,0002 \\ \hline \\ \text{meter} \\ \hline \\ -0,0711 \\ 0,1726 \\ 0,0098 \\ -0,0331 \\ 0,1515 \\ -2,6025 \\ 0,0002 \\ \hline \\ \text{meter} \\ \hline \\ -0,0747 \\ 0,1934 \\ 0,0604 \\ -0,5833 \\ 0,6280 \\ -2,8309 \\ \hline \end{array}$	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0002 0,0003 0,0003 0,00041 0,0035 0,0001 Std.Abw. 0,0057 0,0072 0,0148 0,1527 0,1552 0,1105	signifikant? ja ja ja nein ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja
d) e) f)	$\begin{array}{c} \text{VPP} \\ 4 \\ \text{RPP} \\ 1 \ 2 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 105, 183 \\ r = 10 \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 4 \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 6 \ 8 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 0, 617 \\ r = 2 \\ \\ \hline \\ \text{VPP} \\ 1 \\ \\ \\ \text{RPP} \\ 2 \ 3 \ 4 \\ \\ \hat{\sigma}_0^2 = 37, 620 \\ r = 2 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ x_0 \\ m-1 \\ \hline \text{Para} \\ m-1 \\ \hline \ \ \text{Para} \\ m-1 \\ \hline \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$	meter -0,0736 0,1773 0,0077 -0,0436 0,1096 -2,6646 -0,0002 meter -0,0711 0,1726 0,0098 -0,0331 0,1515 -2,6025 0,0002 meter -0,0747 0,1934 0,0604 -0,5833 0,6280 -2,8309 -0,0004	Std.Abw. 0,0021 0,0023 0,0032 0,0351 0,0363 0,0365 0,0013 Std.Abw. 0,0002 0,0002 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0003 0,0001 Std.Abw. 0,00072 0,0072 0,0148 0,1527 0,1552 0,1105 0,0008	signifikant? ja ja ja nein ja ja nein signifikant? ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja ja

Tab. 6.1: Geschätzte Parameter in [m],[gon] bei unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen



Abb. 6.8: Restklaffungen bei unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen, 200 fach (a-e) bzw. 50 fach (f) überhöht

Für beide Epochen wurden die Koordinaten aller Punkte durch polares Anhängen als Referenzwerte bestimmt. Bei vollständiger Nutzung als Passpunkte führt dies auf einen Basissatz an Transformationsparametern mit Restklaffungen von ca. 1 mm (Punkte 1 und 2) bzw. unter 1 mm (Punkte 3 bis 8). Die Rotation um die x-Achse und der Maßstab wurden als nicht signifikant ermittelt, für die folgenden Untersuchungen jedoch weiterhin mitgeschätzt, um Änderungen in allen Parametern beurteilen zu können.

Einen ersten Anhaltspunkt auf Schwachpunkte der Messung gibt das Restklaffungsbild 6.8a. Die Punkte 1 und 2 weisen größere Lageklaffungen in bzw. entgegengesetzt der Tachymeterrichtung auf, sodass hier der Verdacht auf etwas schlechtere Distanzmessungen in einer der Epochen naheliegt. Sowohl das Weglassen der Punkte wie auch ihre Einstufung als RPP verändern das Restklaffungsbild nicht entscheidend, halbieren jedoch die Standardabweichungen der Parameter (Abb.6.8b und Tab.6.1). Eine weitere Reduktion von Beobachtungen erlaubt die selektive Auswahl weitgehend spannungsfreier Messgrößen, sodass für die jeweils vorliegende Messung eine hinsichtlich der Verbesserungsquadrate ideale Passpunktkonfiguration gewählt werden kann (Abb.6.8c).

Da die reinen Richtungsinformationen aus den Kamerabildern jedoch für die Messplanung genutzt werden sollen und die Punkte größerer Restklaffungen durch zufällige Messungenauigkeiten zustande kommen sowie insbesondere von Messung zu Messung variieren, ist ein allgemeines Design der Beobachtungsanordnung notwendig. Umfangreiche Auswertungen unterschiedlicher Datenreihen zeigen, dass bei ausreichend großer Punktzahl (sechs und mehr) ein einziger VPP aus dem Schwerpunktbereich der Punktgruppe genügt, um Resultate vergleichbar der Basiskonfiguration zu erzielen (Abb.6.8d). Sorgt man für eine gute Verteilung der verbleibenden RPP, können diese ohne feststellbare Einbußen weiter reduziert werden (Abb.6.8e).

Im Beispiel wurde der Punkt 4 als VPP gewählt, weil er in der Basiskonfiguration ebenfalls eine vergleichsweise große Klaffung aufweist und gezeigt werden soll, dass diese keinen signifikanten Einfluss ausübt. Vergleichbare Resultate erhält man auch mit einem der Punkte 3, 5 oder 6 als VPP. Die Ähnlichkeit zur vollen Konfiguration ist augenfällig. Wählt man den VPP aus den Randbereichen, muss man bei großer RPP-Zahl mit einer deutlichen Steigerung der Restklaffungen (Faktor 2–3) rechnen, bei zusätzlicher ungünstiger RPP-Verteilung sogar mit deutlich fehlerhaften Resultaten (Abb.6.8f). Die Reduktion der Unbekannten um die in der Basiskonfiguration nicht signifikanten Parameter führt zu vergleichbaren Ergebnissen.

Führt man als zusätzliche Bedingung eine oder mehrere bekannte Sollstrecken zwischen Messpunkten des Starrkörpers in die Ausgleichung mit ein, kann letztlich auf eine Streckenmessung vollständig verzichtet werden. Das Videotachymeter kann auf diese Weise analog einer mit hochgenauen Richtungsabgriffen versehenen Schwenk-Neige-Kamera direkt zur Ableitung der deformationsbeschreibenden Parameter aus den Bildmessungen verwendet werden.

6.3.1.2 Genauigkeitsbetrachtungen

In der Bewertung der Konfigurationen der Abb.6.8 wurden die Restklaffungen herangezogen, nicht die jeweiligen Standardabweichungen der ermittelten Parameter. Diese sollen in der Folge kurz diskutiert werden.

Liegen Beobachtungen für eine Ausgleichung ohne deutliche systematische oder grobe Fehler vor, so ist der Varianzfaktor der Gewichtseinheit a posteriori

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{r} \tag{6.19}$$

ein Maß für die Zulässigkeit der a priori angenommenen Beobachtungsgenauigkeiten. Er legt das Genauigkeitsniveau der Ausgleichung fest, und ermöglicht zusammen mit der Kofaktormatrix

$$Q_{xx} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \tag{6.20}$$

eine Aussage über die Genauigkeit der geschätzten Unbekannten. Q_{xx} beschreibt dabei ausschließlich die gewichtete funktionale Fehlerfortpflanzung der angesetzten relativen Beobachtungsgenauigkeiten und ist folglich ein konstanter Anteil. Dies bedeutet insbesondere, dass der Anteil Q_{xx} durch den zunehmenden Verzicht auf ungenauere Streckenmessungen unter Beibehaltung der Richtungsinformationen eine immer höhere Genauigkeit der Unbekannten allein aus dem Funktionalmodell bewirkt. Die Varianz $\hat{\sigma}_0^2$ dagegen ist von der gewichteten Quadratsumme der Zuschläge zu den Beobachtungen und damit unmittelbar von der Vereinbarkeit der tatsächlich beobachteten Größen mit dem funktionalen Modell abhängig. Unterscheidet sie sich signifikant von der a priori angenommenen Varianz der Gewichtseinheit von 1, so sind die Gewichtungen **P** und damit die getroffenen Aussagen über die Beobachtungsgenauigkeiten entsprechend zu ändern. Aussagekräftig ist die Bestimmung von $\hat{\sigma}_0^2$ nur bei ausreichender Redundanz r, wobei bei Transformationen als Sonderfall oft r < 10 genügend ist ([Niemeier 02]).

Der Verzicht auf ungenau bestimmte Beobachtungen (z. B. Strecken) kann vom Modell kompensiert werden, solange ausreichend Redundanz zur Berechnung der mit dieser Beobachtung funktional verknüpften Unbekannten vorhanden ist. Im Fall einer Transformation ist dies gewährleistet, da jede Unbekannte abhängig von jeder gemessenen Strecke ist. Der Verzicht auf die Messung einzelner Strecken (Tab.6.1b) kann daher durchaus zur Verringerung der Standardabweichungen der Unbekannten führen, da in den Beobachtungen vorhandene Spannungen reduziert werden können. Dieses Verfahren kann jedoch nicht beliebig häufig durchgeführt werden, weil sich die verbleibenden Spannungen immer stärker auf die in **P** mit deutlich höherer Genauigkeit eingeführten Richtungsbeobachtungen auswirken und daher in (6.19) stärker gewichtet werden. Das Genauigkeitsniveau der ausgeglichenen Unbekannten liegt als Folge daraus signifikant unter der a priori-Annahme, sodass eine Anpassung nötig wird. Im Beispiel Tab.6.1d ist die Standardabweichung der beobachteten Richtungen deutlich zu erhöhen (Faktor 10), um eine realistische Kofaktormatrix und eine Übereinstimmung mit dem Ausgleichungsergebnis zu erreichen. Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Unbekannten liegen in diesem Fall in der Größenordnung der Basiskonfiguration mit allen Streckenbeobachtungen.

Eine Reduktion der Spannungen und damit der Verbesserungsquadratsumme ist letztlich auch durch den selektiven Verzicht auf vollständige Punktinformationen möglich, sodass – wie bereits erwähnt – für jede Passpunktanordnung eine ideale, verbesserungsminimale Beobachtungskombination gefunden werden kann, die zudem über ausreichend Redundanz verfügt. In diesen Fällen werden nicht berücksichtigte Epochenpunkte jedoch durch den endgültigen Transformationsparametersatz nicht repräsentiert und mit überproportionalen Restklaffungen versehen (Abb.6.8c). Für die Messplanung ist dieses nachträgliche Beobachtungsdesign irrelevant, weshalb es an dieser Stelle nicht weiter verfolgt wird.

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass durch die Auswahl geeignet verteilter Passpunkte die Beobachtungszahl bei gleichbleibenden Restklaffungen deutlich reduziert werden kann. Die zugehörigen Werte für $\hat{\sigma}_0^2$ und die Standardabweichungen der Unbekannten in Tab.6.1e legen zudem die Vermutung einer sehr hohen Genauigkeit a posteriori nahe. Die Bestimmung der Genauigkeitseigenschaften im Rahmen der Ausgleichung ist jedoch nicht sonderlich aussagekräftig, da die Konfiguration kaum mehr Redundanz aufweist. Die a priori-Genauigkeitsangaben werden quasi durchgereicht, ohne sich bei der Behandlung von Beobachtungsspannungen bewähren zu müssen. Diese Vorgehensweise ist nur gerechtfertigt, wenn die verwendeten Genauigkeitsaussagen hinreichend bekannt und zuverlässig sind. Passt das tatsächliche Genauigkeitsniveau der Beobachtungen nicht zu der a priori-Annahme, versagt der Ansatz aufgrund der geringen Redundanz. Des Weiteren findet auch hier eine selektive Punktauswahl statt, die die Restklaffungen in den nicht verwendeten Epochenpunkten erhöht. Im Gegensatz zum Vorgehen bei Tab.6.1c wird die Selektion jedoch nicht unter der Prämisse der minimalen Verbesserungsquadratsumme, sondern der geometrischen Verteilung der Passpunkte vorgenommen. Deswegen kann die reduzierte Anzahl an verwendeten Punkten trotzdem als repräsentativ für die gesamte Menge an Passpunkten gelten; dies gilt auch hier jedoch nur dann, wenn das stochastische Modell für die gewählten Passpunkte zutreffend ist.

Ob letztlich eine Bewertung der Zulässigkeit von beobachtungsreduzierten Messkonfigurationen auf Basis des stochastischen Modells oder auf Basis der Restklaffungen vorgenommen wird, ist im Einzelfall anhand der vorhandenen Beobachtungen, der Zuverlässigkeit des Genauigkeitsmodells und ggf. anhand von Kenntnissen aus Vorepochen zu entscheiden. Idealerweise fließen in die Beobachtungsmodellierung beide Kriterien mit ein.

Voraussetzung für den Ansatz der Ähnlichkeitstransformation ist die Kenntnis ausreichend vieler Passpunktkoordinaten in der Bezugsepoche. Ziele, zu denen auch in dieser ausschließlich Richtungsinformationen vorliegen, können zwar in das Ausgleichungsmodell integriert werden, erzwingen jedoch das Mitschätzen der nicht bekannten Raumstrecken als zusätzliche Unbekannte. Der Redundanzgewinn von r = 1 dieser jeweiligen Beobachtungen ist gering im Vergleich zur Labilität der geometrischen Anordnung und der daraus resultierenden schlechten Schnittgeometrie bei kleinen Bewegungen im Raum. Die Vorgehensweise ist identisch derjenigen bei der künstlichen Generierung einer epipolargeometrischen Anordnung, bei welcher der Beobachtungspunkt der ersten Epoche als fiktiver Standpunkt in die zweite Epoche transformiert wird und dort ein Schnitt erfolgt.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beziehen sich auf den Nahbereich bis zu wenigen 10er Metern. Für weiter entfernte Ziele und bei Messungen im Gelände sind zusätzliche Kriterien zu berücksichtigen. Die Richtungsgenauigkeit kann, wie in Abschnitt 5.3.5 dargelegt, je nach meteorologischen Bedingungen und Lichtverhältnissen 1–2 mgon betragen. In üblichen Zielentfernungen bis 200 m ist ihr Einfluss damit gleich oder sogar größer als derjenige der Entfernungsmessung. In diesen Fällen sollte die Anzahl an Streckeninformationen ausreichend groß sein, um ggf. die Transformation nur mit den VPP berechnen zu können. Weitere RPP dienen dann ausschließlich einer zusätzlichen Stützung des Ergebnisses. Die Bewegungen kleiner Objekte in großer Entfernung sind mittels mehrerer Zielpunkte auf den Objekten ebenfalls nur schwach bestimmbar. Das Verfahren lässt sich im großmaßstäbigen Außenbereich somit vor allem zur Messung stark verteilter Einzelpunkte eines gemeinsamen Bewegungsmodells, z. B. einer Hangrutschung, nutzen. Hier ist regelmäßig die Gefahr gegeben, auf größere Entfernungen grob fehlerhafte oder ausfallende Streckenmessungen zu erhalten. Die korrespondierenden Richtungsmessungen können damit aber weiterhin genutzt werden. Im Rahmen des Projektes alpEWAS wird dieser Ansatz unter anderem verfolgt [Thuro et al. 07].

