Reihe C Dissertationen Heft Nr. 655

Stefan Knoblach

Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters

München 2011

ISSN 0065-5325

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 655

Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters

Von der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen Universität Dresden vorgelegte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Knoblach

München 2011

in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5067-9

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:



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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser
 Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand

Tag der Verteidigung: 20.10.2009

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5067-9

Kurzfassung

Trotz aller technischen Weiterentwicklungen in der Vergangenheit unterscheiden sich moderne elektronische Tachymeter in ihrer Grundkonstruktion nicht wesentlich von ihren analogen Vorgängern. Ihnen allen ist gemeinsam, dass eine Visur um den Nadir nicht möglich ist. Dies bedeutet, dass Punkte, welche sich in einem Zenitwinkelbereich zwischen ca. 170 und 230 gon befinden, nicht direkt gemessen werden können.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung eines Systems, mit welchem tachymetrische Messungen auch in einem Zenitwinkelbereich zwischen 170 und 230 gon möglich sind. Das Konzept basiert auf dem aus dem Markscheidewesen bekannten Hängetheodolit. Um Messungen im Bereich des Nadirs durchführen zu können, wird ein Tachymeter ähnlich einem Hängetheodolit in hängender Position montiert. In dieser Position ist der zur Horizontierung dienende interne elektronische Neigungskompensator jedoch nicht funktionsfähig. Die Horizontierung wird daher extern überwacht. Zu diesem Zweck wird das Tachymeter über eine geeignete Aufhängevorrichtung mit einem Neigungssensor verbunden. Die Kombination aus in hängender Position montiertem Tachymeter und externem Neigungssensor wird als Hängetachymeter bezeichnet.

Bei der Kombination des Systems mit einem externen Neigungssensor kann eine geringe Abweichung zwischen der Stehachse des Tachymeters und der Lotachse des Neigungssensors fertigungsbedingt nicht vermieden werden. Zur Bestimmung dieser Abweichung wurden geeignete Verfahren entwickelt und auf ihre Genauigkeit untersucht.

Die mit dem Tachymeter ermittelten Messwerte werden durch Instrumentenabweichungen beeinflusst und müssen um diese korrigiert werden. Auch sind die Messwerte um die mit dem externen Neigungssensor ermittelte Stehachsenneigung zu korrigieren. Die Achsenabweichungen des Tachymeters müssen in hängender Position bestimmt werden. Es kann nicht generell vorausgesetzt werden, dass diese mit den in aufrechter Position bestimmten Werten übereinstimmen.

Zur Steuerung des Hängetachymeters wurde eine Software entwickelt, in welche die Kalibrierung der Sensoren, die Auswertung und Korrektur der Messwerte, deren Speicherung und Weiterverarbeitung sowie der Datenexport integriert wurden.

Eine Kombination des Hängetachymeters mit einer Okularkamera ermöglicht die automatische Zielerkennung und -verfolgung nichtsignalisierter Punkte auch bei Messungen nahe dem Nadir. Zur Realisierung eines Autofokus wurde das Hängetachymeter mit einem Schrittmotor kombiniert, welcher über den Fokussierring des Tachymeters die Fokussierlinse bewegt. Eine Autofokusfunktion wurde auf Grundlage des Bildkontrastes entwickelt.

Die Kalibrierung der Okularkamera basiert auf einer Modellierung des Abbildungsprozesses durch lineare Funktionen. Hierbei wurde die Abhängigkeit der Kalibrierwerte von der Position der Fokussierlinse (Position des Schrittmotors) aufgezeigt.

Die zur optischen Zielerkennung eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen gliedern sich in eine manuelle Punktanzielung im Bild, die Messung punktförmiger Muster durch Kantendetektion und Ellipsenanpassung und Bildzuordnungsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Um die Leistungsfähigkeit des Hängetachymeters zu bestimmen, aber auch um die Güte der Kalibrierung zu testen, wurden mehrere Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Abschließend wurde das Hängetachymeter auch erfolgreich in der Industrievermessung eingesetzt und eine automatische Kalibrierroutine ohne Interaktion des Benutzers entwickelt. Die erreichten Genauigkeiten des Systems liegen im Bereich der Genauigkeiten des eingesetzten Tachymeters.

Abstract

Despite all technical enhancements in the past modern electronic tacheometers do not differ significantly to their analogue predecessors. All have in common that aiming around the nadir is not possible. This means that points situated in the zenith angle region between ca. 170 to 230 gon cannot be measured directly.

Therefore the subject of the present work was the development of a system that makes measurements in the zenith angle region between 170 and 230 gon possible. The concept is based upon the suspended theodolite which is known in mine-surveying. To carry out measurements in the region of the nadir a total station is mounted in a hanging position similar to a suspended theodolite. However the function of the tilt compensator which is used for levelling of the instrument is not supported in this position. Hence inclination is monitored externally. For this purpose the tacheometer is connected to a clinometer by an appropriate suspension arrangement. The combination of a tacheometer mounted in a suspended position and an external clinometer is called suspended tacheometer.

Combining the system with an external clinometer a marginal variation occurs between the vertical axis of the tacheometer and the plummet axis of the clinometer due to production conditions. To quantify this variation an appropriate method was developed and its accuracy tested.

Measurements conducted by the tacheometer are influenced by the variations of the instrument and must therefore be adjusted. Moreover these measurements must be adjusted by the inclination detected by the external clinometer. The axis variations of the tacheometer must be determined in suspended position. It cannot be generally presumed that these measurements comply with the ones determined in upright position.

To actuate the suspended tacheometer a software was developed. This software also offers integrated functions for calibration of the sensors, analysis and adjustment of the measurements and their storage and processing as well as export of data.

A combination of the suspended tacheometer with an ocular camera makes automatic target detection and tracking of non-cooperative signals possible also when measuring near the region of the nadir. To realize an autofocus the suspended tacheometer was combined with a stepper motor which moves the focus lens. Based on the image contrast an autofocus function was developed.

The calibration of the ocular camera is based on modelling the mapping process by linear functions. Here the dependency of calibration values on the position of the focus lens (position of the stepping motor) was demonstrated.

Image processing algorithms used for optical target detection can be divided into manual target detection in the image, measurement of point-shaped patterns by edge detection and ellipse adjustment and image allocation operations (Least squares matching).

To determine the efficiency of the suspended tacheometer as well as to test the performance of the calibration several accuracy tests were performed. Also the suspended tacheometer was successfully deployed in industrial surveying. An automatic calibration routine without participation of a user was developed. The achieved accuracies of the system correspond with the accuracies of the inserted tacheometer.

Inhaltsverzeichnis 7

Inhaltsverzeichnis

1	Einf	ihrung	13
	1.1	Motivation	13
	1.2	Ziel der Arbeit	16
2	Gru	ndlagen	19
	2.1	Verfahren der vertikalen Punktübertragung	19
		2.1.1 Mechanische Punktübertragung	20
		2.1.2 Optische Punktübertragung	23
		2.1.3 Trägheitsmesssysteme	31
	2.2	Verfahren der vertikalen Richtungsübertragung	32
		2.2.1 Lotung	32
		2.2.2 Richtungsübertragung mit optischen Ebenen	33
		2.2.3 Trägheitsmesssysteme	35
	2.3	Verlauf der Lotlinie	37
		2.3.1 Schwerefeldmodell	37
		2.3.2 Topographiemodell	40
	2.4	Refraktion im vertikalen Schacht	40
	2.5	Einflüsse auf die Richtungs- und Winkelmessung mit dem Tachymeter	44
		2.5.1 Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung	45
		2.5.2 Höhenindexabweichung	49
		2.5.3 Stehachsenneigung	51
		2.5.4 Besonderheiten bei Messungen nahe dem Zenit bzw. Nadir	58
3	Ent	vicklung eines Hängetachymeters	63
	3.1	Konstruktion	64
		3.1.1 Sensoren	64
		3.1.2 Aufhängevorrichtung	70
	3.2	Mathematische Korrektur der Messwerte	72
		3.2.1 Koordinatensysteme	73
		3.2.2 Mess- und Kalibrierwerte	74
		3.2.3 Korrekturalgorithmus	77

8 Inhaltsverzeichnis

	3.3	Kalibri	erung	. 79
		3.3.1	Kalibrierung des Richtungslasers	. 79
		3.3.2	Kalibrierung der Instrumentenabweichungen	. 80
		3.3.3	Kalibrierung des Neigungssensors	. 83
		3.3.4	Vergleich der Kalibrierung mit Zenitlot und Transformation	. 88
	3.4	Steueru	ingssoftware HTSoft	. 90
4	Kon	ıbinatio	n des Hängetachymeters mit einem CCD-Sensor	93
	4.1	Konstr	uktion der Okularkamera	. 93
	4.2	Fokus		. 96
		4.2.1	Konstruktion	. 96
		4.2.2	Kontrastbasierter Autofokus	. 97
		4.2.3	Algorithmus zur Bestimmung des Kontrastmaximums	. 98
	4.3	Kalibri	erung	. 100
	4.4	Verfah	ren zur Bildauswertung und Punktbestimmung	. 108
		4.4.1	Manuelle Punktanzielung im Bild	. 108
		4.4.2	Messung punktförmiger Muster	. 110
		4.4.3	Least Squares Matching	. 114
	4.5	Stabilit	ätsuntersuchungen	. 117
5	Gen	auigkeit	suntersuchungen und Anwendungsfälle	121
	5.1	Aufnah	nme geometrischer Objekte	. 121
	5.2	Zentrie	rung über einem Punkt	. 122
	5.3	Verglei	chsmessungen im Passpunktfeld	. 124
	5.4	Netzmo	essung im Überwachungsnetz einer Staumauer	. 126
	5.5	Lotung	smessungen in Bergwerkschacht	. 128
	5.6	Einsatz	des Hängetachymeters in der Industrievermessung	. 130
6	Zusa	ammenf	assung und Ausblick	135
Li	teratı	ırverzei	chnis	139