6.3.2 Weitere Verformungsmodelle

Die am Beispiel der Ähnlichkeitstransformation gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf andere bzw. modifizierte Transformationsmodelle übertragen. Leicht ersichtlich gilt dies für alle Fälle, die eine Untergruppe der räumlichen Ähnlichkeitstransformation mit eingeschränkter Parameterzahl darstellen; insbesondere trifft dies also für selbstähnliche ebene sowie kongruente Deformationen und für Bewegungen zu, die relativ zu und auf einer Bezugsebene (Verschiebung auf einer Bodenfläche, Setzungen) stattfinden. In diesen Fällen ist eine einzelne maßstabsbestimmende Strecke bzw. die Kenntnis über Bewegungsrestriktionen ausreichend, solange genügend Redundanz vorhanden ist. Die zugehörigen Funktionalgleichungen können als Kombination aus dem Ausgleichungsansatz 6.13 und den Ansätzen aus Abschnitt 6.2 gewonnen werden. Damit kann, abhängig von der Notwendigkeit der Tachymeterausrichtung zur Erfassung aller Messpunkte, die Messdauer für eine Epoche deutlich reduziert werden.



Abb. 6.9: Reduktion eines VPP durch zwei RPP bei der Affintransformation

Sind alle Punkte im Gesichtsfeld der IATS scharf darstellbar, ist die Epochendauer nur noch durch die Geschwindigkeit der Bildauswertung begrenzt.

Räumliche mathematische Modell- und Transformationsansätze, die außerhalb der Starrkörperverformung liegen, sind aufgrund ihrer hohen Parameterzahl nur durch eine entsprechend erhöhte Passpunktzahl bestimmbar. Ein einfaches und anschauliches Beispiel dafür ist die Affintransformation mit zwölf Parametern. Die minimale, ausschließlich aus VPP bestehende Passpunktkonfiguration benötigt entsprechend vier tripelweise nicht komplanare Punkte, die so einen Basissatz nicht zueinander orthogonaler Einheitsvektoren mit unterschiedlichen Maßstäben bilden. Der Ursprung beschreibt dabei den translativen Anteil. Variiert man nun einen Vektor dieser Basis, beeinflusst dies einerseits die Scherwinkel zu den anderen Vektoren und andererseits den Maßstab und ist gleichbedeutend einer Transformation unter Änderung dieser drei Parameter. Verzichtet man bei einem dieser Punkte nun auf die Bestimmung der Strecke in der 2. Epoche, kann man versuchen, diese Informationslücke durch einen zusätzlichen RPP außerhalb der Ebene der drei verbliebenen VPP zu schließen.

Diesen Ansatz zeigt Abb.6.9 in einer Skizze. Der Übersichtlichkeit halber erfolgt die Verdeutlichung in der Ebene; die Überlegung im räumlichen Fall ist sinngemäß identisch. Das Ausgangssystem habe die Einheiten e_y und e_x auf den Achsen und den Scherungswinkel γ . Der Punkt P hat dann ohne Beschränkung der Allgemeinheit die Koordinaten (e_y, e_x) . Kommt es nun zu einer Änderung einer der Koordinatenachsen durch Änderung des Vektors nach e_y in $e_{y'}$ (Änderung des Scherwinkels in γ' und/oder maßstäbliche Änderung der Achseneinheit), so entspricht dies einer Transformation von P in $P'(e'_y, e_x)$. Die Richtung vom Standpunkt SP nach P' legt diesen eindeutig fest, da die Koordinate e_x konstant bleiben muss. Betrachtet man nun die Richtungsgerade von SP durch den Punkt $(e_{y'}, e_x = 0)$, so stellt man fest, dass es auf der Geraden noch einen zweiten Punkt $(e_{y''}, e_x = 0)$ unter der Voraussetzung der Scherung γ'' gibt (nur in Sonderfällen genau einen), für den P tatsächlich auf P' = P'' fällt. Es gibt also zwei Kombinationen aus Maßstabsänderung entlang der y-Achse und Scherungswinkel, die die Beobachtungen erfüllen. Eindeutigkeit erhält man nur durch eine ausreichend gute bekannte Näherung oder durch einen weiteren RPP.

Dies gilt analog auch für die anderen beiden Basisvektoren, wobei jeweils die RPP der anderen beiden die Uneindeutigkeit des dritten aufheben können. Es gilt also, dass die Messung von sechs RPP, von denen nicht beliebige vier in einer Ebene liegen dürfen, zusammen mit dem VPP der Translation theoretisch ausreichend wäre (mathematisch sind auch fünf RPP genügend, da einer davon als Ergänzung für zwei Basisvektoren genutzt werden kann). In der Praxis ist das Zusammenspiel der Kombinationen aus Achsmaßstäben und Scherungswinkeln jedoch nicht zuletzt wegen der Mehrdeutigkeit ziemlich diffizil, sodass die Bestimmung der Parameter auf diese Weise nur unzureichend möglich ist. Vorteilhaft ist es, jeweils drei gut verteilte RPP pro Basisvektor zu nutzen, welche möglichst senkrecht aufeinander stehende Ebenen aufspannen; idealerweise ist jeweils einer dieser Punkte zusätzlich ein VPP.

Allgemein können reine Richtungsbeobachtungen bei stark parametrisierten Ansätzen gut zur Stützung bei ansonsten nur schwach redundanter Beobachtungszahl aus VPP dienen, sind jedoch nur beschränkt geeignet, allein die notwendige Redundanz zuverlässig herzustellen. Nichtähnliche Ansätze mit reduzierter Parameteranzahl (z. B. affine Deformationen in einer Bezugsebene wie sie Fassadendeformationen darstellen), sind hingegen einfach und vorteilhaft mittels nur einem VPP und mehreren RPP bestimmbar. Idealerweise steht hier die Beobachtungsrichtung wieder möglichst senkrecht auf der Messebene, was dem Allgemeinfall der Photogrammetrie entspricht.

Weitere, gering parametrisierte nichtähnliche Verformungsmodelle können großteils ebenfalls mit Hilfe reiner Richtungsmessungen gestützt werden, solange explizite Deformationsrichtungen modelliert werden können und die Verformungen mathematisch formuliert werden kann. Dies trifft beispielsweise auf die Durchbiegung in Abb.6.6 zu, bei der lediglich die vertikale Deformationsebene durch Messungen zu den zwei Auflagerpunkten festgelegt werden muss. Die Bestimmung des ausgleichenden Polynoms ist ausschließlich aus Richtungsinformationen möglich. Ein weiteres Beispiel ist die Abplattung eines Kugelkörpers bei Belastungszunahme am Pol. Diese Aufgabe wäre affin lösbar, kann jedoch auch durch ein ausgleichendes Ellipsoid mit nur zwei Unbekannten beschrieben werden.

6.4 Verwandte Anwendungsbereiche

Ingenieurgeodätische bzw. -photogrammetrische Erfassung und Quantifizierung von Deformationserscheinungen beschränken sich nicht nur auf die Erfassung und Eingliederung diskreter Punkte in ein gemeinsames Bewegungsmodell mit anschließendem Epochenvergleich. Durch die Nutzung georeferenzierter Messbilder kann ein umfangreicheres Repertoire an Aufgabenstellungen bearbeitet werden als mit den jeweiligen Einzelsensoren. Die im Folgenden aufgeführten Anwendungsbeispiele sind für sich genommen keine neuartigen Verfahren, da sie auch mit verfügbarer marktfähiger Ausrüstung zuverlässig bewältigt werden können. Ihr Vorteil bei der Nutzung einer IATS liegt in der bisher nicht existenten Synthese der Sensoren mit unmittelbarem gegenseitigen Messdatenbezug und sofort verfügbarer absoluter Orientierung aller photogrammetrischen Messinformationen bei erfolgter Stationierung und Orientierung des Tachymeters. Die Berechnung räumlicher Koordinaten ist damit auch aus Mehrbildaufnahmen ohne eingemessene Passpunkte möglich.

6.4.1 Formvermessung

Die herkömmliche geodätische Deformationsmessung beschreibt den Unterschied zwischen Punktfeld-Zuständen unterschiedlicher Messepochen. Ist einer dieser Zustände nicht tatsächlich physikalisch bestimmt, sondern aus Planungsunterlagen entnommen, spricht man üblicherweise von einer Aufgabe der Fertigungskontrolle, Qualitätssicherung oder allgemein der Soll/Ist- bzw. Formvermessung. Der zulässige Betrag der Abweichungen wird dabei durch Toleranzmaße festgelegt, welche allgemein in Form- und Lagetoleranzen unterteilt werden [Löffler et al. 02], wobei letztere relativ zwischen Teilen des Objekts oder absolut gegenüber einem Bezugssystem vorliegen können. Bezugsobjekte für die Angaben sind dabei oft physikalisch nicht messbare Punkte (z. B. Mittelpunkt einer Bohrung) oder auch linear ausgedehnte Objekte (z. B. Werkstückkanten). Bei der absoluten Lagemessung sind auch fiktive Bezugsgrößen (Referenzlinie zwischen zwei Wandmarkierungen) möglich. Die eindeutige Identifikation und Messung mit rein polaren Messmethoden (Tachymeter, Laserscanner, Lasertracker) ist in diesen Fällen nicht oder nur schwer möglich.

Je nach Größe des zu vermessenden Objekts, Genauigkeitsanforderung, Zeitbudget etc. existieren unterschiedliche Verfahren der Industrievermessung, die diese Aufgabe zufriedenstellend lösen können. Befindet sich das zu vermessende Objekt in einer bekannten Referenzebene, ist eine Einzelbildauswertung einer kalibrierten Kamera genügend (Fließbandkontrolle). Für Objekte mit räumlicher Tiefe oder unbekannter Entfernung kann auf photogrammetrische Stereobildauswertung zurückgegriffen werden. Verbindet man das Verfahren der Koordinatengewinnung mit einer Kantenextraktion, können unmittelbar räumliche geometrische Formmerkmale abgeleitet werden. Vollständige Oberflächenmodelle (Freiformflächen), auch bei nicht texturierten Objekten, können mittels Streifenprojektoren gewonnen werden. Eine Übersicht und eine erste Einführung dazu findet sich in [Przybilla 07].

Photogrammetrische Verfahren haben den Nachteil, dass sie auf eingemessene Passpunkte angewiesen sind, je nach Objektentfernung nur eine begrenzte Schärfentiefe aufweisen und wegen des beschränkten Gesichtsfeldes homologe Punkte für die Kombination mehrerer Aufnahmen bei ausgedehnten Objekten vorhanden und ggf. vorher mechanisch angebracht werden müssen. Bei Streifenlichtverfahren wird der Maßstab durch die bekannte Basis der gleichschenkligen Messanordnung in das System eingebracht. Eine absolute Positionierung ist hier nur durch Objektpasspunkte oder Einmessung des Standpunkts und räumliche Orientierung möglich. Die Arbeitsabstände sind in der Regel gering (< 2m), können bei entsprechend langer Basis aber auch vergrößert werden.

Große Vorteile der photogrammetrischen Verfahren sind ihre Aufnahmegeschwindigkeit mit vollständig automatisierter Messdatenaufbereitung und -auswertung sowie die hohen relativen Genauigkeiten von besser 1:10 000 des Gesichtsfelds.