Abbildungsverzeichnis

2.1	Pendellotung - Lotdraht mit Dämpfungsbehälter	20
2.2	Schwimmlot	21
2.3	Referenzpendel	22
2.4	Strahlenverlauf im Tachymeteraufsatzsystem ArgusTA	27
2.5	Lotung mittels Zenitwinkelmessung	28
2.6	Gemessene Zenitwinkel als Funktion der Horizontalkreisablesungen	29
2.7	Prinzip eines inertialen Sensors	32
2.8	Alignier- und Polarisationsverfahren	34
2.9	Isothermen im oberen Schachtteil und Ablenkung des Zielstrahls	42
2.10	Tachymeterachsen	44
2.11	Bezugssystem zur Bestimmung des Einflusses der Achsenabweichungen	45
2.12	Zielachsenabweichung	46
2.13	Kippachsenneigung	47
2.14	Bestimmung der Höhenindexabweichung	50
2.15	Stehachsenneigung	51
2.16	Einfluss der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse	52
2.17	Einfluss der Stehachsenneigung in Richtung der Zielachse	53
2.18	Tachymeter mit externem Neigungssensor	55
2.19	Berechnung des Anteils der Stehachsenneigung durch eine ebene Transformation	57
2.20	Berechnung des Anteils der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse	58
2.21	Durch die Zielachse nicht erfassbarer Bereich um den Zenit bzw. Nadir	59
2.22	Einfluss der Achsenabweichungen auf die Horizontalrichtungsbestimmung	60
2.23	Einfluss der Anzielabweichung auf die Horizontalrichtungsbestimmung	61
3.1	Lagerung der Stehachse	66
3.2	Der verwendete Neigungssensor Nivel20	67
3.3	Neigungsmessung mit Nivel20 im Messlabor	69
3.4	Die Aufhängevorrichtung des Hängetachymeters	70
3.5	Verbindungselemente des Gehäuses an Ober- und Unterseite	71
3.6	Nachweis der Unwucht des Tachymeters	72
3.7	Hängetachymeter mit Koordinatenachsen	73
3.8	Am Tachymeter abgelesene Werte des Horizontal- und Vertikalkreises	74

3.9	Die Drehwinkel des Neigungssensors
3.10	Offset des Neigungssensors
3.11	Rotation des Neigungssensors um seine Stehachse
3.12	Bestimmung der Ausrichtung des Neigungssensors mit Hilfe des Richtungslasers 76
3.13	Transformation der mit dem Tachymeter bestimmten Teilkreisablesungen 77
3.14	Kalibrierung des Richtungslasers
3.15	Bestimmung der Achsenabweichungen des Tachymeters
3.16	Lagerung der Kippachse
3.17	Bestimmung der Offsetwerte mit einem Zenitlot
3.18	Bestimmung der Offsetwerte mit einem Zenitlot - Verfahrensablauf
3.19	Bestimmung der Offsetwerte mit einem Nivellierinstrument
3.20	Bestimmung der Offsetwerte mit einer Ähnlichkeitstransformation 87
3.21	Ergebnisse der Kalibrierung des Neigungssensors
4.1	Schematische Darstellung einer Okularkamera
4.2	Modifizierte CCD-Kamera AVT Guppy F-080B
4.3	Steuerung der Fokussierung des Tachymeters
4.4	Kontrastmaxima bei positver und negativer Fokussierrichtung
4.5	Positionen des Kontrastmaximums in Abhängigkeit zur Zielweite
4.6	Definition des Projektionszentrums und der Kamerakonstante
4.7	Abstand zwischen Projektionszentrum und Stehachse des Tachymeters
4.8	Transformation zwischen Abbild und Richtung
4.9	Parameter a_{11} und a_{22} in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse 106
4.10	Koordinaten des Punktes ZA in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse 107
4.11	Vergrößerung und manuelle Anzielung
4.12	Segmentierung zur Näherungswertbestimmung
4.13	Bestimmung des Zielpunktzentrums mittels Ellipsenausgleichung
4.14	Stabilitätsuntersuchung
5.1	Auf einer Kreisbahn drehbare Zielpunkte
5.2	Zentrierung über einem Bodenpunkt
5.3	Passpunktfeld der TU Dresden
5.4	Messungen mit dem Hängetachymeter im Passpunktfeld
5.5	Lage der Punkte und Beobachtungsanordnung
5.6	Hängetachymeter im Zentrierrahmen
5.7	Lotungsmessung im Berkwerkschacht
5.8	Messaufbau und Lage der einzelnen Komponenten
5.9	Einsatz des Hängetachymeters in der Industrievermessung
5.10	Messlabor für Industrievermessungen

Tabellenverzeichnis 11

Tabellenverzeichnis

2.1	Einfluss der Stehachsenneigung auf die Richtungsbestimmung	55
2.2	Ergebnisse der Berechnung der Anteile der Stehachsenneigung	58
2.3	Standardabweichung der Zielachsenabw. und Kippachsenneigung bei steiler Zielung	59
3.1	Technische Daten der verwendeten Tachymeter	65
3.2	Nivel20 - Vom Hersteller angegebene Systemgenauigkeiten	68
3.3	Achsenabweichungen der Tachymeter	81
3.4	Mittelwerte und Standardabweichungen der Offsetwerte	90
4.1	Kameraspezifikationen AVT Guppy F-080B	94
5.1	Kreisradien und deren Standardabweichungen	122
5.2	Ergebnisse der Vergleichsmessungen im Passpunktfeld	125
5.3	Ergebnisse der Lotungsmessungen im Bergwerkschacht	129
5 4	Präzision des eingesetzten Hängetachymeters	132

1 Einführung

1.1 Motivation

Eine Vielzahl geodätischer Messverfahren nutzt zur technischen Umsetzung die Tachymetrie. Dieser Bereich erfuhr in der Vergangenheit eine stetige Weiterentwicklung. Ausgelöst wurde dies durch die permanente Nachfrage nach höherer Genauigkeit bei schneller und robuster Verarbeitung der Messergebnisse und gleichzeitig einfacher Handhabung.

Einen Meilenstein bei dieser Entwicklung stellten die Arbeiten zur Integration einer digitalen Kamera in elektronische Tachymeter dar, welche u.a. an der ETH Zürich im Projekt TOPOMAT vorangetrieben wurden (Matthias 1991, Bayer 1992). Erste Ansätze hierzu wurden bereits vor etwa zwei Jahrzehnten von Gottwald (1987) und Huep (1988) dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der instrumentellen und algorithmischen Modelle liefert u.a. Wester-Ebbinghaus (1988a;b).

Mit dieser Entwicklung sollten die Aufgaben der Zielerkennung sowie -verfolgung automatisiert werden. Dies bedingte zudem eine Motorisierung der Instrumente. Im Jahre 1990 wurde von der Firma Geotronics mit dem Geodimeter 4000 das erste einsatzfähige Instrument zur Zielerkennung und -verfolgung angeboten (Hennes 1992).

Bei Instrumenten, welche mit einer digitalen Kamera ausgestattet sind, muss die Lage des CCD-Sensors relativ zur optischen Achse bekannt sein. Um dies zu erreichen, wurden anfänglich die Optik des Tachymeters und die CCD-Kamera biaxial angeordnet (u.a. Brandstätter 1989). Dies führte jedoch zu parallaktischen Verzeichnungen vor allem im Nahbereich. Als Folge wurde von der Firma Wild (Heerbrugg) der TM3000V Videotheodolit mit koaxialer Anordnung der Kamera entwickelt (Wild 1989, Walser 2004).

Zahlreiche Forschungsarbeiten u.a. am Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien beschäftigten sich mit der Entwicklung und Optimierung eines Industriemesssystems auf Grundlage des TM3000V. Es wurden insbesondere Möglichkeiten analysiert, auf eine Signalisierung der Messpunkte zu verzichten. Hierbei wurde untersucht, in wieweit markante und identische Punkte in den jeweiligen Bildern der Videotheodolite mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen identifiziert werden können (u.a. Fabiankowitsch 1990, Roic 1996, Mischke 2000).

In großer Zahl wurden in den Veröffentlichungen der vergangenen Jahre Kombinationen von Tachymetern mit unterschiedlichen Kamerasystemen vorgestellt (u.a. Schirmer 1994, Uffenkamp 1995, Hovenbitzer und Schlemmer 1997, Hovenbitzer 2001).

14 1 Einführung

Von der Arbeitsgruppe Geodäsie an der Ruhr-Universität Bochum wurde ein System zur dreidimensionalen Objekterfassung auf Grundlage eines reflektorlos messenden Tachymeters konzipiert und realisiert (Buchmann 1996, Scherer 2001), welches von Juretzko (2004) weiterentwickelt und mit integrierten CCD-Sensoren kombiniert wurde. Ebenfalls von Walser (2004) wurde der Prototyp einer "Image Assisted Total Station" beschrieben. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen können halbautomatisch die Positionen von nichtsignalisierten einfachen geometrischen Elementen bestimmt werden.

Als Serienprodukte eines Servotachymeters mit integrierter digitaler Kamera werden aktuell die VX Spatial Station der Firma Trimble und die IS Imaging Total Station der Firma Topcon angeboten.

Als Alternative hierzu wurde am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich eine Okularkamera auf Basis eines monochromen CCD-Sensors des Typs Guppy der Firma Allied Vision Technologies (AVT) entwickelt. Neben einer sehr hohen Auflösung bei gleichzeitig sehr hoher Bildrate bietet diese Kamera die Möglichkeit der Zeitsynchronisation über einen GPS Empfänger. Daneben wurde eine Software zur Tachymetersteuerung entwickelt, welche die automatische Zielerkennung und -verfolgung auch nichtsignalisierter Punkte ermöglicht. Dies ist ohne Einschränkungen auch im Bereich des Zenit möglich. Die Algorithmen zur Steuerung der Zielerfassung serienmäßiger Tachymeter liefern in diesem Bereich meist keine sinnvollen Ergebnisse mehr.

Trotz aller technischen Weiterentwicklungen in der Vergangenheit unterscheiden sich moderne elektronische Tachymeter in ihrer Grundkonstruktion nicht wesentlich von ihren analogen Vorgängern. Ihnen allen ist gemeinsam, dass eine Visur um den Nadir nicht möglich ist. Dies bedeutet, dass Punkte, welche sich in einem Zenitwinkelbereich zwischen ca. 170 und 230 gon befinden, nicht direkt gemessen werden können.

Bisher wurde diese Einschränkung meist durch die Wahl des Instrumentenstandpunktes umgangen. So werden z.B. tachymetrische Schachtvermessungen von der Schachtsohle aus durchgeführt. Morlot (1989) entwickelte beim Bau des Eurotunnels ein Verfahren der Präzisionslotung und Richtungsübertragung mittels Zenitwinkelmessung. Dieses Verfahren lässt sich auch in leicht geneigten Schächten anwenden. Alternativ hierzu kann eine Messung von der Schachtsohle auch durch die Verwendung eines Tachymeters in Kombination mit einem Schachtlotprisma bzw. einem Steilsichtokular erfolgen. Nachteil beider Verfahren ist, dass bei Messungen von der Schachtsohle kein direkter Anschluss an ein übertägiges Festpunktfeld möglich ist.

Eine vertikale Punktübertragung von oben lässt sich durch optische Nadirlotung durchführen. Die Messabweichungen bei der optischen Lotung wurden u.a. von Ehlebracht (1964) systematisiert. Zentrier- und Zielachsabweichungen des Lotinstruments gehen direkt in die Genauigkeit der Punktübertragung ein. Letztere können durch Messungen in vier sich um 100 gon unterscheidenden Lagen des Fernrohrs minimiert werden. Mit diesem Verfahren lassen sich jedoch keine Strecken bestimmen.

1.1 Motivation 15

Kratzsch (1962) entwickelte zur vertikalen Punktübertragung das sog. Seigernivellement bei dem der horizontale Zielstrahl eines Nivelliergerätes durch ein Vorsatzprisma in die Vertikale umgelenkt wird.