Die Videotachymetrie kann als geeignetes Werkzeug eingesetzt werden, wenn Nahbereichs-Photogrammetrie nicht rentabel oder ungünstig einsetzbar, eine herkömmliche polare Messmethode aber z.B. aufgrund der Ausprägung der Ziele nicht praktikabel ist. Dies gilt insbesondere, wenn

- große Messobjekte mit nur wenigen, räumlich stark verteilten PoI vorliegen
- Passmarken zur Verknüpfung von Aufnahmen nicht angebracht werden können
- eine unmittelbare absolute Koordinatenerfassung notwendig ist
- basierend auf den Messdaten unmittelbar Absteckungen vorgenommen werden sollen

Die Schwierigkeit der korrekten Zielpunkt- bzw. Objektdetektion ist in diesen Fällen durch die herkömmlichen Einschränkungen der industriellen Bildverarbeitung gegeben. Da dieser Komplex sehr heterogen ist, und für automatisierte Verfahren in diesem Bereich stets genau definierte Umgebungsparameter eingehalten werden müssen, ist ein System zur automatischen Messung beliebiger Objektkanten mit IATS aber nicht realistisch. Für häufig wiederkehrende Standardanwendungen können zwar Applikationen entwickelt werden; im Weiteren sind Kanten detektierende Algorithmen jedoch bevorzugt für semiautomatische Anwendungen vorstellbar. Videotachymetrie ist dabei kein Verfahren der



Abb. 6.10: Die Erfassung von Bohrungen nutzt die Videotachymetrie ideal aus, z. B. bei der Abweichungskontrolle gegenüber einer Sollposition (links) oder bei der Lageprüfung entlang einer Bezugsgeraden (rechts)

Werkstückkontrolle, wenn diese einfach bewegt und damit zur Prüfung auf einen Messstand gebracht werden können; sie entfaltet ihre Vorteile bei der Vor-Ort-Messung, also z. B. beim Aufstellen großer Bauteile und der Bestimmung ihrer Formabweichungen im eingebauten Zustand, bei der Lage- und Ausrichtungskontrolle von Passbohrungen (vgl. Abb.6.10) oder bei der Überprüfung von Schweißnähten oder Nieten unter unmittelbarer Angabe der Raumposition und dem Vergleich mit Planungsdaten. Der Vorteil gegenüber der rein manuellen, optischen Erfassung liegt neben dem Zeitgewinn vor allem in der vollständigen Aufnahme linien- oder flächenhafter Strukturen und deren Soll-/Ist-Abgleich, ohne über diskrete Messpunkte interpolieren zu müssen.

Daneben ist während der Einpassungsphase von Bauteilen kontinuierliches optisches Tracking möglich, sodass in Echtzeit ohne manuelles Nachführen Korrekturwerte angegeben werden können. Die gewünschten Sollpositionen können zusätzlich im Kamerabild überblendet werden.

6.4.2 Lasersysteme

Wie in Abschnitt 1.3.1 ausgeführt, basieren die Anfänge der Videotachymetrie auf dem Prinzip des räumlichen Vorwärtsschnitts in Kombination mit einem den Zielpunkt anzeigenden Lasertheodoliten. Zur Messung von nicht signalisierten Einzelpunkten ist dieses Verfahren heute nicht mehr rentabel und wurde durch die reflektorlose Punktmessung abgelöst. Eine Erweiterung dieses Ansatzes ist jedoch für die Bestimmung von Deformationen bzw. Sollform-Abweichungen möglich, wobei eine Anleihe an die bereits erwähnte Messung mittels Streifenprojektion genommen wird. Das Grundprinzip ist alt und wurde bereits von [Richardus 66] für eine rein photogrammetrische Messung beschrieben: Von einem Punkt bekannter Stationierung aus wird ein orientiertes (Licht-)Profil erzeugt, welches anschließend im orientierten Messbild ausgewertet (Abb.6.11) und koordiniert werden kann. In einer modernen Umsetzung wurde von [Winkelbach et al. 06] ein Low-Cost-Triangulationsscanner auf dieser Basis entwickelt. Profilursprung und -ausrichtung sind dabei variabel, um ein ganzes Objekt überstreichen zu können; die Orientierung wird über feste Referenzebenen realisiert.

Das Profil kann mittels eines Linienlasers unkompliziert erzeugt werden. Durch automatische Detektion und Verfolgung der Laserlinie unter Verwendung einfacher Schwellwertalgorithmen ist so das vollständige Aufmaß des gesamten Profils und in der Folge auch potentieller Profiländerungen möglich. Ist der Standpunkt des Lasers nicht koordiniert bzw. fehlt die bekannte Ausrichtung, kann diese durch reflektorlose Messung zu drei verteilten Punkten ersetzt werden. Damit ist ohne großen Aufwand die



Abb. 6.11: Ausgewertetes Abbild eines vertikalen Linienlasers an einer Stufenkante

Erfassung jedes beliebigen Profils möglich. Das Verfahren ist vor allem für Innenräume geeignet und funktioniert bei möglichst wenig Umgebungslicht besonders gut.

Voraussetzung für eine günstige Schnittgeometrie ist ein möglichst großer Winkel zwischen der Zielachse der IATS und der Profilebene. Liegt die Zielachse nahe dieser Ebene, was z. B. bei horizontalen Profilen häufig der Fall ist, kommt es zu stark schleifenden Schnitten und einer schwachen Tiefenauflösung.

In der gegenwärtigen Prototyp-Version kann wegen des Okular-Sperrfilters für die EDM-Strahlung rotes Laserlicht nicht verwendet werden, da es nicht auf dem Kamerabild abgebildet wird. Die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden daher mit grünem Laserlicht durchgeführt. In zukünftigen Gerätereihen ohne Okular kann auf die Auskopplung bestimmter Wellenlängen verzichtet werden.

6.4.3 Schadenskartierung

Deformationen von Objekten sind häufig auch mit Schäden verbunden; dies ist insbesondere der Fall, wenn die einwirkenden Kräfte divergent sind oder das Objekt diese nicht elastisch aufnehmen kann. Im Bereich der Ingenieurbauwerke äußert sich das in der ersten Ausprägungsstufe durch das Auftreten von Rissen. Das Erkennen und das Monitoring von Rissbildung sind daher grundlegende Präventivmaßnahmen, um gravierenden Substanzschädigungen, Bauwerksversagen und einem erhöhten Gefährdungspotential vorzubeugen.

Üblicherweise werden Risse manuell lokalisiert und kartiert, wobei die Rissbreite anhand einer Vergleichskarte gemessen wird. [Riedel et al. 03] stellen ein photogrammetrisches Verfahren vor, bei dem die Risse an ausgesuchten Stellen mit einer Digitalkamera erfasst und automatisiert ausgewertet werden. Die räumlichen Positionen der Messstellen (ohne Ausrichtung der Photographie) werden dabei durch Tachymetrie bestimmt und die Messstellen müssen erreichbar sein. Daneben ist auch ein flächenhafter photogrammetrischer Ansatz mit automatischer Extraktion der Risse denkbar. Aufgrund der benötigten hohen Genauigkeit würde dies jedoch zu einer Vielzahl von Nahbereichs-



Abb. 6.12: Beispiel einer Rissverfolgung mit der IATS. Die Messbilder lassen sich anschließend zur Dokumentation als Mosaik zusammenfügen. An interaktiv vorgegebenen Stellen oder in regelmäßigen Abständen kann die Rissbreite bestimmt werden, zusätzlich können für jedes Pixel entlang des Risses 3D-Koordinaten angegeben werden (hier für Anfangs- und Endpunkt des unteren Risses).

Einzelaufnahmen in einem Blockverband führen, der wirtschaftlich und messtechnisch nicht praktikabel ist.

Diese Einschränkungen sind durch die Nutzung der Videotachymetrie behebbar. Das Kriterium der Erreichbarkeit wird auf die notwendige Sichtbarkeit vom Tachymeterstandpunkt aus reduziert; insbesondere sind aufwendige Hubsteigerarbeiten z. B. an Verkehrstrassen überflüssig. Durch die hohe Messgenauigkeit im Bild in Verbindung mit der Objektivvergrößerung ist die notwendige Genauigkeit der Rissmessung bei üblichen Messentfernungen im 10er Meter-Bereich gewährleistet. Die Risserkennung und die Rissbreitenbestimmung können somit wie beim herkömmlichen Ansatz durch Bildanalyse-Operatoren automatisch oder semiautomatisch durchgeführt werden; zusätzlich besteht der Vorteil, jedem beliebigen Abschnitt des Risses unmittelbar absolut orientierte räumliche Koordinaten zuweisen zu können. Eine Kartierung des Schadensbilds kann also beispielsweise direkt einem Modell des Bauwerks, z. B. aus einer Laserscanneraufnahme, überlagert werden. Daraus generieren sich zusätzliche Bestimmungsgrößen über das Schadensbild wie z. B. Risslänge und Orientierung (siehe Abb.6.12), und der Bezug auch weiter entfernter Rissabschnitte zueinander ist durch die Absolutmessung möglich. Eine eindeutige Zuordnung homologer Bereiche für Epochenvergleiche wird ebenfalls gewährleistet.

Schadenskartierung mit IATS ist auch mit weiteren Schadensbildern möglich. Grundlage für einen vorteilhaften Einsatz sind dabei in jedem Fall die unproblematische Sichtbarkeit der betroffenen Stellen, auch aus der Entfernung, und die signifikante Detektierbarkeit schadhafter Stellen gegenüber dem Hintergrund durch optische Methoden mittels Kanten- oder Texturansätzen. Einsatzmöglichkeiten bieten sich z. B. bei der Bestimmung von Wasserschäden an Mauerwerk und Beton, bei Verfugungen zwischen Bauelementen oder bei Flechtenbewuchs.

6.4.4 Schwingungsmessung

Videotachymetrie ist daneben für die Bestimmung zeitabhängig systematischer Positionsveränderungen geeignet; üblicherweise handelt es sich dabei um Schwingungen. Die Messgeschwindigkeit ist abhängig von der Bildrate der Kamera, der Geschwindigkeit des verwendeten Auswertealgorithmus und der Notwendigkeit, das Tachymeter nachzuführen. Für hohe Abtastraten muss dazu der verwendete Bildausschnitt oft kameraseitig begrenzt werden. Messungen sind dann nahezu in Realzeit (ca. 25 Hz) möglich, solange die Bewegungen gering bleiben. Aussagekräftige Resultate erhält man unter den Bedingungen des Abschnitts 6.2 für Bewegungsrichtungen, die weitgehend senkrecht zur Aufnahmerichtung liegen. Für eine Vielzahl der tachymetrisch bzw. photogrammetrisch beobachtbaren Schwingungen (z.B. Belastung auf Brücken, Windanregung an Türmen) trifft dies ausreichend genau zu.

Abb.6.13 zeigt ein Beispiel einer frei gelagerten Modellbahnschiene, die durch Lastauftrag angeregt wird und daraufhin stark gedämpft ausschwingt. Die Messung wurde mittels eines Matchingalgorithmus mit den Kanten einer der Schwellen als Zielobjekt durchgeführt. Bei der notwendigen langen Belichtungszeit im Gebäude war dabei eine Messfrequenz von 7 Hz möglich, was in etwa auch der erreichbaren Messfrequenz eines modernen Tachymeters entspricht.

Das Aufdecken von Schwingungen von mehr als 1–2 Hz und anderen zeitlich hochvariablen Bewegungen ist – insbesondere bei Außenmessungen – stark von den Beeinträchtigungen durch die Meteorologie abhängig. In diesen Fällen besteht oftmals keine ausreichende Möglichkeit, durch Mittelung mehrerer Aufnahmen die Messungsgenauigkeit zu steigern, sodass alle Einflüsse nach Abschnitt 5.3.5 direkt auf die Ergebnisse durchschlagen. Mehrere Untersuchungen an Brücken in München haben für Messentfernungen von ca. 100 m unter üblicher Verkehrslast keine Bewegungen außerhalb des durch die aktuelle Refraktion verursachten Messrauschens von $\pm 3 \text{ mm}$ aufdecken können, obwohl auf diesen Brücken ein leichtes Schwingen spürbar ist. Für entsprechende Messungen sollten daher z.B. LEDs als Ziele unter refraktiv günstigen Bedingungen (z.B. nachts) verwendet werden.



Abb. 6.13: Schwingungsmessung einer frei gelagerten Schiene mittels Matching einer Schwelle

Die Aufzählung zusätzlicher Anwendungsbereiche hat einen ersten Einblick in die Vorteile der IATS-Nutzung ermöglicht, ist aber nicht als abgeschlossen zu betrachten. Prinzipiell können alle Aufgaben, bei denen die primäre Messaufgabe im Erkennen, Zuordnen und Koordinieren von Objekten und Objekteigenschaften aus photometrischen Bildern besteht, in das Einsatzspektrum der Videotachymetrie integriert werden. In vielen Bereichen, gerade in Konkurrenz zu bestehenden und bewährten Systemen, muss sich diese in Zukunft allerdings erst noch beweisen. Es ist jedoch zu erwarten, dass sie verstärkt dort genutzt werden wird, wo auf herkömmliche tachymetrische Messverfahren nicht verzichtet werden kann, wobei diese dann durch die hybriden Möglichkeiten einer integrierten photogrammetrischen Messeinrichtung partiell erweitert werden.

7 Wertung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Voraussetzungen, Einschränkungen, Potential und Anwendungsspektrum der Videotachymetrie unter besonderer Bezugnahme auf Präzisions- und Deformationsmessungen anhand eines Prototyps näher untersucht. Das verwendete Instrument hat sich dazu als geeignet erwiesen, obwohl es hinsichtlich des Prototyp-Status noch Einschränkungen gibt, die für eine eventuelle Serienfertigung behoben werden müssen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Notwendigkeit, sämtliche Datenleitungen entlang der Kipp- oder Stehachse zu bündeln, die Steuerungselektronik für den Fokusmotor im Gerät selbst unterzubringen und den Kameratubus zu verkürzen, um ein Durchschlagen über den Zenit zu ermöglichen. Die integrierte CMOS-Kamera verfügt über eine hohe Auflösung bei kleiner physikalischer Pixelgröße, sodass Messungen im sub-mgon-Bereich möglich sind. Die Belichtungszeiten in geschlossenen Räumen sind dadurch bedingt aber verhältnismäßig hoch, sodass nur geringe Wiederholraten bei vollständiger Chipauflösung möglich sind. Zur Bedienung und Anzielung der IATS mittels eines echtzeitfähigen Bilds am Steuerrechner ist daher die Bildqualität zu reduzieren, wobei der Bildausschnitt dem üblichen Fernrohrgesichtsfeld entspricht und damit sehr beschränkt ist. Von Vorteil wäre in dieser Hinsicht die Integration einer zusätzlichen Übersichtskamera z.B. in das Fernrohrgehäuse anstatt eines PowerSearch-Sensors. Daneben ist der Kamerachip so zu integrieren, dass die Temperatur-Spezifikationen gewährleistet bleiben.