Für die polare Punktbestimmung von oben wurde von Geitner (1969) ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die annähernd horizontalen Zielstrahlen zweier Theodolite durch ein Pentaprisma in die Vertikale umgelenkt werden. Bei diesem Verfahren wird der Bereich, in welchem sich der Zielstrahl aus dem Nadir auslenken lässt, durch die Größe des Pentaprisma und den Abstand der Theodolite von diesem beschränkt.

Für Bauvermessungen wird von der Firma David White eine optische "Universal Line Transfer Unit" angeboten, bei welcher sich die Kippachse außerhalb der Stehachse befindet und so eine Nadirvisur ermöglicht (David White 2009).

Um eine polare Punktbestimmung von oben mit gleichzeitiger Streckenmessung durchführen zu können, entwickelte die Firma Argus Geotech ein Tachymeteraufsatzsystem (Argus TA). Der horizontale Zielstrahl des Tachymeters wird über ein Spiegelsystem, bestehend aus drei Orthogonalspiegeln, in einen lotrechten Strahl koaxial zur Stehachse umgelenkt (Fuhrland 2006). Schwenkt man den Vertikalkreis des Tachymeters aus der Horizontalen, dann schwenkt der nach unten aus dem Tachymeteraufsatz austretende Zielstrahl um denselben Betrag aus der Lotrichtung. Die maximale Auslenkung des Vertikalwinkels ist bei diesem Verfahren konstruktionsbedingt auf ± 1 gon beschränkt.

Richtungsmessungen von oben ohne Einschränkung des Schwenkbereichs des Vertikalwinkels sind mit dem im Markscheidewesen bekannten Hängetheodolit möglich (u.a. Wagner 1964, Palm 1981). Hierbei handelt es sich um einen kopfüberstehend an der Decke befestigten Theodolit. Die Horizontierung des Instruments erfolgt mittels einer Röhrenlibelle. Bei diesem Verfahren geht jedoch eine Stehachsschiefe in Zielrichtung direkt in die Zenitwinkelbestimmung ein.

In Zusammenhang mit der von Morlot vorgestellten Methode stellt Wunderlich (1995) die herausragende Bedeutung eines Verfahrens fest, mit welchem vertikale Punktübertragungen durch schräge Schächte hindurch ermöglicht werden. Bereits Schubernigg (1990) untersuchte auf Anregung der österreichischen Tauernkraftwerke Strategien, die Verformung von Staumauern mit Beobachtungen durch schräge Schächte hindurch optisch zu erfassen.

Von Fuhrland (2005; 2006) finden sich mehrere Anregungen für den Einsatz eines Systems, welches die tachymetrische Messung von oben erlaubt. Da mit einem solchen System das umgekehrte Verfahren der Zenitdistanzmessung nach Morlot möglich ist, eignet es sich für die vertikale Punktübertragung in schrägen Schächten. Daneben ist auch die polare Messung mehrerer über den Schachtquerschnitt verteilter Punkte möglich. Im Hinblick auf die atmosphärischen Bedingungen in Schächten bietet eine Messung von oben Vorteile gegenüber einer Messung von der Schachtsohle. Bei schlechten Sichtverhältnissen kann die Visur auch mit Hilfe des Visurlasers des Tachymeters erfolgen. Eine

1 Einführung

elektrooptische Streckenmessung zur Höhenbestimmung ist sowohl bei vertikaler als auch bei schräger Punktübertragung möglich. Anwendung könnte ein solches System bei Talsperrenvermessungen finden (s.a. Werner 1973). Hier kann anstelle der Kombination aus mechanischer Lotung und Alignement eine optische Punktübertragung auf die einzelnen Mauerebenen bei gleichzeitiger Stationierung des Tachymeters im Festpunktfeld der Staumauer vorgenommen werden.

Vom IGP der ETH Zürich wurde vorgeschlagen, ein System, welches die uneingeschränkte tachymetrische Messung von oben erlaubt, auch in der Industrievermessung einzusetzen. Denkbar ist die Deckenmontage in Fertigungshallen in denen aufgrund der Arbeiten bzw. Sichtverhältnisse eine Stationierung am Boden nicht möglich ist. Als Beispiele können der Flugzeug- und Schiffsbaugenannt werden.

1.2 Ziel der Arbeit

Wie gezeigt wurde ergeben sich für ein System, welches tachymetrische Messungen in einem Zenitwinkelbereich zwischen ca. 170 und 230 gon ermöglicht, eine Vielzahl verschiedener Anwendungsgebiete. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines solchen Systems. Das Konzept basiert auf dem aus dem Markscheidewesen bekannten Hängetheodolit. Bei diesem wird die Horizontierung des Instruments durch Röhrenlibellen realisiert. Um Messungen im Bereich des Nadirs durchführen zu können, wird ein Tachymeter ähnlich einem Hängetheodolit in hängender Position montiert. In dieser Position ist der zur Horizontierung dienende interne elektronische Neigungskompensator jedoch nicht funktionsfähig. Die Horizontierung wird daher extern überwacht. Zu diesem Zweck wird das Tachymeter über eine geeignete Aufhängevorrichtung mit einem Neigungssensor verbunden. Die Kombination aus in hängender Position montiertem Tachymeter und externem Neigungssensor wird im Folgenden als Hängetachymeter bezeichnet.

Prinzipiell kann jedes Tachymeter als Hängetachymeter Verwendung finden, sofern seine Funktionalität und Genauigkeit nicht durch die hängende Position beeinträchtigt werden. Dies ist vorab in einer Laboruntersuchung zu überprüfen.

Bei der Kombination des Systems mit einem externen Neigungssensor kann eine geringe Abweichung zwischen der Stehachse des Tachymeters und der Lotachse des Neigungssensors fertigungsbedingt nicht vermieden werden. Zur Bestimmung dieser Abweichung werden geeignete Verfahren entwickelt und auf ihre Genauigkeit untersucht.

Instrumentenabweichungen und Abweichungen der Stehachse des Tachymeters von der Lotlinie beeinflussen auch in hängender Position die Messergebnisse. Es werden Algorithmen bestimmt, mit denen die vom Tachymeter gemessenen Werte korrigiert und in ein aufrechtes System transformiert werden können. Zudem wird untersucht, ob die hängende Montage die Instrumentenabweichungen beeinflusst.

1.2 Ziel der Arbeit

Zur Steuerung des Tachymeters und des Neigungssensors wird eine Software zu entwickelt, welche auf einem portablen Computer betrieben werden kann. Die Software soll dem Benutzer u.a. erlauben, die Messwerte der Sensoren auszulesen, diese um die Instrumentenabweichungen zu korrigieren, zu verarbeiten, darzustellen und zu exportieren.

Eine Kombination des eingesetzten Tachymeters mit einer am IGP der ETH Zürich entwickelten Okularkamera ermöglicht die automatische Zielerkennung und -verfolgung nichtsignalisierter Punkte auch bei Messungen nahe des Zenits bzw. des Nadirs. Zur Steuerung der Fokussierung kann ein Schrittmotor eingesetzt werden. Die entsprechenden Softwaremodule werden entwickelt und in die Systemsoftware integriert.

Die erreichbare Genauigkeit des Gesamtsystems wird unter verschiedenen Einsatzbedingungen untersucht.

Für das Hängetachymeter ergeben sich eine Vielzahl neuer Anwendungen. Interessant scheint der Ansatz das Hängetachymeter auch im industriellen Umfeld einzusetzen. Hierzu kann dieses fest an einer Deckenkonstruktion befestigt werden. Dieser Aufbau lässt sich im Labor simulieren. Das System kann über ein Festpunktfeld automatisch kalibriert und stationiert werden. Die visuelle Steuerung des Hängetachymeters kann über die Okularkamera erfolgen. Die Zielerfassung und -verfolgung funktioniert über Bildzuordnungsverfahren auf Prismen, Klebemarken sowie anderen optischen Zielen. Es wird sowohl die erreichbare Genauigkeit des Gesamtsystems, die Automatisierung des Arbeitsablaufes sowie die Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen untersucht.

2 Grundlagen

Das folgende Kapitel fasst die theoretischen Grundlagen der Arbeit zusammen. Einführend wird eine umfassende Darstellung des Standes der Technik der vertikalen Punkt- und Richtungsübertragung gegeben, wobei der Schwerpunkt der Ausführungen auf der optischen Punktübertragung liegt. Zur besseren Übersicht werden die Verfahren der vertikalen Richtungsübertragung in einem separaten Abschnitt dargestellt. Da Lotabweichungen bei der vertikalen Punktübertragung direkt in die Genauigkeit der Punktkoordinate eingehen, müssen diese berücksichtigt werden. Es wird daher der in der Geodäsie für die Darstellung des Schwerefeldes der Erde gängigste Ansatz als Reihenentwicklung nach Kugelfunktionen kurz erläutert. Die Bestimmung des Verlaufs der Lotlinie auch unterhalb der Erdoberfläche ist mit Hilfe eines zusätzlichen Topographiemodells möglich. Da besonders bei der Punktübertragung in vertikalen Schächten schwierige atmosphärische Bedingungen herrschen, wird die Refraktion in diesen vertieft betrachtet. Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Instrumentenabweichungen und ihren Einflüssen auf die Richtungs- und Winkelbestimmung mit einem Tachymeter. Besondere Betrachtung finden hierbei Messungen nahe dem Zenit bzw. dem Nadir. Auch werden bereits die theoretischen Grundlagen für die Kombination eines Tachymeters mit einem externen Neigungssensor erarbeitet.

2.1 Verfahren der vertikalen Punktübertragung

Der Begriff vertikale Punktübertragung ist mit dem Verfahren der Lotung gleich zu setzen. Nach Witte und Schmidt (2006) versteht man unter Lotung das Einweisen von Punkten in die Lotlinie ober- oder unterhalb eines gegebenen Punktes bzw. die Bestimmung von Größe und Richtung der Abweichungen vorhandener Punkte von der Lotlinie.

Man unterscheidet generell zwischen

- mechanischer Lotung mit Hilfe eines Lotdrahts,
- optischer Lotung und der
- vertikalen Punktübertragung mit Hilfe von Trägheitsmesssystemen.

20 2 Grundlagen

Die optische Lotung lässt sich zudem unterteilen in Verfahren, bei denen die Lotlinie durch die Ziellinie eines Fernrohrs (zentrische Lotung) oder durch die Schnittlinie zweier Ebenen (exzentrische Lotung) realisiert wird. Ein Überblick über alle in der Praxis angewandten Lotverfahren findet sich unter anderem bei Möser u. a. (2000). Im Folgenden sollen bestehende Lotverfahren kurz betrachtet werden, die vorwiegend im Tunnel- und Bergbau eingesetzt werden.