Grundlage der Nutzung eines Videotachymeters ist die vollständige Kalibrierung der jeweiligen Sensoren. Dies wurde für die Einzelkomponenten Tachymeter und Messkamera ebenso durchgeführt wie für das kombinierte System. Da die Videofunktionalität kein neues Messgerät erzeugen, sondern ein bestehendes tachymetrisches System nutzbringend erweitern soll, wurde insbesondere auf die Interaktion der einzelnen Teilsensoren Wert gelegt. Für die Zuordnung von Objektposition im Bild und orientierter Richtung wurde ein ausgleichender Ansatz auf Basis der Kollinearitätsgleichungen genutzt. Dieser erlaubt neben der Bestimmung der notwendigen Parameter des Kameramodells und der Transformation der Pixelkoordinaten auf die Richtungskugel auch das Mitschätzen der primären Achsfehler zum Kalibrierzeitpunkt und ist flexibel hinsichtlich des Bezugspunkts der Richtungsmessung. Als Folge daraus können im Rahmen herkömmlicher Geräteprüfungen veränderte Korrekturwerte der reinen Tachymeterkomponente (Achsfehler, Kollinearität der EDM-Achse zur Bezugszielachse) durch additive mathematische Korrektur berücksichtigt werden, ohne dass eine vollständige aufwendige Neukalibrierung notwendig wird. Zur Integration von ATR-Messungen ist ebenfalls eine Kollinearitätskorrektur möglich, wobei diese von der Fokussierlinsenstellung abhängig ist und über eine Messreihe mit einer kombinierten Zieltafel unkompliziert gewonnen werden kann.

Um ausreichende Genauigkeit über den gesamten Messbereich gewährleisten zu können, ist eine Vielzahl von Einzelkalibrierungen an entsprechenden Stützstellen des Linsenwegs erforderlich. Diese Messungen sind sehr zeitintensiv, aber weitgehend automatisierbar. Die Ablaufkurven der relevanten Parameter sind jedoch großteils mathematisch beschreibbar, sodass für eine Wiederholungskalibrierung die Anzahl der Stützstellen deutlich reduziert werden kann.

Die Parametrisierung des Kamera-Tachymeter-Modells gelingt mit hoher Genauigkeit. Aus Bildmessungen abgeleitete Richtungsinformationen weisen eine Standardabweichung von wenigen $\frac{\text{mgon}}{10}$ auf und sind somit herkömmlichen tachymetrischen Teilkreisabgriffen gleichwertig. Die tatsächliche Messgenauigkeit im Kamerabild ist dabei deutlich höher und lediglich abhängig von der physikalischen Pixelgröße sowie den verwendeten Bildanalyse-Operatoren im Subpixel-Bereich. Bei einer üblichen Leistung von $\frac{1}{10}$ Pixel können somit Richtungsänderungen von < 0, 1 mgon signifikant aufgedeckt werden.

Um Aussagen innerhalb dieses Genauigkeitsbereichs werten zu können, wurde das thermische Verhalten des Hybridgeräts bewusst ausgiebig untersucht. Das Augenmerk lag dabei vor allem auf Einlaufeffekten durch die Geräteerwärmung in den ersten 30 Minuten des Betriebs sowie auf der Langzeitstabilität. Dabei wurde eine temperaturabhängige Drift festgestellt, die pro °C in der Größenordnung der Subpixel-Messgenauigkeit liegt und daher berücksichtigt werden muss. Weiterhin wurde die Wiederholgenauigkeit der Messung auf ein Ziel in aufeinanderfolgenden Einzelbildern über einen längeren Zeitraum untersucht. Die Resultate stützen ebenfalls die Einstufung der IATS als geeignetes Instrument für Messaufgaben höchster Präzisionsanforderungen, begründen jedoch auch die Forderung nach geeigneten Mittelungsalgorithmen.

Letzteres wird insbesondere auch durch den Einfluss der – vor allem meteorologischen – Umgebungsparameter deutlich, die als refraktiv bedingte Szintillationseffekte den größten Fehleranteil der Videotachymetrie als optisches Messverfahren stellen. Unterschiedliche Szenarien zeigen teilweise deutliche Beeinträchtigungen des Einzelbilds hinsichtlich der Zielpunktrichtungen im Bereich bis zu 1 mgon und mehr.

Basierend auf der Qualität dieser Einzelaufnahmen ist die Auswahl geeigneter Bildbe- und -verarbeitungsoperatoren zu wählen. Ziel der Bildbearbeitung ist die optimale Aufbereitung der Aufnahme für nachfolgende Prozesse, wobei dies im Rahmen der tachymetrischen Messpunktdetektion vor allem das Bereitstellen vergleichbarer radiometrischer und statistischer Bildparameter zu unterschiedlichen Epochen bedingt. Darauf aufbauend werden durch Segmentierungs- und Kantenoperatoren objektbeschreibende Elemente generiert, welche im komplexen Schritt der Bildverarbeitung dann tatsächlichen Zielobjekten zugeordnet werden. Liegt eine – meist künstliche – Zielpunktklasse vor, deren einzelne Instanzen identisches Aussehen haben, so sind vordefinierte Algorithmen zur automatischen Erkennung dieser Objekte möglich. In den meisten Fällen wird man jedoch natürliche, weitgehend unikale Ziele nutzen, die in einer Lernphase parametrisiert und dann mittels Matching-Algorithmen wiederholt identifiziert werden.

Die Richtungsinformationen zu Zielpunkten in unterschiedlichen Epochen lassen sich zusammen mit entsprechenden Streckenmessungen oder Kenntnis über Bewegungsrestriktionen dieser Punkte in räumliche Koordinaten überführen. Die Änderung dieser Koordinaten dient dann als Grundlage für die Deformationsbestimmung. Je nach Aufgabenstellung und Kenntnissen über den beobachteten Vorgang lassen sich Deformationsgrößen direkt aus dem 2D-Kamerabild ableiten oder benötigen zusätzliche Streckeninformationen. Messungen direkt im Bild sind dabei bei einmalig bestimmtem Maßstab für viele Anwendungsfälle möglich, solange die Geometrie zwischen Zielachsrichtung und Objektbewegung günstig ist. Durch die Umgehung der Streckenmessungen lassen sich so die Messungsgeschwindigkeit deutlich erhöhen und mehrere Zielpunkte simultan in einer Aufnahme beobachten.

Messpunkte mit Streckenmessung dienen vor allem der Bestimmung diskreter Einzelpunkte mit nicht a priori bekanntem Bewegungsmodell. Gehören mehrere Punkte jedoch demselben Modell an, kann in späteren Epochen auf einzelne Distanzinformationen verzichtet werden, solange die Redundanz der Gesamtmessung ausreichend hoch bleibt. Umgekehrt ist es einfach möglich, ein bestehendes Modell durch zusätzliche reine Richtungsinformationen weiter zu verfeinern.

Videotachymetrie zeigt seine Eignung vor allem in Bereichen, in denen eine Signalisierung für herkömmliche automatische Zielpunktfindung nicht möglich ist. Es ist nicht mehr nötig, dass ein Operateur explizit einzelne Punkte manuell anzielt und codiert. Einzelne Strukturen können vollständig erfasst und mit hoher Auflösung ausgewertet werden. Die direkte Angabe von Zusatzinformationen (Abweichungen, Lagebeziehung einzelner Messpunkte/Objekte zueinander) während des Messprozesses ist außerdem möglich. Die Videotachymetrie beschreitet damit den Weg zwischen der reinen PoI-Messung der herkömmlichen Tachymetrie und der Erfassung von eigenschaftslosen Massenpunkten des Laserscannings: es gelingt der Übergang zur Aufnahme von "Objects of Interest" (OoI) auf automatisierbarer Basis. Diese OoI sind durch signifikante Messpunkte in 2D oder 3D sowie zusätzliche Kanten-, Abstandsoder Texturinformation (2D) beschreibbar und stellen damit eine höherwertige Repräsentation dar als ein rein diskretes Punktmodell.

7.2 Beurteilung

Die Integration von Bildinformationen in den tachymetrischen Messablauf birgt für die Hersteller geodätischer Geräte bisher nicht ausgeschöpftes Automatisierungspotential. Das vorhandene Interesse wird deutlich durch die aktuellen Trends in der Geräteentwicklung widergespiegelt. Mittelfristig werden auch einfache Messabläufe und Zielpunktidentifikationen über Bildanalyse realisiert werden. Da die Vielseitigkeit der Tachymetrie jedoch stark von der autarken Einsatzfähigkeit der Sensoren abhängt, kann nur ein sehr beschränkter Ausschnitt der verfügbaren Möglichkeiten auch tatsächlich onboard im Instrument realisiert werden. Viele Einsatzbereiche sind auf umfangreiche, externe Algorithmenpakete angewiesen, sodass die Kombination aus Steuerrechner und IATS unumgänglich ist. Qualifizierte Aufgabenstellungen sind daher vor allem längerfristige Messprojekte, für die entsprechende Infrastruktur bereitgestellt werden kann und notwendige Entwicklungs- und Anpassungsarbeiten rentabel sind.

In den verschiedenen Untersuchungen wurde mittels des verwendeten Prototyps einer hochauflösenden IATS nachgewiesen, dass sowohl die Kalibrierung als Basis weiterer Messungen als auch die exemplarisch genutzten Objekterkennungsalgorithmen den geforderten Genauigkeiten für geodätische Aufgaben höchster Präzisionsanforderungen genügen. Die Versuche zeigen jedoch auch deutlich, dass eine große Abhängigkeit von den Umgebungsparametern besteht. Die Geometriehaltigkeit der einzelnen Aufnahmen, insbesondere bei starken refraktiven Einflüssen, genügt den üblichen Anforderungen nicht in allen Fällen. Dazu kommt, dass insbesondere bei unterschiedlichen Helligkeits- und Beleuchtungsverhältnissen Schwellwerte und Parameter der verwendeten Algorithmen variieren. Durch Bildvorverarbeitung werden diese Einflüsse abgeschwächt, können aber nicht vollständig unterdrückt werden.

Digitale Bildverarbeitung findet hauptsächlich im industriellen Umfeld statt. Die Vorteile, die insbesondere den Einsatz von kamerabasierten Mess- und Auswertesystemen ermöglichen, liegen in den klar definierten Einsatzbereichen sowie in der Möglichkeit, die für die jeweilige Messanordnung notwendigen idealen und konstanten Umgebungsbedingungen zu schaffen. Als Beispiel sei hier die Beleuchtung genannt, die in den meisten Fällen für die Bildqualität entscheidend ist und genutzt wird, um relevante Objekteigenschaften hervorzuheben (vgl. z. B. [Weißler 06]). Für Aufgaben der Videotachymetrie ist es üblicherweise nicht möglich, gleichbleibende Bedingungen zu generieren; dennoch ist dies für das Gebiet höchster Genauigkeitsanforderungen jedoch bestmöglich anzustreben. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, die das Potential der Videotachymetrie ausschöpfen, wurden in geschlossenen Räumen durchgeführt. Die durchgeführten Messungen unter freiem Himmel fallen dabei - wie beschrieben – teilweise deutlich zurück. Videotachymetrie muss daher im Bereich der Präzisionsvermessung eindeutig als Indoor-System klassifiziert werden. Bedingt durch die hohe Auflösung des integrierten Kamerachips ist sie herkömmlichen tachymetrischen Ansätzen hier deutlich überlegen und kann auch übliche photogrammetrische Verfahren durch ihre Flexibilität und die Möglichkeit der unmittelbaren Georeferenzierung von Messbildern ersetzen. Insbesondere kleine Punktverschiebungen (Deformationen) und Lagebeziehungen beliebig im Raum verteilter Objektpunkte lassen sich vorteilhaft mittels IATS bestimmen. Outdoor-Messungen erreichen ausreichende Genauigkeiten nur durch Messwertintegration über einen längeren Zeitraum, wobei die Genauigkeit dann nicht durch die Spezifikationen des Instrumentariums selbst generiert wird, sondern durch die statistische Verteilungskurve mehrerer Einzelmessungen. Zuverlässige Automatisierungen werden erschwert, sodass für den regelmäßigen Einsatz vor allem messungsunterstützende, semiautomatische Algorithmen sinnvoll sind. Bestimmte wiederkehrende Aufgabenstellungen (z.B. Schwingungsmessungen) erlauben trotzdem automatisierte Verfahren; in diesen Fällen sind jedoch hinsichtlich einer Ergebnisoptimierung oft die notwendigen Parameter vor Messbeginn interaktiv oder iterativ festzulegen. Die Einsatzmöglichkeiten als Dauermonitoring-System auf nicht signalisierte Zielobjekte im Außenbereich werden gegenwärtig im Rahmen eines Forschungsprojekts näher untersucht.

Alle angeführten Einschätzungen sind auf Deformationsbestimmungen unmittelbar zu übertragen. Während im industriellen Umfeld Messungen schnell und flexibel sowie mit höchster Genauigkeit möglich sind, sind die signifikant detektierbaren Bewegungsraten im Freien stark von den äußeren Einflüssen abhängig.