2.1.1 Mechanische Punktübertragung

In seiner einfachsten Ausführung kann ein mechanisches Lot durch ein Schnurlot dargestellt werden. Alle weiteren Bauarten sind von dieser Grundform abgeleitet und in ihrer Konstruktion hinsichtlich Dämpfung und Ablesung verbessert.

Pendellotung

Eine Punktübertragung durch Pendellotung (Schwergewichtslotung) ist bis zu 1300 m Länge des Lotdrahtes möglich. Beim Pendellot (Abb. 2.1) wird die vertikale Bezugslinie durch einen an seinem oberen Ende am Bauwerk befestigten Lotdraht realisiert. Zur Spannung wird dieser an seinem unteren Ende mit einem Lotgewicht beschwert. Zur Dämpfung der Lotschwingungen sollte das Lotgewicht in einen mit Wasser oder Öl gefüllten Behälter getaucht werden. Die Ablesung der Drahtauslenkung erfolgt an fest mit dem Bauwerk verbunden Ablesevorrichtungen. Zur Bestimmung der Koordinaten der Lotpunkte wird das Lot in Schwingung versetzt, und die Umkehrpunkte der Lotschwingungen (gedämpfte Sinusschwingung) werden an zwei zueinander rechtwinklig angeordneten Skalen beobachtet. In ihrer Ausführung unterscheidet man zwischen manuell optischer Ablesung mit Hilfe von Ablesefernrohren mit Nonius und automatisierten Lotableseeinrichtungen. Bei einem von der ETH Zürich vorgestellten Verfahren wird das Lot mit Hilfe eines Tachymeters im

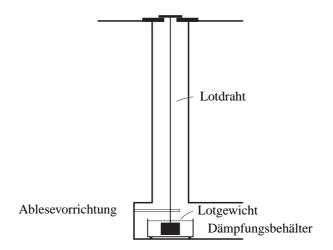


Abb. 2.1: Pendellotung - Lotdraht mit Dämpfungsbehälter (nach Möser u. a. (2000))

Trackingmodus beobachtet. Am Lotpendel wird zentrisch ein Rundumprisma befestigt, welches es erlaubt, die Schwingungen des Pendels kontinuierlich zu verfolgen (Ingensand u. a. 1998). Aus den Beobachtungen werden unter Berücksichtigung systematischer Fehleranteile (Dreh- und Kippschwingung) die Ortungszahlen gegebenenfalls bei verschiedenen Lotgewichten (Mehrgewichtslotung (Wagner 2003)) ermittelt und daraus die Ruhelage des "Lotpendels" bestimmt. Beim Einsatz der Pendellotung in Staumauern ist zudem noch ein möglicher Einfluss aufgrund von unterschiedlichen Anziehungskräften infolge von Stauhöhenschwankungen zu berücksichtigen (Werner 1970). Heger (1992) erreichte bei 1000 m Teufe Wiederholgenauigkeiten von 3 cm. Bei 800 m Teufe wurden sogar Genauigkeiten von 5 mm erreicht (Schätti und Ryf 2004).

Die Nachteile der Pendellotung liegen in der insgesamt sehr aufwendigen Installation der Loteinrichtung. Des Weiteren ist nach der Installation eine Ruhephase des Systems einzuhalten, in welcher das Pendel ausschwingt. Der in einem Schacht immer herrschende Luftzug und herabfallende Wassertropfen führen zudem leicht zu Schwingungen des Lotdrahtes.

Schwimm- und Umkehrlotung

Eine mechanische Zenit-Lotung ist mit Schwimm- bzw. Umkehrloten möglich (Abb. 2.2). Mit ihnen lässt sich die absolute Lage eines verankerten Festpunktes an die Oberfläche übertragen. Der Lotdraht wird dabei im unteren Lotpunkt in stabiler Lage, zumeist in etwa 30 bis 50 m Tiefe im Felsgrund, fest verankert. Am oberen Ende des Drahtes ist ein ringförmiger Schwimmkörper befestigt, der in einer Flüssigkeit schwimmt und durch seine Auftriebskraft die erforderliche Spannung erzeugt. Nach einer Auslenkung kehrt der Schwimmkörper wieder in seine Ruhelage zurück, welche entlang der Lotgeraden durch den Bezugspunkt verläuft. Die Schwingung des Lotes wird durch die Viskosität der

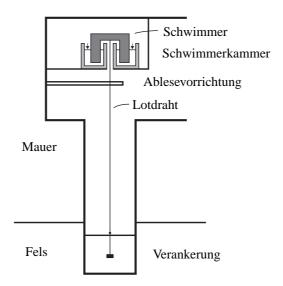


Abb. 2.2: Schwimmlot (nach Möser u. a. (2000))

22 Grundlagen

Flüssigkeit gedämpft. Die Ablesung der Drahtauslenkung erfolgt in gleicher Weise wie beim Pendellot. Die Messgenauigkeit der Schwimmlotung kann etwa mit der der Pendellotung gleichgesetzt werden.

Die für die Pendellotung genannten Einschränkungen gelten in gleicher Weise für die Schwimmlotung. Jedoch ist die Installation der Loteinrichtung aufgrund der Gründung des unteren Lotpunktes im Fels und der komplizierten oberen Aufhängung insgesamt noch aufwendiger.

Referenzpendel

Zingg (1965) entwickelte das Referenzpendel, um Horizontalverschiebungen des Fußes und des Gründungsbereichs der Staumauer Albigna (Schweiz) relativ zu einem im Felsgrund verankerten Spanndraht zu ermitteln. Das Referenzpendel besteht aus einem Pendellot, welches zusammen mit dem Spanndraht an einer Aufhängung befestigt ist. Für die Bestimmung der Verschiebung zueinander wird der Abstand zwischen dem Referenzpendel und dem Spanndraht zur Null- und Folgemessung manuell oder automatisiert gemessen. Mit der Annahme, dass die in 50 bis 70 m Tiefe in den Fels eingebrachten Verankerungen ihre Lage nicht verändern, besitzen die gemessenen Verschiebungen absoluten Charakter. Die Installation der Spanndrähte erfolgt in verrohrten Bohrlöchern, welche nicht streng lotrecht verlaufen müssen. Das System unterliegt den gleichen Einflüssen wie bei der Pendellotung. Bryś (2002) gibt die Genauigkeit des Verfahrens zur Bestimmung der Verschiebungen beim Einsatz einer automatischen Lotableseeinrichtung mit $\sigma_{\Delta X,\Delta Y} = 0,15$ mm an.

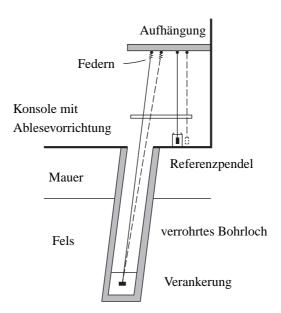


Abb. 2.3: Referenzpendel (nach Möser u. a. (2000))

2.1.2 Optische Punktübertragung

Lotung durch Schnitt zweier Vertikalebenen (Ebenenlotung)

Bei der Ebenenlotung ergibt sich die Lotlinie als Schnittlinie zweier vertikaler Ebenen. Von zwei exzentrischen Standpunkten kann mit einem Theodolit ein Zielpunkt beobachtet werden. Durch Drehen des Zielfernrohrs um die Kippachse ergeben sich zwei Vertikalebenen, deren Schnitt die Lotlinie bildet. Der Schnittpunkt beider Zielungen in einer Ebene bestimmt den Lotpunkt. Die Standpunkte sollten bei diesem Verfahren mindestens im Abstand der halben Lothöhe vermarkt werden und der Horizontalwinkel zwischen den Lotebenen sollte ungefähr einen rechten Winkel bilden. Mit dem Verfahren der Ebenenlotung ist eine Lotgenauigkeit von etwa 3 bis 5 mm bei 100 m Höhe erreichbar (Witte und Schmidt 2006). Das Verfahren kann jedoch aufgrund des Abstandes zwischen Lotlinie und Instrumentenstandpunkt nicht in der Schachtmessung eingesetzt werden.

Optische Lote

Bei der direkten optischen Lotung wird das mechanische Lot durch die Ziellinie eines (vertikal gerichteten) Messfernrohrs ersetzt. Alle zu diesem Zweck verwendeten Instrumente werden hier als optische Lote bezeichnet. Freckmann (1932), Schneider (1937) und Straßburg (1956) geben einen Überblick über die Entwicklung der optischen Lotung und der optischen Richtungsübertragung in Schächten. Unter anderem bei Ehlebracht (1964) findet sich ein Überblick über die Verfahren der optischen Lotung. Da die Vielfalt der unterschiedlichen Lotinstrumente sehr groß ist, werden diese im Folgenden nicht detailliert beschrieben, sondern es wird eine Möglichkeit ihrer Klassifizierung aufgezeigt.

Spezielle optische Lotinstrumente sind dadurch gekennzeichnet, dass die Ziellinie mit der Vertikalachse zusammenfällt. Jedoch lassen sich auch Theodolite oder Nivelliere mit Hilfe eines vorgesetzten Objektivprismas bzw. Planspiegels zur optischen Lotung verwenden (Kratzsch 1962). Vereinzelt finden auch Theodolite mit exzentrischem Fernrohr Verwendung. Für optische Lote findet sich demnach eine erste Einteilung nach Art der Ziellinie:

- zentrische Ziellinie
- exzentrische Ziellinie

Lotinstrumente lassen sich in den unterschiedlichsten Formen sowohl für Zenit- als auch Nadirvisuren konstruieren. Manche Instrumente verbinden auch beide Möglichkeiten zu kombinierten Zenit- und Nadirloten. Mit den oben genannten Instrumenten mit exzentrischer Lotlinie sind stets

24 2 Grundlagen

sowohl Zenit- als auch Nadirvisuren möglich. Nach dem Merkmal der Visurrichtung ergibt sich somit ebenfalls eine Einteilung der optischen Lote:

- Nadirlot
- Zenitlot

Eine weitere Unterteilung lässt sich nach den Hilfsmitteln vornehmen, mit denen die Ziellinie lotrecht gestellt wird. Folgende Verfahren finden in der Praxis Verwendung:

- Freie Flüssigkeitshorizonte (Quecksilber- oder Ölhorizont) zur Autokollimationsbeobachtung
- Libelle
- Kompensator

Freie Flüssigkeitshorizonte lassen sich praktisch jedoch nur bei Nadirvisuren verwenden. Auch ist es meist schwierig, die Flüssigkeitsoberfläche in der für die Autokollimation notwendigen absoluten Ruhe zu halten. Kompensatoren, die nach dem Prinzip mechanischer oder hydromechanischer Pendel arbeiten und die Ziellinie automatisch orientieren, werden heute in den meisten optischen Präzisionsloten verwendet.