Nutzt man die Bildinformation nicht nur als Erweiterung oder Ersatz des Blicks durch das Okular, sondern explizit zur (semi)automatischen Zielpunktdetektion, verschiebt sich der ingenieurgeodätische Ansatz immer stärker in Richtung des "Computer Vision". Dies gilt nicht nur für die Programmierung entsprechend angepasster Algorithmen für unterschiedliche Aufgabenstellungen, sondern auch für deren Anwendung. Der Nutzer vor Ort muss in der Lage sein, die generierten Ergebnisse und Genauigkeitsmerkmale im Kontext der vorherrschenden Bedingungen zu werten und ggf. auch durch die Anpassung von Parametern einzugreifen. Dies setzt in der Regel Expertenwissen gerade auch über die eingesetzten Verfahren voraus. Die Nutzung von Videotachymetrie erzwingt dadurch wieder einen Schritt weg vom Konzept des reinen Bedieners eines Messsystem hin zum Fachoperateur mit hoher Expertise.

7.3 Ausblick

Die Nutzung von Bildinformationen im Bereich der tachymetrischen Zielpunkterfassung wird in naher Zukunft deutlich steigen. Großformatige graphische Displays werden heute vom Kunden bereits als Standard erwartet; da mittlerweile alle großen Hersteller die Möglichkeiten zumindest einfacher Bildaufnahmen des Gesichtsfelds in ihre neuen Systeme integrieren, wird ein Gewöhnungs- und Bequemlichkeitsprozess auch hier rasch voranschreiten. Aus demselben Grund ist jedoch die vollständige Ablösung des Okulars durch einen integrierten Kamerachip nicht zu erwarten: Einfache Messaufgaben können auch ohne Technikunterstützung schnell und routiniert durchgeführt werden, sodass der Ingenieurgeodät auf diese alternative, "traditionelle" Methode nicht verzichten wird und will. Daneben gibt es durchaus auch Messverfahren, die auf ein Okular oder zumindest ein physisch existentes Fadenkreuz angewiesen sind; man denke dabei an Kollimation und Autokollimation.

Ein nächster Schritt wird die Entwicklung herstellerabhängiger passiver Zielzeichen sein, die bezüglich der jeweils integrierten Kamerachips optimiert sind. Eindeutige synthetische Muster (wie das HDS-Zielzeichen von Leica, das in dieser Arbeit häufig verwendet wurde) sind mit verhältnismäßig wenig Aufwand und großer Zuverlässigkeit im Messbild detektierbar, sodass die notwendigen Algorithmen auch ohne Nutzung eines Steuerrechners onboard implementiert werden können. Zusätzliche Informationen, z. B. Punktnummern, können dem Zielzeichen als Barcodes oder vergleichbare Strukturen beigefügt oder überlagernd integriert werden, können aber auch herkömmlich signalisierten Punkten zugeordnet werden. Passive Zielzeichen für Bilderkennung sind preisgünstiger als Reflexfolien und versprechen eine höhere Winkelgenauigkeit bei geringerer Fehleranfälligkeit z. B. infolge von Verdeckung oder Verschmutzung.

Die vollständige Ausrüstung des Messfernrohrs mit einem hochauflösenden Kamerasensor wird auf Instrumente für Spezialanwendungen beschränkt bleiben, dort jedoch aufgrund des Potentials gerade im Nahbereich in unterschiedlichen Aufgabenstellungen der Industrievermessung, aber auch für Aufgaben der Indoor-Deformationsmessung, Anwendung finden. Die Herausforderung in diesem Marktsegment wird in der Erstellung geeigneter Anwendungssoftware liegen, die die IATS als High-End-Sensor in einen automatischen Messablauf zu integrieren versteht.

Literaturverzeichnis

- [Abmayr 94] ABMAYR W.: Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Stuttgart 1994.
- [Ackermann 84] ACKERMANN F.: High Precision Digital Image Correlation. Proceedings of the 39th Photogrammetric Week, Schriftenreihe der Universität Stuttgart, Heft 9/1984, S. 231ff.
- [Al-Manasir u. Fraser 06] AL-MANASIR K. U. FRA-SER, C.: Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanner Data via Imagery. ISPRS Commission V Symposium, IAPRS Vol. XXXVI/5, Dresden 2006, S. 26ff.
- [Bähr u. Vögtle 98] BÄHR, H.-P. / VÖGTLE, T.: Digitale Bildverarbeitung. Heidelberg³ 1998.
- [Baltsavias 99] BALTSAVIAS E.: Matching Verfahren und automatische DGM Generierung. Nachdiplomkurs an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zürich 1999. URL: http://ecollection.ethbib.ethz.ch/ view/eth:26959, letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Beer 92] BEER, H.A.: Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System. Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 51, 1992.
- [Binnenbruck 02] BINNENBRUCK, B.: Anwendungen der Digitalen Bildverarbeitung in der geodätischen Messtechnik. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Nr. 89, 2002, S1ff.
- [Binnenbruck et al. 00] BINNENBRUCK, B. ET AL.: Einsatzmöglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung zur Bestimmung der Vertikalrefraktion. Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt Heft 10, Darmstadt 2000.
- [Bockes 00] BOCKES, B.: Technologische Aspekte und Systemtests des Dispersometer-Theodoliten für Anwendungen in der Ingenieurgeodäsie. Schnädelbach K./Schilcher M. [Hrsg.]: Ingenieurvermessung 2000 – Beiträge zum XIII. International Course on Engineering Surveying in München, Stuttgart 2000, S. 178ff.

- [Borgefors 88] BORGEFORS, G.: Hierarchical Chamfer Matching: A Parametric Edge Matching Algorithm. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 10(6) 1988, S. 849ff.
- [Brown 71] BROWN, D.: Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 37(8), Urbana 1971, S. 855ff.
- [Brown 92] BROWN, L.: A Survey of Image Registration Techniques. ACM Computing Surveys, Vol. 24(4), 1992, S. 325ff.
- [Bruce et al. 00] BRUCE, J. ET AL.: Fast and Inexpensive Color Segmentation for Interactive Robots. Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems Vol. 3, Takamatsu 2000, S. 2061ff.
- [Burger u. Burge 05] BURGER W. / BURGE M.: Digitale Bildverarbeitung. Berlin 2005.
- [Canny 86] CANNY, J.: A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Vol. 8(6), 1986, S. 679ff.
- [Chapman et al. 04] CHAPMAN, D. ET AL.: An Omnidirectional Imaging System for the Reverse Engineering of Industrial Facilities. Proceedings of the ISPRS working group V/1 Volume XX-XIV Part 5/W16, Dresden 2004.
- [Dankert u. Dankert 94] DANKERT, H. U. DAN-KERT, J.: Technische Mechanik computerunterstützt. Stuttgart 1994.
- [Deriche 87] DERICHE R.: Optimal Edge Detection Using Recursive Filtering. Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, London 1987, S. 501ff.
- [Deumlich u. Staiger 02] DEUMLICH, F. / STAIGER, R.: Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. Heidelberg⁹ 2002.
- [Dolezalek 03] DOLEZALEK, F.: Wie viel Auflösung braucht der Mensch? Forschungsgesellschaft Druck FOGRA Sonderdruck Nr. 7, München 2002.
- [Eckstein 08] ECKSTEIN, W.: Standard-Software – das Werkzeug zum effizienten Einsatz

der Hardware-Komponenten im Bildverarbeitungsprozess. Vortragsunterlagen zum VDMA-Infotag "Bildverarbeitung erfolgreich anwenden", Frankfurt am Main 2008.

- [Eschelbach 07] ESCHELBACH, C.: Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen. Brunner F. [Hrsg.]: Ingenieurvermessung 07 – Beiträge zum XV. Internationalen Ingenieurvermessungskurs in Graz, Heidelberg 2007, S. 169ff.
- [Ettemeyer et al.] ETTEMEYER, A. ET AL.: Technische Mechanik Teil 2: Elastostatik. Vorlesungsskript der Fachhochschule München, November 2006.
- [Fabiankowitsch 90] FABIANKOWITSCH, J.: Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern. Wien 1990.
- [Faulhaber 07] FAULHABER GMBH & CO.KG: Bedienungsanleitung MCDC 3003/06 S. 3. Auflage, 10. April 2007.
- [Flach u. Naterop 99] FLACH, PH. U. NA-TEROP, D.: Neue Analysetechniken für Deformationsmessungen in permanenten Robotertachymeter-Netzen. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten Heft 8-9/1999, S. 284ff.
- [Foley et al. 05] FOLEY, J. ET AL.: Computer Graphics: Principles and Practice. Boston²¹ 2005.
- [Furtner 01] FURTNER, U.: Farbverarbeitung mit Bayer-Mosaic Sensoren. Matrix Vision GmbH, 2001. URL: http://www.matrixvision.com/info/articles/pdf/art_bayermosaic_ de.pdf, letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Franz 07] FRANZ, M.O.: Punktoperationen II und Einführung in die Filterung. Folien zur Vorlesung "Industrielle Bildverarbeitung", Lehrstuhl für Cognitive Systems, Institut für optische Systeme an der HTWG Konstanz, 2007.
- [Fucke et al. 07] FUCKE, R. ET AL.: Darstellende Geometrie für Ingenieure. München¹⁷ 2007.
- [Gerstbach 99] GERSTBACH G.: CCD und Astro-Geodäsie – Unterwegs zur automatischen Lotrichtungsmessung. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik an der Technischen Universität Wien Nr. 50/1999, S. 45ff.
- [Gong et. al undat.] GONG, D. ET AL.: A Laser Scanning Videotheodolite for 3D Visualizations and Metrology. Undatiert. URL: www.alphageofisica.com.br/mdl/06video.pdf, letzter Aufruf: 09. April 2009.

- [Gottwald 87] GOTTWALD, R.: Kern E2-SE Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 4/1987, S. 147ff.
- [Gottwald 88] GOTTWALD, R.: Kern SPACE: An Automated Non Contact 3-D Measuring System for Industrial Applications. Proceedings of the International Conference on Robot Vision and Sensory Controls, Zürich 1988, S. 3ff.
- [Grün 95] GRÜN, A.: Adaptive Least Squares Correlation: A Powerful Image Matching Technique. South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, Vol. 14(3) 1995, S. 175ff.
- [Guttosch 05] GUTTOSCH, R. J.: Investigation of Color Aliasing of High Spatial Frequencies and edges for Bayer-Pattern Sensors and Foveon X3[®] Direct Image Sensors. 2005. URL: http://www.foveon.com/article.php?a=74, letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Haag et al. 97] HAAG, R. ET AL.: Vermessen mit der automatischen Feinzielung des TCA1800 von Leica. VPK Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, Heft 7/1997, S. 466ff.
- [Haberäcker 91] HABERÄCKER, P.: Digitale Bildverarbeitung. München 1991.
- [Haberäcker 95] HABERÄCKER, P.: Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung. München 1995.
- [Heck 95] HECK, B.: Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung. Heidelberg 1995.
- [Hennes 03] HENNES, M.: Systemeigenschaften von Robottachymetern im Nahbereich – Untersuchungen am Beispiel von Leica-Instrumenten. fub Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 6/2003, S. 300ff.
- [Hildenbrand 08] HILDENBRAND, D.: GDV III Geometric Computing. Vortragsfolien, Technische Universität Darmstadt, 27.10.2008.
- [Hornegger 96] HORNEGGER, J.: Statistische Modellierung, Klassifikation und Lokalisation von Objekten. Aachen 1996.
- [Hovenbitzer 03] HOVENBITZER, M.: Zur Automation berührungsloser 3D-Objekterfassung im Nahbereich. Deutsche Geodätische Kommission DGK bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C Heft 556, München 2003.

- [Hu 62] HU M.-K.: Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 8(2), 1962, S. 179ff.
- [Huang u. Harley 89] HUANG, Y. / HARLEY, I.: Calibration of Close-Range Photogrammetric Stations Using a Free Network Bundle Adjustment. Grün A./Kahmen H. [Hrsg.]: Proceedings of the Conference on Optical 3-D Measurement Techniques in Wien, 1989, S. 49ff.
- [Huep 88] HUEP, W.: Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatisierten Theodolitsystems. Schnädelbach K./Ebner H. [Hrsg.]: Ingenieurvermessung 88 – Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung in München, Bonn 1988, Artikel A13.
- [IDS 07] IDS GMBH: Software Development Kit uEye USB2.0 Kameras. Version 2.40, 2007.
- [IDS 08] IDS GMBH: uEye LE Cameras Prospekt. URL: http://www.stemmerimaging.co.uk/pages/products/product.php? view=349&item=08320&language=de, 2008. Letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [IDS 09] IDS GMBH: Benutzerhandbuch uEye Kameras. Version 3.32, 2009.
- [Jäger et al. 05] JÄGER, R. ET AL.: Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Heidelberg 2005.
- [Jähne 02] JÄHNE, B.: Digitale Bildverarbeitung. Berlin⁵ 2002.
- [Jahr 06] JAHR, I.: Lexikon der industriellen Bildverarbeitung. Baunach 2006.
- [Joeckel u. Stober 99] JOECKEL, R. U. STOBER, M.: Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung. Stuttgart 1999.
- [Juretzko 04] JURETZKO, M.: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität Bochum 2004.
- [Kabashi 03] KABASHI, I.: Gleichzeitig-gegenseitige Zenitwinkelmessung über größere Entfernungen mit automatischen Zielsystemen. Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien 2000.
- [Kahmen u. Steudel 88] KAHMEN, H. U. STEUDEL, J.:Das automatisch zielende Meßsystem GEO-ROBOT II. Schnädelbach K./Ebner H. [Hrsg.]: Ingenieurvermessung 88 – Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung in München, Bonn 1988, Artikel A7.