Bei der Lotbeobachtung kann unterschieden werden zwischen Instrumenten, bei denen die Ziellinie entweder starr vertikal ist, oder durch Einstellungen am Instrument bewegt werden kann. Die erste Methode liefert Lotpunkte, welche zentrisch über oder unter dem Instrument liegen. Mit der zweiten Methode kann entweder das Instrument über oder unter einem gegebenen Punkt zentriert, oder aber die Exzentrizität zwischen Zielpunkt und Instrument bestimmt werden.

Die Messabweichungen der optischen Lotung wurden u.a. von Jacob (1973; 1974) untersucht und systematisiert. Die Genauigkeit der Lotung mit optischen Loten ist in erster Linie abhängig von den Instrumentenabweichungen und den äußeren Einflüssen. Unter dem Begriff Instrumentenabweichungen werden alle Abweichungen des Instruments, sowie die vom Beobachtungsverfahren und der Unzulänglichkeit des Beobachters stammenden unvermeidbaren Abweichungen verstanden. Durch Zusammenfassung mehrerer systematisch angeordneter Beobachtungen zu einer Lotung lassen sich diese Abweichungen jedoch tlw. eliminieren. Die Beobachtungsanordnungen richten sich dabei nach dem jeweils benutzten Instrumententyp, insbesondere nach dem zur Senkrechtstellung der Lotlinie verwendeten Hilfsmittel. Unter den äußeren Einflüssen werden Abweichungen der Aufstellung, die Temperaturempfindlichkeit der Instrumente sowie der Einfluss der Refraktion zusammengefasst. Bei den optischen Verfahren spielt die Refraktion, insbesondere die Seitenrefraktion, eine herausragende Rolle. Sie kann bei Doppellotung zur Verwindung der optischen Ebene führen.

Das GLQ der Firma Wild (Heerbrugg), welches zur Lotrechtstellung der Ziellinie einen Quecksilberhorizont verwendet, erreicht nach Herstellerangaben bei Reichweiten bis 500 m eine Genauigkeit von

1:300000. Die Messabweichungen bei der Punktübertragung liegen bei der optischen Lotung in der Größenordnung von < 5 cm / 1000 m, können je nach atmosphärischen Bedingungen aber auch mehrere Dezimeter betragen (Rymarczyk 1990). Durch Belüftung des Schachtes mit Fallwinden erreichten Schätti und Ryf (2004) eine Genauigkeit von 6 mm über 800 m Teufe.

Zur Bestimmung dreidimensionaler Koordinaten können optische Lote nicht eingesetzt werden, da neben der Lage auch noch der Höhenunterschied bestimmt werden muss. Auch eine umfassende Automatisierung des Messablaufs ist nicht möglich.

Laserlote

Seit Einführung der Laserstechnologie im Bergbau wird versucht, das mechanische Lot durch den gebündelten Laserstrahl zu ersetzen (Leonhardt und Lützenkirchen 1967, Lautsch und Thieme 1968). Die Verwendung eines Lotlasers zur optischen Lotung hat gegenüber der Verwendung von optischen Loten zudem den Vorteil, dass die Vertikale als deutlich sichtbare Achse im Schacht steht (Lautsch 1974). Zur Lotung werden generell der Lotlaser selbst als Sender sowie eine Einrichtung zur Zielerfassung des Lasers als Empfänger benötigt.

Lotlaser lassen sich je nach Art des verwendeten optisch aktiven Mediums, sowie des verwendeten Resonators unterscheiden. Diese sind entscheidend mitverantwortlich für die Eigenschaften des Laserstrahls, wie Strahlparallelität, -stabilität und Reichweite (Bahnes 1990, Donges 2007).

Zur Lotrechtstellung des Laserstrahls können vier verschiedene Verfahren unterschieden werden. Die Lotrechtstellung kann

- manuell mit Libelle oder mechanischem Lot,
- mit Hilfe eines oder mehrerer Kompensatoren,
- mit Hilfe eines freien Flüssigkeitshorizonts (Quecksilber- oder Ölhorizont) oder
- automatisch mit Stellmotoren in Verbindung mit einem elektronischen Neigungssensor (s.a. Hirt 2004) erfolgen.

Die Einrichtung eines Laserstrahls in die Vertikale mit Hilfe einer Libelle erfolgt in Analogie zur Einrichtung des Zielstrahles eines optischen Lotes. Bei mehreren Lösungen zur Vertikalstellung des Lasers wird die Verwendung optischer Bauelemente zur Umlenkung des Laserstrahls aus der Horizontalen vorgeschlagen. Die Horizontale ihrerseits wird durch Libellen oder selbsthorizontierende Kompensatorenelemente realisiert (Holtz 1968, Blase 1970, Chrzanowski 1970b). Bei einem von Kratzsch (1975) vorgeschlagenen Verfahren wird eine pendelnd aufgehängte Linse als Kompensator in den Austrittsstrahl des Lasers eingeschaltet. Ähnlich wie beim optischen Lot kann auch der Lotlaser mittels eines freien Flüssigkeitshorizontes vertikal ausgerichtet werden (Chrzanowski 1970a). Unter anderem von der Firma Spectra-Physics wurde ein Lotlaser konzipiert, der zur automatischen

26 2 Grundlagen

Vertikalstellung des Laserstrahls Stellmotoren verwendet (Eichholz und Schnalle 1978). Die Konzeption des Instruments ist dadurch gekennzeichnet, dass das vertikal angeordnete Laserrohr in einer doppelten Kardanringaufhängung durch Elektrolytlibellen überwacht und durch kleine Stellmotoren bei Auslenkungen immer wieder in die Lotrechte zurückgestellt wird.

Besonders bei Lotungen über große Teufen wirken auf den Laserstrahl die Einflüsse der Szintillation und der Extinktion. Unter Szintillation wird nach Brückner (1979) und Knorr (1989) die kurzperiodische Positions- und Intensitätsänderung eines Zielstrahls verstanden. Szintillationseffekte haben ihre Ursache in zeitlichen Schwankungen des Brechungsindexes (in einer turbulenten Atmosphäre). Sie bewirken ein Bildflimmern bzw. schwankende Umrisse. Die Extinktion bezeichnet eine Minderung von Leistung, Energiegehalt und somit Reichweite des Laserstrahls. Um diese Einflüsse zu mindern werden elektrooptische Photodetektoren zur Lageerfassung des Auftreffpunktes des Laserstrahls eingesetzt (Werner 1973).

Mit dem Lotlaser 946 D/M der Firma Spectra-Physics wurden in mehreren Schächten Vergleichsmessungen mit Drahtloten bis zu Teufen von 1100 m vorgenommen. Der Widerspruch lag in der Größenordnung von 1 bis 2 cm. Die Auswertung der Messreihen ergab eine innere Genauigkeit von 1:110000 (Stier u. a. 1978).

Vertikale Punktübertragung durch polare Punktbestimmung

Die vertikale Punktübertragung kann auch durch polare Punktbestimmung erfolgen. Hierzu wird der Zenitwinkel zwischen Lotlinie und Zielachse, die Horizontalrichtung des Zielpunktes und die Schrägdistanz bestimmt. Nach der Horizontierung und Orientierung des Instruments lassen sich bei bekanntem Standpunkt die Koordinaten des Lotpunktes bestimmen. Bei diesem Verfahren muss sich der Lotpunkt nicht direkt über oder unter dem Instrumentenstandpunkt befinden.

Eine Zenitlotung von der Schachtsohle kann durch Verwendung eines Tachymeters in Kombination mit einem Schachtlotprisma bzw. einem Steilsichtokular erfolgen. Die tachymetrischen Messungen lassen sich auch zu vertikalen Netzen zusammenfassen. Hierzu werden um die obere Schachtöffnung verteilt Zielpunkte angebracht und im übertägigen System bestimmt. Diese werden von der Schachtsohle von mehreren Standpunkten aus bestimmt. Die Koordinaten der Standpunkte und die Richtungen im untertägigen Netz ergeben sich nach einer Ausgleichung (Glaus und Ingensand 2002). Aufgrund der sehr steilen Zielungen sind die Einflüsse der Achsabweichungen und der Stehachsenneigung auf die Horizontalrichtungs- und Vertikalwinkelbestimmung zu beachten (Kap. 2.5). Bei einer instrumenteninternen automatischen Korrektur sollte beachtet werden, dass einige Instrumentenhersteller die an den gemessenen Richtungen bzw. Winkeln angebrachten Korrekturen ab einem Zenitwinkel von 20 gon fixieren (Glaus und Ingensand 2002). Ryf u. a. (2000) beschreiben Probleme der tachymetrischen vertikalen Punktübertragung von unten im Schacht Sedrun, wo in 366 m Tiefe wegen der atmosphärischen Bedingungen weder eine manuelle, noch eine automatische Anzielung

des abzulotenden Punktes möglich war. Zudem führten auf das Instrument treffende Kondenswassertropfen zu Erschütterungen.

Für die Nadirlotung durch polare Punktbestimmung wurde von Geitner (1969) ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem über der Schachtöffnung der oberen Sohle ein Pentaprisma befestigt wird, welches sich horizontieren und durch Drehen um seine vertikale Achse orientieren lässt. Von zwei neben der Schachtöffnung gelegenen Theodolitstandpunkten wird nacheinander durch das Pentaprisma hindurch das tiefer gelegene Zielzeichen angezielt, und die Vertikalwinkel werden gemessen. Der Bereich, in welchem sich der Zielstrahl aus dem Nadir auslenken lässt, wird durch die Größe des Pentaprisma und den Abstand der Theodolite von diesem beschränkt. Bei Kenntnis des Teufenunterschiedes zwischen Pentaprisma und Zielzeichen kann letzteres koordinatenmäßig eingemessen werden. Der Aufbau und die Kalibrierung des Systems sind insgesamt sehr aufwendig. Mit diesem Verfahren wurden bei mehreren Messungen im Vergleich zur mechanischen Lotung bei einer Teufe von 720 m Abweichungen von 2,5 cm erreicht. In mehreren Fällen lagen die Abweichungen jedoch deutlich über diesem Wert.