- [Kahmen u. DeSeixas 99] KAHMEN, H. U. DESEI-XAS, A.: Object recognition with Video-Theodolites and Without Targeting the Object. Proceedings of the IWAA, 6th International Workshop on Alignment Accelerator, Grenoble 1999.
- [Kahmen u. Reiterer 04] KAHMEN, H. U. REITE-RER, A.: High-Precision Object Monitoring with Image Assisted Theodolites – Sate of the Art. Proceedings of the IWAA, 8th International Workshop on Alignment Accelerator, Genf 2004.
- [Kahmen u. Reiterer 06] KAHMEN, H. U. REITE-RER, A.: Videotheodolite Measurement Systems – State of the Art. ISPRS Commission V Symposium, IAPRS Vol. XXXVI Part 5, Dresden 2006, S. 142ff.
- [Katowski 89] KATOWSKI O.: Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS. Optical 3-D Measurement Techniques in Wien, Karlsruhe 1989, S. 393ff.
- [Kratchounova et al. 96] KRATCHOUNOVA ET AL.: Erkennung und Bestimmung der aktuellen Konstellation von Objekten mit Scharniergelenken. Jähne B. et al. [Hrsg.]: Mustererkennung, Berlin 1996, S. 502ff.
- [Köhler 93] KÖHLER, B.: Die Bedienerunterstützende Computergraphik des Videotheodolitsystems GMS. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 2/1993, S. 62ff.
- [Lanser u. Eckstein 91] LANSER S. / ECKSTEIN W.: Eine Modifikation des Deriche-Verfahrens zur Kantendetektion. Radig B. [Hrsg]: Mustererkennung 1991, Informatik-Fachberichte Band 290 zum 13. DAGM-Symposium in München, berlin 1991, S. 151ff.
- [Laws 80] LAWS, K.: Textured Image Segmentation. Department of Engineering der University of Southern California, 1980.
- [Lehmann u. Reiterer 08] LEHMANN, M. U. REITE-RER, A.: Case-Based Deformation Assessment – A Concept. Reiterer A./Egly U. [Hrsg]: Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy, Proceedings of the First International Workshop AIEG 2008, Wien 2008.
- [Leica 03] LEICA GEOSYSTEMS: TPS Info 01/2003 Kalibrierung. URL: http://www.leicageosystems.com/de/de/lgs_8346.htm?cid=79, Heerbrugg 2003. Letzter Aufruf: 09. April 2009.

- [Leica 04] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TPS1200 Series GeoCOM reference Manual Version 1.00, Heerbrugg 2004.
- [Leica 05] LEICA GEOSYSTEMS: TPS1200 Schnittbild (Poster). URL: http://www.leicageosystems.com/de/de/lgs_8346.htm?cid=3306, Heerbrugg 2005. Letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Leica 07a] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TPS1200+ Gebrauchsanweisung. Version 5.5, Heerbrugg 2007.
- [Leica 07b] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TPS1200+ White Paper. URL: http://www.leicageosystems.com/de/de/lgs_4547.htm, Heerbrugg 2007. Letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Leica 07c] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TPS1200+ Serie Technische Daten. URL: http://www.leicageosystems.com/de/de/lgs_8346.htm?cid=3305, Heerbrugg 2007. Letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Leica 09] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TM30 Monitoring Sensor Broschüre, Heerbrugg 2009.
- [Löffler et al. 02] LÖFFLER ET AL.: Maschinen- und Anlagenbau. Möser M. et al. [Hrsg]: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Heidelberg 2002.
- [Luhmann 03] LUHMANN, T.: Nahbereichsphotogrammetrie. Heidelberg² 2003.
- [Luhmann 05] LUHMANN, T.: On the Determination of Object Rotation and Translation in 3-D Space (6DOF) by a Single Camera. Grün A./Kahmen H. [Hrsg.]: Optical 3-D Measurement Techniques VII in Wien, Band 2, Wien 2005, S. 157ff.
- [Machotka et al. 08] MACHOTKA, R. ET AL.: Image Processing an Total Station Instruments. Proceedings of the 4th International Conference on Engineering Surveying INGEO 2008, Bratislava 2008.
- [MathWorks 08] THE MATHWORKS: Matlab Release 2008a Dokumentation, 2008.
- [Miljanović 08] MILJANOVIĆ, M.: Knowledge Based System for Deformation Analysis and Interpretation. Reiterer A./Egly U. [Hrsg]: Application of Artificial Intelligence in Engineering Geodesy, Proceedings of the First International Workshop AIEG 2008, Wien 2008.
- [Mischke 00] MISCHKE, A.: Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik

an der Technischen Universität Wien Nr. 54, 2000.

- [Moritz 61] MORITZ, H.: Zur Reduktion elektronisch gemessener Strecken und beobachteter Winkel wegen Refraktion. ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 7/1961, S. 246ff.
- [Möser et al. 00] MÖSER, M. ET AL.: Grundlagen. Möser M. et al. [Hrsg]: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Heidelberg 2000.
- [Müller 09] MÜLLER, S.: Anwendungsbeispiele mit der Trimble VX Spatial Station. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 1/2009, S. 31ff.
- [MVTec 07] MVTEC SOFTWARE GMBH: Halcon 8.0.1 Solution Guide I, 2007.
- [MVTec 08] MVTEC SOFTWARE GMBH: Halcon 8.0.2 Referenzhandbuch / C++, 2008.
- [Naumann u. Schröder 87] NAUMANN, H. U. SCHRÖDER, G.: Bauelemente der Optik. München⁵ 1987.
- [Niemeier 02] NIEMEIER, W.: Ausgleichungsrechnung. Berlin 2002.
- [Olson u. Huttenlocher 97] OLSON, C. / HUTTEN-LOCHER, D.: Automatic Target Recognition by Matching Oriented Edge Pixels. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 6(1), 1997, S. 103ff.
- [Preis et al. 07] PREIS, S. ET AL.: Calibration Issues for Advanced Tacheometry. Grün A./Kahmen H. [Hrsg.]: Proceedings of the 8th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques in Zürich 2007, Band 1, S. 81ff.
- [Przybilla 07] PRZYBILLA, H.-J.: Streifenprojektion – Grundlagen, Systeme und Anwendungen. TLS 2007 – Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen e.V. DVW Band 53, Augsburg 2007.
- [Reinhold 03] REINHOLD, M.: Robuste, probabilistische, erscheinungsbasierte Objekterkennung. Studien zur Mustererkennung Band 10 der Universität Erlangen-Nürnberg, Berlin 2004.
- [Reiterer et al. 03] REITERER, A. ET AL.: 3D-Vermessung mit Videotheodoliten und automatisierte Zielpunkterfassung mit Hilfe von Interest Operatoren. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Heft 4/2003, S. 150ff.
- [Reiterer 05] REITERER, A.: A Knowledge-Based decision System for an On-Line

Videotheodolite-Based Multisensor System. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik an der Technischen Universität Wien Nr. 72, 2005.

- [Reiterer et al. 07] REITERER, A. ET AL.: A Knowledge-Based Optical 3D Measurement and Analysis System for Quality Control. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI, Heft 2/2007, S. 173ff.
- [Reiterer et al. 09] REITERER, A. ET AL.: A 3D optical deformation measurement system supported by knowledge-based and learning techniques. Journal of Applied Geodesy, Vol. 3(1), 2009, S. 1ff.
- [Richardus 66] RICHARDUS, P.: Project Surveying. New York 1966.
- [Riedel et al. 03] RIEDEL, B. ET AL.: Development of an Imaging System for Monitoring Cracks in Concrete Structures. Grün A./Kahmen H. [Hrsg.]: Optical 3-D Measurement Techniques VI in Zürich, Band 2, 2003, S. 96ff.
- [Roic 96] ROIC, M.: Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie an der Technischen Universität Wien Nr. 43, 1996.
- [Rucklidge 97] RUCKLIDGE, W.: Efficiently Locating Objects Using the Hausdorff Distance. International Journal of Computer Vision, Vol. 24(3), 1997, S. 251ff.
- [Scherer 05] SCHERER, M.: Visualisierung und simultane Erfassung der Geometrie mit Tachymeter und Digitalkamera – Eine Alternative zum Laserscannen in der Bauaufnahme. fub Flächenmanagement und Bodenordnung, Heft 6/2005, S. 283ff.
- [Schirmer 94] SCHIRMER, W.: Universaltheodolit und CCD-Kamera – ein unpersönliches Meßsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen. Deutsche Geodätische Kommission DGK bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C Heft 427, München 1994.
- [Schlüter et al. 09] SCHLÜTER, M. ET AL.: Selbstkalibrierung motorisierter Digitalkameratheodolite für technische Präzisionsmessungen. ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 1/2009, S. 22ff.
- [Schneider 07] SCHNEIDER, D.: Kombinierte Bündelblockausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung bei der Fusion terrestrischer Laserscannerdaten, Panorama- und zentralperspekti-

vischer Bilddaten. DGPF Tagungsband 16, Basel 2007, S. 465ff.

- [Schreer 05] SCHREER, O.: Stereoanalyse und Bildsynthese. Berlin 2005.
- [Schwarz 95] SCHWARZ, W. [Hrsg.]: Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen e.V. DVW, Band 13, Stuttgart 1995.
- [Sokkia 08] SOKKIA SERVICE- UND DISTRIBUTI-ONSCENTER DEUTSCHLAND: Persönliche Nachricht, Juni 2008.
- [Steger 00] STEGER C.: Subpixel-Precise Extraction of Lines and Edges. Proceedings of the XIXth ISPRS Congress, Vol. XXXIII-B3 of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000, S. 141ff.
- [Steger 02] STEGER C.: Occlusion, Clutter, and Illumination Invariant Object Recognition. Proceedings of the ISPRS working group III/5 "Photogrammetric Computer Vision" Vol. XXXIV Part 3A/B, Graz 2002.
- [Steger et al. 08] STEGER C. ET AL.: Machine Vision Algorithms and Applications. Weinheim 2008.
- [Thuro et al. 07] THURO K. ET AL.: Development and testing of an integrative 3D early warning system for alpine instable slopes (alpEWAS). Geotechnologien Science Report No. 10, Potsdam 2007.
- [Topcon 05] TOPCON DEUTSCHLAND GMBH: Persönliche Nachricht, Oktober 2005.
- [Topcon 08] TOPCON POSITIONING SYSTEMS INC.: Topcon ImagingStation – Long Range Scanning, Imaging and Robotic Total Station, Broschüre, 2008.
- [Torge 2000] TORGE, W. [Hrsg.]: Berichte zur XXII. Generalversammlung der IUGG Assoziation für Geodäsie. ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 7/2000, S. 223ff., Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2000.
- [Trimble 07] TRIMBLE GMBH: Trimble Spatial Station VX Datenblatt, 2007.
- [Uffenkamp 95] UFFENKAMP, V.: Konzeption, experimentelle Realisierung und Kalibrierung einer opto-elektronischen Schwenk-Neige-Kamera langer Brennweite. Deutsche Geodätische Kommission DGK bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C Heft 442, München 1995.

- [Ullrich et al. 03] ULLRICH, A. ET AL.: Multistationsausgleichung für ein Laserscanner-System mit aufgesetzter Kamera. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI, Heft 4/2003, S. 281ff.
- [Ulrich u. Steger 02] ULRICH M. / STEGER C.: Performance Comparison of 2D Object Recognition Techniques. Proceedings of the ISPRS working group III/5 "Photogrammetric Computer Vision" Vol. XXXIV Part 3A/B, Graz 2002.
- [Ulrich 03] ULRICH M.: Hierarchical Real-Time Recognition of Compound Objects in Images. Deutsche Geodätische Kommission DGK bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C Heft 568, München 2003.
- [Vogel 06] VOGEL, M.: Vom Pixel zur Richtung. Die räumlichen Beziehungen zwischen Abbildungsstrahlen und Tachymeter-Richtungen. Schriftenreihe Fachrichtung Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt Heft 20, 2006.
- [Wagner 06] WAGNER C.: Kantenextraktion Klassische Verfahren. Seminar "Bildsegmentierung und Computer Vision" im WS 2005/2006 an der Fakultät für Mathematik und Wirtschaftswissenschaften der Universität Ulm, 2006.
- [Walser 05] WALSER, B.: Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 87, 2005.
- [Wasmeier 02] WASMEIER, P.: Potential der Objekterkennung mit dem Videotheodolit TCA2003. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement der Technischen Universität München, unveröffentlicht, 2002.
- [Wasmeier 03] WASMEIER, P.: The Potential of Object Recognition Using a Servo-Tacheometer TCA2003. Grün A./Kahmen H. [Hrsg.]: Optical 3-D Measurement Techniques VI in Zürich Band 2, 2003, S. 48ff.
- [Wasmeier u. Foppe 06] WASMEIER, P. / FOPPE K.: A New CCD-based Technique for the Calibration of Leveling Rods. Proceedings of the XXXIII International FIG Congress Commission 5 PS5.2, München 2006.

- [Weißler 06] WEISSLER, G.: Einführung in die industrielle Bildverarbeitung. Poing 2006.
- [Welsch et al. 00] WELSCH, W. ET AL.: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Möser M. et al. [Hrsg.]: Handbuch Ingenieurgeodäsie, Heidelberg 2000.
- [Wiedemann et al. 08] WIEDEMANN, C. ET AL.: Recognition and Tracking of 3D Objects. Rigoll G. [Hrsg.]: Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science Vol. 5096, Berlin 2008, S. 132ff.
- [Wieser 95] WIESER, A.: Überwachungsmessungen mit Videotheodoliten. Diplomarbeit am Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie an der Technischen Universität Wien, 1995.
- [Wiki 06] WIKIPEDIA COMMONS: URL: http://en. wikipedia.org/wiki/Image:Bayer_pattern_on_ sensor.svg, veröffentlicht unter GFDL-Lizenz, 2006. Letzter Aufruf: 09. April 2009.
- [Winkelbach et al. 06] WINKELBACH, S. ET AL.: Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. Franke K. et al. [Hrsg.]: Pattern Recognition, Berlin 2006, S. 718ff.
- [Wunderlich 03] WUNDERLICH, T.: Vorlesungsskript Sensorik und Methodik 1, Lehrstuhl für Geodäsie, unveröffentlicht, 2003.
- [Wunderlich 05] WUNDERLICH, T.: Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten. Geowissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Geodäsie und Geophysik an der Technischen Universität Wien Nr. 71, 2005, S. 29ff., 2005.
- [Wunderlich 06] WUNDERLICH, T.: Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit. Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI, Heft 1+2/2006, S. 50ff.
- [Zhang et al. 04] ZHANG, Z. ET AL.: Digital Terrestrial Photogrammetry with Photo Total Station. Proceedings of the XXth ISPRS Congress IAPRS Vol. XXXV Part B5 Commission V Papers, 2004, S. 232ff.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Sokkia SET 3110MV
1.2	Topcon Imaging Station
1.3	Trimble VX Spatial Station (rechts)
2.1	Schnittbild eines TCRP1201
2.2	uEye LE OEM Kamerachip 19
2.3	Aufbau des Bayer-Farbfilters 19
2.4	$Relative spektrale Empfindlichkeit der u Eye-148-x LE-C \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $
2.5	Programmfenster Tachymetersteuerung
2.6	Programmfenster Fokussteuerung
2.7	Programmfenster Kamerasteuerung
2.8	Programmfenster Bildstatistik
2.9	Programmfenster Bildmessung
3.1	Höhenindex- und Zielachsfehler bei unterschiedlichen Temperaturen 27
3.2	Korrekturschema bei Verwendung der ATR und der Okularkamera 29
3.3	ATR-Korrektur
3.4	Ablaufkurve des Zusammenhangs zwischen scharf abgebildeter Objektentfernung und Stellung
	der Fokussierlinse
3.5	Restklaffungen der Kalibrierung ohne und mit Verzeichnungskorrektur
3.6	Bildhauptpunkt in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.7	Kamerakonstante in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.8	Verzeichnungskorrektur in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.9	Kippachsfehler in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.10	Kamerakantung in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.11	Affine Achsmaßstäbe in Abhängigkeit von der Fokussierung 46
3.12	Affine Scherung in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.13	Achsfehler in Abhängigkeit von der Fokussierung
3.14	Test der Kalibrierung im Nahbereich
3.15	Test der Kalibrierung auf sehr kurze und weite Distanzen
4.1	Blaues Hotpixel mit leichtem Blooming
4.2	Histogrammlinearisierung und Resultate
4.3	Ansprechverhalten der IATS-Kamera im Innenraum bei Graustufenbildern und bei Farbbildern 54
4.4	Farbtestmuster unter Kunstlicht im Original und nach dem manuellen Weißabgleich 55
4.5	Segmentierungsintervalle der Grundfarben in den einzelnen Kanälen 57
4.6	Testfeld mit unterschiedlichen Texturen und das rotationsinvariante Laws-Bild LRRL 60

4.7	Farbtestmuster in Graustufen und zugehöriges Histogramm	61
4.8	HDS-Zielmarkierung und Extraktionsergebnisse nach formbasierten Merkmalen	63
4.9	$Template\ eines\ Kirchturmkreuzes\ auf\ verschiedenen\ Hierarchiestufen\ einer\ Bildpyramide\ \ .\ .$	66
5.1	Abbild eines Siemenssterns durch die Okularkamera	71
5.2	Untersuchung der horizontalen Bildauflösung	73
5.3	Untersuchung der horizontalen Bildauflösung (fein)	73
5.4	Untersuchung der vertikalen Bildauflösung	74
5.5	Untersuchung der vertikalen Bildauflösung (fein)	74
5.6	Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die Tachymeter-Richtungen .	76
5.7	Auswirkungen der Erwärmung der Kamerakomponenten auf die Tachymeter-Richtungen	76
5.8	Auswirkungen der Erwärmung der Kamerakomponenten auf die gemessenen Richtungen	77
5.9	Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die Bildposition	78
5.10	Auswirkungen der Erwärmung der Tachymeterkomponenten auf die gemessenen Richtungen .	78
5.11	Kombinierte Aufwärmeffekte auf die Kameramessung	79
5.12	Identische HDS-Zielmarke unter verschiedenen Blickwinkeln	80
5.13	Ausgewerteter Würfel mit HDS-Zielmarken	81
5.14	IR-Diode mit deutlich sichtbarem Strahlungs-Blob	82
5.15	Wiederholgenauigkeit bei Messung auf eine HDS-Zieltafel (Mittelwert und Median)	82
5.16	Wiederholgenauigkeit bei Messung auf eine Infrarot-Diode (Mittelwert und Median)	83
5.17	Überlappungsbereich zweier Kamerabilder	84
5.18	Empirische Schärfentiefebereiche unterschiedlicher Fokussierungen	85
5.19	Modell für ein Kantenmatching an einem Felsen und Detailausschnitt	88
5.20	Synthetische HDS-Zielmarke als Matching-Prototyp und Verteilung der Matchingergebnisse über	
	mehrere Bilder	90
5.21	$Trackingmessung\ eines\ Matchingpunktes\ "uber\ einer\ stark\ befahrenen\ Straße\ .\ .\ .\ .\ .$	92
5.22	IR-Blobs und die zugeordnete Fläche	92
6.1	Entfernungsschätzung aus Abbildungsmaßstab	100
6.2	Die Rotationsachse a als Schnitt der streckenhalbierenden Ebenen zwischen Punktepaaren vor	
	und nach der Rotation	101
6.3	Projektion der Rotationsspur als Ellipse aus schiefem Kegelschnitt	102
6.4	Projektion der Rotationsspur bei Rotationsachse senkrecht zur Zielachse	103
6.5	Abweichungen der im Bild bestimmten Rotationen von den Sollwerten	104
6.6	Biegungsauswertung eines Metallstabs	106
6.7	Aus Kartonagen erstelltes 3D-Objekt mit acht verteilten Messmarken	111
6.8	Restklaffungen bei unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen	113
6.9	Reduktion eines VPP durch zwei RPP bei der Affintransformation	117
6.10	Lageprüfung mit Videotachymetrie	120
6.11	Ausgewertetes Abbild eines vertikalen Linienlasers an einer Stufenkante	121
6.12	Rissverfolgung mit der IATS	122
6.13	Schwingungsmessung einer frei gelagerten Schiene mittels Matching einer Schwelle	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter der ausgleichenden Funktionen für die Kamerakonstante	34
3.2	Bestimmung der Kollimatorbrennweite durch Messung	37
3.3	Die Parameter der Kalibrierung nach dem Ansatz von Vogel	39
3.4	$Standardabweichungen \ der \ verwendeten \ Parameter \ nach \ dem \ Ansatz \ von \ Vogel \ . \ . \ .$	41
3.5	Die Parameter der Kalibrierung nach dem Ansatz von Walser	43
3.6	Standardabweichungen der Parameter nach dem Ansatz von Walser	46
5.1	Schärfentiefeintervalle in unterschiedlichen Entfernungen	85
5.2	$Matchingergebnisse \ unter \ Refraktions einfluss \ nach \ Abb. 5.19$	89
5.3	$Matchingergebnisse \ unter \ Refraktions einfluss \ des \ Details \ nach \ Abb. 5.19$	89
5.4	$Matchingergebnisse \ unter \ Refraktions einfluss \ nach \ Abb. 5.20 \ im \ Farbbild \ . \ . \ . \ . \ . \ .$	91
5.5	$Matchingergebnisse\ unter\ Refraktionseinfluss\ nach\ Abb.5.20\ im\ Grauwertbild\ .\ .\ .\ .\ .$	91
5.6	Schwerpunktsuche der IR-Diode in den Abbildungen 5.22	93
6.1	Geschätzte Parameter bei unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen	112

A Formelsätze

A.1 Formelsatz von Vogel

Die folgenden Formelsätze folgen dem Abschnitt 4.4 aus [Vogel 06]. An einigen Stellen erfolgten Änderungen gegenüber dem Original; diese sind hier gesondert beschrieben.

Die Korrekturwerte z_0 und c_0 des Projektionszentrums von der theoretischen Zielachse wirken wie ein Höhenindex- bzw. Zielachsfehler; zusammen mit dem Kippachsfehler i gilt für die Richtung zum Projektionszentrum

$$V_0 = V_{I/II} + z_0 \tag{A.1}$$

$$Hz_0 = Hz_{I/II} + \frac{c_0}{\sin V_0} + i \cdot \cot V_0 \tag{A.2}$$

sodass sich dieses nach (3.15) schreiben lässt als

$$O = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_0 \cdot \sin(V_0) \cdot \sin(Hz_0) \\ S_0 \cdot \sin(V_0) \cdot \cos(Hz_0) \\ S_0 \cdot \cos(V_0) \end{bmatrix}$$
(A.3)

Da der Original-Formelsatz von Vogel die Definition der Hz-Richtung entgegen der mathematischen Konvention von der Y- in Richtung der X-Achse des übergeordneten Systems einführt (vgl. Abb. 4-24 dort), wird hier das Vorzeichen der X-Komponente geändert, um die ausgeglichenen Hz-Winkel vorzeichenrichtig zu ermitteln. Damit bleibt das Rechtssystem des Formelsatzes erhalten, und die beobachteten Tachymeter-Richtungen können direkt verwendet werden. Analog gilt für die Passpunktkoordinaten:

$$P = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -S_P \cdot \sin(V_P) \cdot \sin(Hz_P) \\ S_P \cdot \sin(V_P) \cdot \cos(Hz_P) \\ S_P \cdot \cos(V_P) \end{bmatrix}$$
(A.4)

Für die Parameter der inneren Orientierung gelten die Gleichungen (3.7) und (3.8) sowie (3.9) bis zum ersten Glied. Diese Größen fungieren als Eingangsgrößen für die Kollinearitätsgleichungen.

Für die tachymeter-gebundenen Rotationen gelte als Ausgangssituation die Abbildung 4-23 bei Vogel. Die Y-Achse eines Tachymeter-Rechtssystems zeige o.B.d.A. zur Nullrichtung, die Z-Achse in den Zenit. Das Kamerasystem sei als dazu paralleles Rechtssystem ausgerichtet, wobei die Aufnahmerichtung nach oben zeigt.

Die erste Rotation sei die um die Stehachse mit dem korrigierten Winkel

$$Hz_{K} = Hz_{I/II} + \frac{c_{F}}{\sin(V_{0})} + i \cdot \cot(V_{0})$$
(A.5)

um die z'-Achse des Bildkoordinatensystems mittels

$$R_{\kappa}(Hz_K) = \begin{bmatrix} \cos(-Hz_K) & \sin(-Hz_K) & 0\\ -\sin(-Hz_K) & \cos(-Hz_K) & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(A.6)

Da diese Drehung jedoch noch unabhängig von der späteren Zenitdistanz zum Zielpunkt ist und somit die Projektionen zweier Richtungen in die Horizontalebene betrifft, muss der Winkel hier nicht um den Kippachsfehler korrigiert werden. Die kleine Zusatzdrehung wird ausreichend durch die nächste Rotation (A.7) bewirkt.

$$R_{\varphi}(i) = \begin{bmatrix} \cos(i) & 0 & \sin(i) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(i) & 0 & \cos(i) \end{bmatrix}$$
(A.7)

Korrekterweise muss also entweder Gleichung (A.5) lauten:

$$Hz_K = Hz_{I/II} + \frac{c_F}{\sin(V_0)} \tag{A.8}$$

oder die Gleichung (A.7) ist zu streichen.

Als dritte Rotation folgt die Drehung der Z-Achse aus dem Zenit mittels des Vertikalwinkels. Da die Abbildung am Ende als Bildpositiv nach Abbildung 4-24 wirken soll, ist eine zusätzliche Korrektur um 200 gon nötig.

$$R_{\omega}(V_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(200^{\text{gon}} - V_0) & -\sin(200^{\text{gon}} - V_0) \\ 0 & \sin(200^{\text{gon}} - V_0) & \cos(200^{\text{gon}} - V_0) \end{bmatrix}$$
(A.9)

Die Drehung um den Zielachsfehler ist bereits ausreichend in Gleichung (A.5) berücksichtigt (als die Z-Achse noch parallel zur Stehachse des Tachymeters war) und Gleichung (A.10) ist daher zu streichen.

$$R_{\varphi}(c_F) = \begin{bmatrix} \cos(c_F) & 0 & \sin(c_F) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(c_F) & 0 & \cos(c_F) \end{bmatrix}$$
(A.10)

Am Ende schließlich folgen die Restdrehungen um die Parameter ω , φ und κ , welche der Rotationsmatrix (3.13) folgen:

$$R_{\omega\varphi\kappa} = R_{\omega} \cdot R_{\varphi} \cdot R_{\kappa}$$

$$R_{\omega\varphi\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi\\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\cos\varphi\\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} (A.11)$$

Die gesamte Rotation lautet dann

$$\mathbf{R} = R_{\kappa}(Hz_K) \cdot R_{\varphi}(i) \cdot R_{\omega}(V_0) \cdot R_{\omega} \cdot R_{\varphi} \cdot R_{\kappa}$$
(A.12)

und stellt die Elemente r_{ij} der Drehmatrix für die Kollinearitätsgleichungen.