In Verbindung mit dem von der Firma Argus GeoTech entwickelten modularen Tachymeteraufsatzsystem ArgusTA kann das Tachymeter auch zur Nadirlotung bzw. polaren Punktbestimmung von oben eingesetzt werden (Abb. 2.4). Das Modul ArgusTA ist ein Zusatzinstrument zum herkömmlichen Tachymeter und ermöglicht die tachymetrische Punkt- und Richtungsübertragung in vertikalen und leicht geneigten Schächten (Fuhrland 2006). Der horizontale Zielstrahl des Tachymeters wird über ein Spiegelsystem mit drei Orthogonalspiegeln in einen lotrechten Strahl koaxial zur Stehachse umgelenkt. Die drei Orthogonalspiegel befinden sich in einer Umlenkeinheit, welche starr

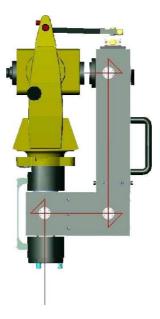


Abb. 2.4: Strahlenverlauf im Tachymeteraufsatzsystem ArgusTA (Fuhrland 2006)

28 2 Grundlagen

mit dem Oberteil des Tachymeters verbunden ist. Dreht man den Horizontalkreis des Tachymeters, so dreht sich die Umlenkeinheit mit, die Drei-Klauen-Aufnahme des Tachymeters wird jedoch durch eine Klemmvorrichtung fixiert. Diese Klemmvorrichtung begrenzt den horizontalen Schwenkbereich des ArgusTA auf 330 gon. Schwenkt man den Vertikalkreis des Tachymeters aus der Horizontalen, dann schwenkt auch der nach unten aus dem Tachymeteraufsatz austretende Zielstrahl um denselben Betrag aus der Vertikalen. Eine Streckenmessung durch den Tachymeteraufsatz hindurch ist möglich, jedoch ist zur Berücksichtigung des verlängerten optischen Strahlengangs eine vom Vertikalwinkel abhängige Korrektur am Messwert anzubringen. Die Orientierung des Tachymeters über Tage erfolgt vor der Befestigung des ArgusTA am Tachymetergriff. Aufgrund des Signalweges und der Apertur ist der mögliche Schwenkbereich des Vertikalwinkels konstruktionsbedingt auf ± 1 gon begrenzt. Die Genauigkeiten des Systems hängen in erster Linie von der Genauigkeit des eingesetzten Tachymeters sowie von der Kalibrierung des gesamten Systems ab (Fuhrland 2005).

Zenitwinkelmessung

Ein Verfahren zur Präzisionslotung und Richtungsübertragung mittels Zenitwinkelmessung wurde von Morlot (1989) für den Bau des Eurotunnels zur Abteufung des Startschachtes bei Calais und für den Vortrieb der ersten Tunnelkilometer entwickelt.

Das Verfahrensprinzip besteht darin, die präzise Lagebeziehung zwischen zwei näherungsweise lotrecht untereinander liegenden Punkten aus Zenitwinkelmessungen abzuleiten (Abb. 2.5). Auf dem unteren Punkt U werden bei über den Horizontalkreis verteilten Richtungen r_i (z.B. alle 20 gon) mit

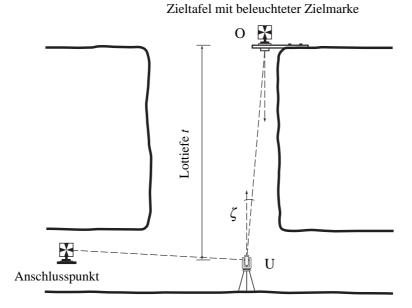


Abb. 2.5: Lotung mittels Zenitwinkelmessung (nach Jacobs (1991))

Hilfe des Horizontalstrichs die Zenitwinkel ζ_i zum oberen Punkt O gemessen, wobei ohne Rücksicht auf eine evtl. vorhandene Höhenindexabweichung h Messungen in nur einer Fernrohrlage ausreichend sind. Trägt man die gemessenen Zenitwinkel als Funktion der zugehörigen Horizontalkreisablesungen auf, so ergibt sich ein sinusförmiger Funktionsverlauf (Abb. 2.6).

Für die Auswertung des Verfahrens, welche in der Originalpublikation sowie in der Folgepublikation von Jacobs (1991) noch grafisch durchgeführt wurde, lieferte Wunderlich (1995) den analytischen Ausgleichungsansatz.

Aus der Abbildung 2.6 kann der Zusammenhang

$$\zeta_i = A \cdot \cos(B - r_i) + h \tag{2.1}$$

direkt abgeleitet werden. Hierbei bezeichnet A die gesuchte Amplitude in Richtung der Exzentrizität e, und B deren Horizontalkreisrichtung. Zur Bestimmung der Unbekannten A, B und h aus den Beobachtungspaaren r_i , ζ_i lassen sich hieraus im Rahmen einer strengen Ausgleichung die Verbesserungsgleichungen aufstellen:

$$v_i = h + A \cdot \cos B \cdot \cos r_i + A \cdot \sin B \cdot \sin r_i - \zeta_i \tag{2.2}$$

Mit den Hilfsunbekannten

$$x_1 = A \cdot \sin B \tag{2.3}$$

$$x_2 = A \cdot \cos B \tag{2.4}$$

lässt sich die Umwandlung in eine lineare Form erreichen:

$$v_i = h + x_2 \cdot \cos r_i + x_1 \cdot \sin r_i - \zeta_i \tag{2.5}$$

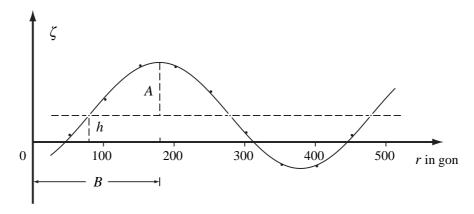


Abb. 2.6: Gemessene Zenitwinkel als Funktion der Horizontalkreisablesungen

30 2 Grundlagen

Für eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen ergibt sich bei Einführung der Einheitsmatrix für die Gewichte folgendes Normalgleichungssystem:

$$\begin{pmatrix} n & [\cos r] & [\sin r] \\ [\cos r] & [\cos^2 r] & [\sin r \cdot \cos r] \\ [\sin r] & [\sin r \cdot \cos r] & [\sin^2 r] \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h \\ x_2 \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [\zeta] \\ [\zeta \cdot \cos r] \\ [\zeta \cdot \sin r] \end{pmatrix}$$
(2.6)

Für eine geradzahlige (n = 2m) Anzahl von Messwerten in festen Azimutschritten werden alle Nebendiagonalglieder zu Null sowie $\left[\cos^2 r\right] = \left[\sin^2 r\right] = \frac{n}{2}$. Die Gleichungen des verbleibenden Systems können einzeln aufgelöst werden nach:

$$h = \frac{[\zeta]}{n} \tag{2.7}$$

$$h = \frac{[\zeta]}{n}$$

$$x_2 = \frac{2[\zeta \cdot \cos r]}{n}$$

$$x_1 = \frac{2[\zeta \cdot \sin r]}{n}$$
(2.8)

$$x_1 = \frac{2\left[\zeta \cdot \sin r\right]}{n} \tag{2.9}$$

Die gesuchten Unbekannten A und B ergeben sich aus den Hilfsunbekannten x_1 und x_2 zu:

$$B = \arctan\left(\frac{x_1}{x_2}\right) \tag{2.10}$$

$$A = \frac{x_1}{\sin B} = \frac{x_2}{\cos B} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$$
 (2.11)

Mit $\rho = \frac{200}{\pi}$ berechnet sich die Exzentrizität e schließlich zu

$$e = \frac{A}{\rho} \cdot t \tag{2.12}$$

Für die erreichbare Lagegenauigkeit des Verfahrens leitete Wunderlich (1996) unter Beachtung annähernd gleich großer Winkel zwischen den einzelnen Horizontalrichtungen (Diff. < 1 gon) für die zu erwartende Standardabweichung in Richtung und normal zur Exzentrizität e folgende Gleichung ab:

$$\sigma_L = \sigma_Q = t \sqrt{\frac{2}{n}} \cdot \frac{\sigma_\zeta}{\rho} \tag{2.13}$$

Als Parameter gehen in diese Gleichung die Messgenauigkeit der Zenitwinkel σ_{ζ} , die Lottiefe t und die Anzahl der Messwerte n ein. Neben dem Ausgleichungsansatz liefert Wunderlich auch den geometrischen Hintergrund und zeigt Beispiele, in welchen bei 100 m Teufe und Messungen in Azimutschritten von 20 gon eine Standardabweichung von 1 mm in der Punktübertragung erreicht wurde (Klug 1993).

Anwendung findet dieses Verfahren als Ersatz der konventionellen Lotung auf Basis optischer Lotinstrumente, aber auch zur vertikalen Punktübertragung durch schräge Schächte vornehmlich im Tunnel- und Schachtbau. Zu beachten ist jedoch, dass der halbe Öffnungswinkel des Theodolitfernrohrs die maximale Abweichung des Zielstrahls von der Lotlinie und somit die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens definiert. Das umgekehrte Verfahren der Zenitwinkelmessung ist mit dem ArgusTA möglich und hat in Bezug auf die atmosphärischen Störeinflüsse sogar Vorteile gegenüber der Messung von unten (Fuhrland 2006). Für die Lotung mit Richtungsübertragung ist es nach Jacobs (1991) zweckmäßig, zwei Punkte mittels Zenitwinkelmessung abzuloten, und die Koordinaten der untertägigen Standpunkte über eine einfache Transformation zu ermitteln.

2.1.3 Trägheitsmesssysteme

Eine Punktübertragung ohne direkte Sicht kann mit Trägheitsmesssystemen erfolgen. Bei Trägheitsmesssystemen wird die Massenträgheit bezüglich Änderung des Bewegungsverhaltens zur Detektion der Bewegungsmomente ausgenutzt. Man kann Trägheitsmesssysteme bezüglich kinematischer und quasistatischer Anwendungen unterteilen. Kinematische Trägheitsmesssysteme, auch Inertialnavigationssysteme (INS) genannt, dienen zur Bestimmung der räumlichen Orientierung, der Geschwindigkeit und der Position ihres bewegten Trägers. Man unterscheidet raumfeste (space stable), geographische (local-level) und trägerorientierte (strapdown) Systeme (Farkas-Jandl 1986). Bei den raumfesten Systemen behält die kardanisch aufgehängte Sensorplattform ihre anfängliche Orientierung bezüglich des Inertialsystems während der Messung bei. Geographische Systeme werden zu Beginn der Messung horizontal nach Norden eingestellt und die Ausrichtung des Systems fortlaufend nachgeführt. Beim Strapdown-System ist das Messsystem fest mit dem Trägerfahrzeug verbunden und ändert seine Orientierung bezüglich des Inertialsystems auch dann, wenn selbiges fest auf der Erde steht.

Ein 3-D Sensorsystem besteht aus drei senkrecht zueinander stehenden Beschleunigungsmessern, welche die wirkenden Beschleunigungen aufzeichnen. Die Integration der Beschleunigungsdaten über die Zeit liefert die Geschwindigkeit und den zurückgelegten Weg des INS. Da die Gravitationskraft als Störgröße von den jeweiligen Beschleunigungsmessern immer mit erfasst wird, sind zusätzlich noch drei orthogonale Kreisel koaxial zu den Beschleunigungsmessern angebracht. Mit ihnen kann die Ausrichtung im Raum und damit der Betrag der Beschleunigung bestimmt und korrigiert werden. In Abbildung 2.7 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Es ist jeweils ein Kreisel und ein Beschleunigungsmesser koaxial zueinander angeordnet.

Aufgrund von Sensorfehlern und -driften wächst der Positionsfehler und eine Stützung der Messung durch zusätzliche Weg- oder Geschwindigkeitsdaten ist empfehlenswert (Schwarz u. a. 1990). Bestimmte systematische Einflüsse lassen sich auch durch Messung in zwei Lagen eliminieren (Neuhierl und Foppe 2004). Anwendungen von INS gibt es vorwiegend in der Navigation, wo mit Satellitennavigation oder Hyperbelortung eine Korrektur der Messwerte möglich ist. Niese (2002) zeigt Einsätze im Spezialtiefbau, u.a. bei der bereits von Heger (1992) untersuchten Schachtvermessung

32 2 Grundlagen

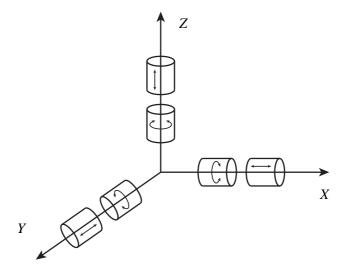


Abb. 2.7: Prinzip eines inertialen Sensors (nach Foppe (2001))

entlang der Spurlatten von Förderkörben. Katrycz und Niemeier (2002) untersuchten den Einsatz zur Deponievermessung mittels INS und Kanalmesswagen innerhalb eines Röhrensystems. Sie zeigten, dass Positionsbestimmungen mit Genauigkeiten von 5 cm über 100 m Fahrweg möglich sind, wenn Anfangs- und Endpunkt der Trajektorie bekannt sind bzw. Anfangs- und Endrichtung anderweitig vorgegeben werden können. (Heinze 1996)

2.2 Verfahren der vertikalen Richtungsübertragung

Die Orientierung ist eine Zustandsgröße, deren Bestimmung in der Ingenieurgeodäsie eine wichtige Rolle zukommt. Über Tage erfolgt die Orientierung durch Messung zu bekannten Punkten, relativ zu vorhandenen Geometrien oder astronomisch. Unter Tage unterliegt die Orientierung ohne Referenzpunkte erschwerten Bedingungen. Nachfolgend sollen deshalb bestehende Verfahren zur vertikalen Richtungsübertragung betrachtet werden, die vorwiegend im Tunnel- und Bergbau eingesetzt werden. Die früher übliche magnetische Richtungsvermessung unter Tage genügt nur geringen Genauigkeitsansprüchen und wird deshalb hier nicht betrachtet. Über die Entwicklung der Richtungsübertragungen im Tunnel- und Bergbau berichten u.a. Straßburg (1956) und Stier (1963).

2.2.1 Lotung

Durch das mechanische oder optische Herabloten zweier Punkte wird eine lotrechte Ebene gebildet, deren Horizontalrichtung übertägig gemessen und nach unten übertragen wird. Werden zwei Punkte in einem Schacht abgelotet spricht man von Doppellotung. Da die Schachtbreite selten mehr als 8 m beträgt, ist die Basis für die Doppellotung relativ kurz und dementsprechend die Fehlerfortpflanzung

ungünstig. Die Richtungsgenauigkeit hängt in erster Linie von der Genauigkeit der vertikalen Punktübertragung ab (Kap. 2.1). Bei jeweils einem Lot in zwei untertägig verbundenen Schächten erfolgt die Richtungsübertragung durch Einrechnung. Werden mehr als zwei Lotpunkte zu einem untertägigen Netz verbunden ist die Richtung mittels Ausgleichung zu bestimmen. Wie schon in Kapitel 2.1.2 beschrieben, kann die Richtung im untertägigen Netz auch durch eine vertikale Netzmessung bestimmt werden.

2.2.2 Richtungsübertragung mit optischen Ebenen

Für die Richtungsübertragung mit optischen Ebenen gibt Schneider (1937) vier Möglichkeiten an: das Kipp- und Zielachsverfahren, das Zielstrichverfahren, das Doppelbildverfahren und das Polarisationsverfahren. Moonen (1955) fügt noch das Alignierverfahren hinzu. Eine ausführliche Beschreibung aller Verfahren liefert Dicke (1970). Im Schacht- und Tunnelbau findet die Richtungsübertragung mit optischen Ebenen heute nur noch selten Anwendung, da sie meist nicht den hohen Genauigkeitsanforderungen genügt.

Beim Kipp- und Zielachsverfahren wird der Vertikalstrich des nach oben gerichteten Theodolitfernrohres (mit Zenitokular) auf zwei eingerichtete Zielzeichen eingestellt. Damit enthält die Zielachsebene die übertragene Richtung. Alternativ kann nach Straßburg (1956) eine Ablesung an zwei quer zur optischen Ebene am oberen Schachtende platzierten Ziellatten erfolgen. Bei 100 m Teufe und 4 m Basis erhält man mit einem Theodolit T2 der Firma Wild (Heerbrugg) eine Richtungsmessgenauigkeit von 33 mgon (Dicke 1970).

Beim Zielstrichverfahren wird der Horizontalstrich des Theodolits auf die Zielzeichen eingestellt. Damit muss die optische Ebene nicht mehr lotrecht stehen. Bei einem Verhältnis von 1:200 zwischen Basis und Teufe wird nach Schneider (1937) und Kratzsch (1964) eine Genauigkeit von 20 mgon erreicht. Dicke (1970) erzielte mit einem Nivellier Ni002 der Firma Carl Zeiss Jena und einem Objektivprisma ähnliche Ergebnisse.

Beim Doppelbildverfahren erzeugt ein Glaskeil, der die halbe Objektivöffnung verdeckt, ein zweites Bild einer Ziellatte. Wird der Keil solange um die Richtung des einfallenden Strahlenbündels gedreht bis beide Bilder übereinander liegen, dann geht die Hauptschnittebene des Keiles durch die Ziellatte. Realisiert wurde dieses Prinzip im Richtloter der Firma Carl Zeiss Jena mit einer Messunsicherheit von 1' bis 2' (≈ 20 bis 40 mgon) bei 585 m Teufe (Schneider 1937).

34 2 Grundlagen

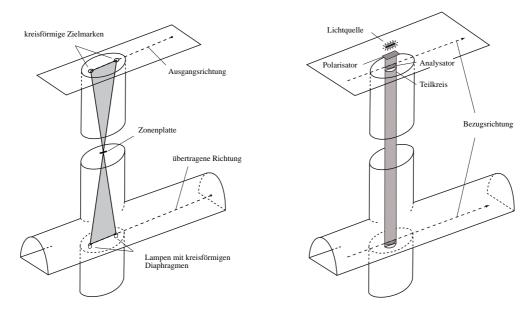


Abb. 2.8: Alignier- und Polarisationsverfahren (Dicke 1970)

Die polarisationsoptische Richtungsübertragung wird auch als SVP-Verfahren (Schacht-Vermessung mit polarisiertem Licht) bezeichnet. Das Licht einer Quecksilberhochdruck- oder Halogenlampe wird mittels Filter linear polarisiert, die Lampe über dem Schacht aufgehängt. Vor dem Objektiv des am unteren Schachtende stehenden Theodoliten wird ebenfalls ein Polarisationsfilter angebracht. Bei Drehung des Horizontalkreises werden für Minima und Maxima der Lichtintensität die Horizontalrichtungen abgelesen. Bei den Minima stehen die Filter rechtwinklig, bei den Maxima parallel zueinander. Dieses von Schneider (1937) vorgeschlagene Verfahren wurde aufgrund der kurzen Messzeiten u.a. von Stier (1957) für die Richtungsübertragung untersucht. Bei optimalen Bedingungen wurden damals 100 mgon als Standardabweichung bis 450 m Teufe erreicht, wobei Schmidt (1963) 300 mgon angibt. Dicke (1970) beschreibt ein ähnliches Verfahren mit einem HeNe-Laser. Das SVP-Instrument der Firma Deutsche Montan Technologie (DMT) arbeitet mit zwei um 1 gon verschwenkten Lichtebenen nach dem Prinzip der "Lichtwaage" (Heger 1992).

Beim Alignierverfahren wird in mittlerer Schachthöhe eine Zonenplatte (bestehend aus konzentrischen Kreisringen) aufgehängt. Am unteren Schachtende stehen zwei Leuchten mit kreisförmigen Diaphragmen in gleicher Höhe, deren Licht nach Durchlaufen der Zonenplatte Interferenzbilder am oberen Schachtende erzeugt. Dort werden zwei kreisförmige Zielmarken in gleicher Höhe in die Interferenzbilder eingefluchtet, damit ist die Verbindungslinie der Zielmarken parallel zur Verbindungslinie der Diaphragmen. Letztere müssen dann gegen Zielzeichen ausgetauscht werden. Moonen (1955) gibt für 150 m Teufe eine Standardabweichung der Richtungsübertragung von 9 mgon an. Abbildung 2.8 zeigt das Prinzip von Alignier- und Polarisationsverfahren.

2.2.3 Trägheitsmesssysteme

Wie bereits angesprochen wurde, benutzen Trägheitsmesssysteme die Massenträgheit bezüglich des Bewegungsverhaltens zur Detektion der Bewegungsmomente. Trägheitsmesssysteme können bezüglich kinematischer und quasistatischer Anwendungen unterteilt werden.

Die in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Inertialmesssysteme gehören der ersten Gruppe an. Wunderlich und Neuhierl (2005) stellten Untersuchungen zur Richtungsübertragung durch hochgenaue Inertialmesstechnik am Beispiel des Münchener Olympiaturmes vor. Hierbei wurde die IMU (Inertial Measurement Unit) mit dem Fahrstuhl über 184 m Höhenunterschied jeweils kontinuierlich auf- und abgefahren. Bei jedem Halt wurde die Richtung zu zwei Anschlusspunkten gemessen. Verwendet wurde eine hochauflösende inertiale Messeinheit vom Typ iNAV-RQH der Firma iMAR. Die enthaltene Sensorik besteht aus drei Ringlaserkreiseln (Modell Honeywell GG1320) mit 1,13" Auflösung und drei Servo-Beschleunigungsmessern (Modell Allied Signal QA2000-40) mit $0.2 \mu g$ Auflösung. Durch Mittelung der Ergebnisse von je sechs Auf- und Abfahrten konnte die Richtungsübertragung mit einer Standardabweichung von 3" realisiert werden.

Quasistatisch arbeitende Systeme sind der nautische Kreiselkompass und der Vermessungskreisel. Bezüglich des Erdkörpers befindet sich das Kreiselinstrument in Ruhe. Der physikalische Einfluss der Erdrotation, eine mit $4,167 \cdot 10^{-3}$ $^{\circ}/_{s}$ sehr geringe Drehgeschwindigkeit, bewirkt allerdings eine Ausrichtung des Kreisels zur Erdrotationsachse, weshalb man ein solches System früher auch als Meridianweiser bezeichnet hat. Da das Messinstrument nicht in Bewegung ist, können durch längere Messzeiten geringere Messunsicherheiten erzielt werden. Es werden mechanische, optische und Vibrationskreisel unterschieden. Bei Vermessungskreiseln kommen vorwiegend mechanische Kreisel zur Anwendung. Die anderen nachfolgend kurz vorgestellten Prinzipien werden in Inertialmesssystemen eingesetzt.