A.2 Formelsatz von Walser

Die folgenden Formelsätze folgen dem Abschnitt 4.3 aus [Walser 05].

Ausgangspunkt ist die fehlerbehaftete Rohmessung zu einem Passpunkt $(Hz_{I/II}, V_{I/II})$, die im ersten Schritt um die Korrekturen der Achsfehler verbessert wird

$$V_{TC} = V_{I/II} - e_1 \tag{A.13}$$

$$Hz_{TC} = Hz_{I/II} - \frac{e_2}{\sin V_{TC}} + e_3 \cdot \cot V_{TC}$$
(A.14)

Die Rotationsmatrix \mathbf{R} beschreibt die Drehungen, die notwendig sind, um einen Richtungsvektor aus dem System der Tachymeterachsen in ein übergeordnetes System zu transformieren. Dabei zeigt die z-Achse des Tachymetersystems zur Bildebene.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\sin Hz_{TC} & -\cos Hz_{TC} \cos V_{TC} & -\cos Hz_{TC} \sin V_{TC} \\ -\cos Hz_{TC} & \sin Hz_{TC} \cos V_{TC} & \sin Hz_{TC} \sin V_{TC} \\ 0 & \sin V_{TC} & -\cos V_{TC} \end{bmatrix}$$
(A.15)

Für den unbekannten wahren Richtungsvektor vom Tachymeter zum PasspunktQgilt im übergeordneten System

$$\mathbf{v}_Q = \begin{bmatrix} \cos H z_Q \sin V_Q \\ -\sin H z_Q \sin V_Q \\ \cos V_Q \end{bmatrix}$$
(A.16)

und transformiert ins Tachymetersystem mittels ${\bf R}$

$$\mathbf{v}_Q^{Th} = \mathbf{R}^T \cdot \mathbf{v}_Q \tag{A.17}$$

Über den bekannten Abstand D zum Passpunkt lässt sich die Basislinie im Tachymetersystem bestimmen:

$$\mathbf{r}_Q^{Th} = D \cdot \mathbf{v}_Q^{Th} \tag{A.18}$$

Allerdings ist dies nicht notwendig, da der Maßstab bereits durch die bekannte Kamerakonstante eingeführt wird. Die Abbildung auf dem Kamerachip wird durch einen affinen Ansatz mit einem Maßstab je Achse, einem Scherungsparameter und einer Rotation um die Chipnormale beschrieben:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$
(A.19)

Nach etlichen Vereinfachungen in den folgenden Zwischenschritten, die vor allem durch das geringe Gesichtsfeld eines Tachymeterfernrohr möglich werden, folgt schließlich als sehr starke Reduktion der Kollinearitätsgleichungen die Abbildung auf die Bildebene

$$x^{B} = -c \cdot \frac{a_{11} \cdot x_Q^{Th} + a_{12} \cdot y_Q^{Th}}{z_Q^{Th}}$$
(A.20)

$$y^{B} = -c \cdot \frac{a_{21} \cdot x_Q^{Th} + a_{22} \cdot y_Q^{Th}}{z_Q^{Th}}$$
(A.21)
und schließlich noch die Transformation ins linkshändische Pixelsystem mit Ursprung in der linken oberen Ecke

$$x = x^B / psx + x_0 \tag{A.22}$$

$$y = y^B / psy + y_0 \tag{A.23}$$

wobei psx, psy die Pixeldimensionen beschreiben und x_0, y_0 den Bildhauptpunkt.

Mit diesem Ansatz ist es möglich, Kalibrierparameter bezogen auf ein beliebiges Bildhauptpunkt-Pixel zu bestimmen. In der Folge und bei vorhandenen Kalibrierparametern leisten die hier angeführten Schritte bzw. ihre Umkehrung zusätzlich die Umrechnung zwischen Pixelkoordinaten und absoluten Raumrichtungen.

A.3 Ableitungen polarer Beobachtungsgleichungen bei einer Ähnlichkeitstransformation

Es seien die beobachteten Richtungen bereits im gemeinsamen Bezugssystem von Messgerät und Zielobjekt orientiert (Orientierungsunbekannte berücksichtigt). Der Instrumentenstandpunkt habe die Koordinaten $S = (y_S, x_S, z_S)^T$.

Dann gilt für Horizontalrichtungen unter Verwendung lediglich kleiner Drehwinkel die Funktionalgleichung

$$Hz = \arctan \frac{y_0 + \varepsilon_z x + my - \varepsilon_x z - y_S}{x_0 + mx - \varepsilon_z y + \varepsilon_y z - x_S}$$
(A.24)

welche der Übersichtlichkeit halber folgendermaßen substituiert wird:

$$Hz = \arctan A = \arctan \frac{Z}{N}$$

Die entsprechenden Ableitungen nach den unbekannten Parametern der Transformation ergeben sich dann zu

$$\frac{\partial Hz}{\partial x_0} = \frac{-Z}{(1+A^2)N^2} \tag{A.25}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial y_0} = \frac{1}{(1+A^2)N} \tag{A.26}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial z_0} = 0 \tag{A.27}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial \varepsilon_x} = \frac{-z}{(1+A^2)N} \tag{A.28}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial \varepsilon_y} = \frac{-Z \cdot z}{(1+A^2)N^2} \tag{A.29}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial \varepsilon_z} = \frac{N \cdot x + Z \cdot y}{(1+A^2)N^2} \tag{A.30}$$

$$\frac{\partial Hz}{\partial m} = \frac{N \cdot y - Z \cdot x}{(1+A^2)N^2} \tag{A.31}$$

Für die Zenitwinkelbeobachtungen gilt

$$V = \arccos \frac{z_0 - \varepsilon_y x + \varepsilon_x y + mz - z_S}{\sqrt{(y_0 + \varepsilon_z x + my - \varepsilon_x z - y_S)^2 + (x_0 + mx - \varepsilon_z y + \varepsilon_y z - x_S)^2 + (z_0 - \varepsilon_y x + \varepsilon_x y + mz - z_S)^2}}$$
(A.32)

und mit Substitution

$$V = \arccos A = \arccos \frac{Z}{N}$$

Die Ableitungen lauten

$$\frac{\partial V}{\partial x_0} = \frac{Z(x_0 + mx - \varepsilon_z y + \varepsilon_y z - x_S)}{\sqrt{(1 - A^2)N^3}}$$
(A.33)

$$\frac{\partial V}{\partial y_0} = \frac{Z(y_0 + \varepsilon_z x + my - \varepsilon_x z - y_S)}{\sqrt{(1 - A^2)N^3}}$$
(A.34)

$$\frac{\partial V}{\partial z_0} = \frac{-N + \frac{Z^2}{N}}{\sqrt{(1-A^2)N^2}} \tag{A.35}$$

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_x} = \frac{-N \cdot y + \frac{Z}{N} (\varepsilon_x z^2 - y 0_z - \varepsilon_z x z + \varepsilon_x y^2 + z_0 y - \varepsilon_y x z)}{\sqrt{(1 - A^2)} N^2}$$
(A.36)

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_y} = \frac{N \cdot x + \frac{Z}{N} (\varepsilon_y z^2 + x_0 z - \varepsilon_z y z + \varepsilon_y x^2 - z_0 x - \varepsilon_x x y)}{\sqrt{(1 - A^2)} N^2}$$
(A.37)

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_z} = \frac{Z(\varepsilon_z y^2 - x_0 y - \varepsilon_y yz + \varepsilon_z x^2 + y_0 x - \varepsilon_x xz)}{\sqrt{(1 - A^2)} N^3}$$
(A.38)

$$\frac{\partial V}{\partial m} = \frac{-N \cdot z + \frac{Z}{N}(mx^2 + x_0x + my^2 + y_0y + mz^2 + z_0z)}{\sqrt{(1 - A^2)N^2}}$$
(A.39)

Die Raumstrecke bestimmt sich nach Pythagoras aus

$$D = \sqrt{\frac{(y_0 + \varepsilon_z x + my - \varepsilon_x z - y_S)^2 + (x_0 + mx - \varepsilon_z y + \varepsilon_y z - x_S)^2 + (z_0 - \varepsilon_y x + \varepsilon_x y + mz - z_S)^2}}$$
(A.40)

mit den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial D}{\partial x_0} = \frac{x_0 + mx - \varepsilon_z y + \varepsilon_y z - x_S}{D} \tag{A.41}$$

$$\frac{\partial D}{\partial y_0} = \frac{y_0 + \varepsilon_z x + my - \varepsilon_x z - y_S}{D} \tag{A.42}$$

$$\frac{\partial D}{\partial z_0} = \frac{z_0 + mz + \varepsilon_x y - \varepsilon_y x - z_S}{D} \tag{A.43}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_x z^2 - y_0 z - \varepsilon_z x z + \varepsilon_x y^2 + z_0 y - \varepsilon_y x y}{D} \tag{A.44}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_y z^2 + x_0 z - \varepsilon_z y z + \varepsilon_y x^2 - z_0 x - \varepsilon_x x y}{D} \tag{A.45}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \varepsilon_z} = \frac{\varepsilon_z y^2 - x_0 y - \varepsilon_y y z + \varepsilon_z x^2 + y_0 x - \varepsilon_x x z}{D}$$
(A.46)

$$\frac{\partial D}{\partial m} = \frac{m(x^2 + y^2 + z^2) + x_0 x + y_0 y + z_0 z}{D}$$
(A.47)

B Abkürzungsverzeichnis

ATR	Automatic Target Recognition
Blob	Binary Large Object
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EDM	Electronic Distance Measurement
EGL	Electronic Guiding Light
fps	Frames per second
HDS	High Definition Surveying
IATS	Image Assisted Total Station
LUT	Look-Up-Table
LoG	Laplacian-of-Gaussian-[Filter]
LSM	Least Squares Matching
Ool	Object(s) of Interest
Pol	Point(s) of Interest
Rol	Region(s) of Interest
RPP	Richtungspasspunkt
VPP	Vollpasspunkt

Dank

Die vorliegende Arbeit ist das aktuelle Zwischenergebnis meines nun bereits viele Jahre dauernden besonderen Interesses an der Bildanalyse in der Ingenieurgeodäsie. Geweckt wurde dieses nicht zuletzt durch die latente Rivalität der beiden geodätischen Kernkompetenzen "Photogrammetrie" und "Ingenieurgeodäsie", die ich persönlich aber stets eher als gegenseitige Ergänzung denn als Widerspruch erfahren habe. Bereits die Anfertigung meiner Diplomarbeit hatte ich daher diesem Themenkomplex verschrieben; umso mehr bereitet mir die aktuelle Entwicklung auf dem kommerziellen Instrumentenmarkt, die verstärkt auf die Einbindung von Bildinformation in den Messablauf setzt, große Freude. Zwar gibt es seit langem wissenschaftliche Forschung in diesem Sektor; durchsetzungsfähige Anwendungen entstehen jedoch nur, wenn die notwendige Sensorik in ausreichender industrieller Qualität zur Verfügung steht. Die Möglichkeit, mich im Rahmen eines Forschungsprojekts mit einem innovativen Prototyp einer Videototalstation kreativ auseinandersetzen zu können, habe ich daher gerne ergriffen. Dieses Instrument verbindet zum ersten Mal die Vorteile der Tachymetrie mit einem leistungsfähigen und hochauflösenden Bildsensor, und kann so als Grundlage für wissenschaftliche Fragestellungen im Bereich der Präzisionsvermessung dienen. Ein kleiner Ausschnitt aus diesem Bereich wird in der Folge näher betrachtet.

An dieser Stelle – bewusst der eigenen Arbeit vorangesetzt – möchte ich auch denjenigen Personen danken, die zu deren Gelingen beigetragen haben. Mein erster Dank gebührt Herrn Prof. Thomas Wunderlich, dessen Vertrauen in meine Person seit vielen Jahren die notwendige Basis für das berufliche Voranschreiten ist. Daneben danke ich Herrn Prof. Orhan Altan für die Übernahme der Zweitbegutachtung und Herrn Prof. Klaus Schnädelbach sowie Herrn Dr. Rainer Kuch für die regelmäßigen Motivationsschübe.

Herrn Jürgen Mayer von Leica Geosystems danke ich für die Hilfestellungen mit dem Prototyp wo immer es ihm möglich war. Meinen Kollegen und Freunden am Lehrstuhl für Geodäsie möchte ich für die konstruktiven Gespräche ebenso danken wie für die Tatsache, dass sie mir in der Entstehungszeit dieser Arbeit vermehrt den Rücken von anfallenden Übungsverpflichtungen und so mancher Projektarbeit freigehalten haben. Namentlich erwähnen möchte ich den Meister unserer feinmechanischen Werkstatt, Herrn Helmut Schreyer, der nicht nur einmal eine Lösung für meine Wünsche gefunden und gefertigt hatte, bevor mir diese selbst vollständig klar waren. Der selbstverständliche und angenehme Zusammenhalt am Lehrstuhl war als Grundlage für eine produktive Arbeitsleistung durch nichts zu ersetzen.

Die Anschaffung des Videotachymeter-Prototyps, der im Rahmen vorliegender Arbeit untersucht wurde, geschah mit Mitteln aus dem geowissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsprogramm GEOTECHNOLOGIEN unter Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Der Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München ist daran im Forschungsschwerpunkt "Frühwarnsysteme im Erdmanagement" mit dem Projekt "alpEWAS – Development and Testing of an Integrative 3D Early Warning System for Alpine Instabile Slopes" beteiligt.