Beim Vibrationskreisel wird die Drehrate mittels oszillierender Schwingelemente gemessen. Diese kompakten Low-Cost-Sensoren sind aufgrund der hohen Messunsicherheit nicht im Bereich der Vermessung einsetzbar und sollen deshalb nicht weiter betrachtet werden.

Beim mechanischen Kreisel (Deklinationskreisel) rotiert ein Schwungrad, dessen Massenträgheitsmoment entlang der Figurenachse wesentlich höher ist als das der anderen Hauptachsen. Wirkt eine äußere Kraft quer zur Rotationsachse, so ändert die Rotationsebene aufgrund der Präzession ihre Lage, bis die Richtung des Rotationsimpulses des Kreisels mit der Richtung des äußeren Drehmomentes übereinstimmt, d.h. die Kreiselachse zeigt dann in die geographische Nordrichtung. Am Äquator ist die Richtkraft auf den Kreisel am größten, gegen die Pole nimmt sie ab. Ab einer Breite von ca. 70° sind keine Kreiselmessungen mehr möglich. Bei dynamisch abgestimmten Kreiseln (Rate-Kreiseln) sind Antriebsrotor und Schwungmasse durch Torsionsfedern voneinander entkoppelt, wodurch sich zwei Freiheitsgrade ergeben. Die Präzessionsbewegung wird durch eine elektromagnetische Lage-Stabilisierung der Schwungmasse verhindert. Der dafür benötigte Strom ist das

Maß für die Drehgeschwindigkeit relativ zu einer der sensitiven Achsen. Theodolite mit Rate-Kreisel können Standardabweichungen von 30" erreichen. Alternative Bauform sind die Pendelkreisel, bei denen der Kreisel wie ein Torsionspendel aufgehängt wird. Die Endpunkte der leicht gedämpften Schwingung um die Ruhelage im Meridian werden mit Hilfe einer Autokollimationseinrichtung verfolgt, woraus man auf die Mittellage schließen kann. Der vollautomatische Vermessungskreisel Gyromat 2000 der Firma DMT erreicht eine Standardabweichung von 3".

Beim optischen Kreisel wird der Sagnac-Effekt ausgenutzt, wobei die Rotation eines ringförmigen Lichtleitersystems gegenüber dem inertialen Bezugssystem detektiert wird. Zwei kohärente Wellenzüge durchlaufen ein ringförmiges Lichtleitersystem in gegensätzlicher Richtung und werden anschließend zur interferometrischen Auswertung überlagert. Es entstehen so Interferenzmuster, welche mit optischen Sensoren ausgewertet werden können. Die Umlaufzeit im unbewegten Zustand ist für beide Richtungen gleich. Versetzt man diese Anordnung in Rotation, so legt ein Wellenzug einen längeren Weg zurück, während sich der Weg des anderen Wellenzugs verkürzt. Diese Laufzeitunterschiede ergeben eine Phasenverschiebung $d\varphi$ zwischen beiden Wellenzügen, welche als Verschiebung des Interferenzmusters detektierbar ist. Dieser Effekt wird als Sagnac-Effekt bezeichnet.

$$d\varphi = \frac{8 \cdot \pi \cdot A}{\lambda \cdot c} \cdot \omega \tag{2.14}$$

Die Phasenverschiebung $d\varphi$ ist abhängig von der Winkelgeschwindigkeit ω , der Wellenlänge λ und der effektiven Fläche A des Rings. Die Lichtgeschwindigkeit wird hier mit c bezeichnet. Um einen gut messbaren Effekt zu erzielen, sollte die Fläche A sehr groß gewählt werden. Faseroptische Kreisel und Ringlaserkreisel sind gebräuchliche Ausführungen. Derartige Gyroskope finden sich heute fast in jedem Flugzeug.

Der Einsatz des Vermessungskreisels liefert unter Tage die geographische Nordrichtung. Misst man diese auch über Tage, kann man durch Vergleich mit der Orientierung innerhalb eines Festpunktnetzes die Meridiankonvergenz direkt vor Ort ermitteln. Die Koordinatenübertragung muss zusätzlich erfolgen, z.B. durch Lotung. Vermessungskreisel sind unterschiedlichen, systematisch wirkenden Einflüssen unterworfen, wie Temperaturschwankungen und Driften der Schwingungsmittellage des Kreisels während der Messung. Die zur Korrektur der Einflüsse der Temperaturschwankungen verwendeten Korrekturalgorithmen untersuchten u.a. Desiderio und Koch (1998). Da die quer zum Tunnel verlaufende Komponente der Lotabweichung unter Tage nur schwer bestimmbar ist, bewirkt die Lotabweichung eine systematische Richtungsabweichung bei der Kreiselmessung. Diese wirkt sich besonders bei langen Tunneln stark auf den Durchschlagsfehler aus (Marti u. a. 2004). Der Fehlerhaushalt einer Richtungsübertragung mit Hilfe eines Vermessungskreisels kann laut Ingensand u. a. (1998) wie folgt beschrieben werden:

2.3 Verlauf der Lotlinie 37

$$s_{gesamt} = \sqrt{s^2_{Netz} + s^2_{Ost-West-Komponente} + 2 \cdot s^2_{Theodolit} + 2 \cdot s^2_{Kreisel} + s^2_{Temperatur}}$$
(2.15)

 s_{Netz} Innere Genauigkeit einer Richtung im Festpunktnetz $s_{Theodolit}$ Genauigkeit einer optischen Richtungsübertragung

*s*_{Kreisel} Innere Genauigkeit des Kreisels

Standardabweichung der Temperatur-Korrekturfunktion

(Funktion des Temperaturunterschiedes zwischen beiden

Stationen der Richtungsübertragung)

*s*_{Ost-West-Komponente} Genauigkeit der Lotabweichung, abgeleitet aus gravimetri-

schen Messungen und Extrapolation

2.3 Verlauf der Lotlinie

Die Lotabweichungen gehen bei der vertikalen Punktübertragung direkt in die Genauigkeit der Punktkoordinaten ein. Sie müssen daher berücksichtigt werden. Da die Lotlinie zudem gekrümmt ist, unterscheiden sich die Korrekturwerte am oberen und unteren Ende der Lotlinie meist voneinander. So wurden beim Bau eines ca. 800 m tiefen Vertikalschachtes in Sedrun/ Schweiz Lotabweichungen von maximal 2,7 mgon bestimmt, was einer Lagekorrektur des Lotfußpunktes von 34 mm entspricht. Die Differenz der Lotabweichungen zwischen der oberen Schachtöffnung und der Schachtsohle betrug maximal 0,7 mgon (Schätti und Ryf 2004). Zur Bestimmung der Lotabweichungen an der Erdoberfläche wird meist ein aus lokalen Schweremessungen oder Satellitenverfahren (Satellitengeodäsie) bestimmtes Schwerefeldmodell der Erde verwendet. In der Vergangenheit war auch die Bestimmung nach astrogeodätischen Verfahren gebräuchlich (Marti 1997). Um die Lotabweichungen auch unterhalb der Erdoberfläche zu berechnen, wird zusätzlich zum Schwerefeldmodell ein Topographiemodell benötigt.

Zeitliche Änderung der Lotabweichung treten u.a. durch den Einfluss der Gezeiten (Torge 2003) aber auch durch die Stauhöhenschwankungen bei Überwachungsmessungen von Staubauwerken (Zaki 1963, Werner 1970) auf. Letztere können jedoch ebenfalls durch die Verwendung eines verfeinerten lokalen Topographiemodells bestimmt werden.

2.3.1 Schwerefeldmodell

Für das Schwerefeld der Erde können verschiedene Ansätze der Darstellung gewählt werden. Hier soll nur auf die in der Geodäsie gebräuchlichste Darstellung als Reihenentwicklung nach Kugelfunktionen eingegangen werden. In dieser Darstellungsform liegen weitgehend flächendeckende Koeffizientensätze zur praktischen Nutzung vor. Eine detaillierte Übersicht zu diesem Themenkomplex findet sich u.a. bei Heiskanen und Moritz (1967) und Torge (2003). Die folgenden Ausführungen sind an die Zusammenfassung von Korth (1997) angelehnt.

Das Schwerepotential der Erde W an einem durch seinen Ortsvektor \mathbf{x} beschriebenen Punkt setzt sich aus dem Gravitationspotential V und dem Zentrifugalpotential Z zusammen:

$$W(\mathbf{x}) = V(\mathbf{x}) + Z(\mathbf{x}) \tag{2.16}$$

Nach dem Newton'schen Gravitationsgesetz ergibt sich das Gravitationspotential durch Integration über alle Massen m der Erde einschließlich der Atmosphäre. Hierbei ist G die Gravitationskonstante und l der Abstand zwischen Auf- und Quellpunkt:

$$V(\mathbf{x}) = G \iiint_{Erd_{\rho}} \frac{dm}{l} = G \iiint_{Erd_{\rho}} \frac{\rho}{l} dV$$
(2.17)

Das Zentrifugalpotential kann mit der sehr gut bekannten Winkelgeschwindigkeit ω der Erde praktisch fehlerfrei berechnet werden. Der senkrechte Abstand von der Rotationsachse mit dabei mit d bezeichnet:

$$Z(\mathbf{x}) = \frac{\omega^2}{2} d^2 \tag{2.18}$$

Da die Dichtefunktion $\rho(\mathbf{x})$ der Erde nicht hinreichend bekannt ist, kann das Gravitationspotential $V(\mathbf{x})$ nicht mit Hilfe des Newton'schen Gravitationsgesetzes (Gl. 2.17) berechnet werden. Für den Außenraum gelingt aber eine konvergierende Reihenentwicklung von V, welche wegen der Quellen- und Rotationsfreiheit der Laplace'schen Differentialgleichung genügen muss:

$$\Delta V = 0 \tag{2.19}$$

Als eine spezielle Lösung dieser Gleichung ergibt sich die Reihenentwicklung von *V* nach Kugelfunktionen:

$$V(\mathbf{x}) = V(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{n} \left(\frac{a}{r} \right)^{n} \left(C_{n,m} \cos m\lambda + S_{n,m} \sin m\lambda \right) P_{n,m} (\cos \vartheta) \right]$$
(2.20)

 n, m, n_{max} Grad, Ordnung und Maximalgrad der Entwicklung

GM Geozentrische Gravitationskonstante

a große Halbachse des Erdellipsoids

 $C_{n,m}, S_{n,m}$ Kugelfunktionskoeffizienten

 $P_{n,m}(\cos \vartheta)$ zugeordnete Legendre'sche Funktionen

Der Gradient des Schwerepotentials ergibt die Schwere g:

$$g = \operatorname{grad} W \tag{2.21}$$

Um das globale Schwerepotential zu bestimmen wird eine Näherung W_0 als bekannt eingeführt. Der verbleibende Anteil wird als Störpotential T bezeichnet.

$$W(\mathbf{x}) = W_0(\mathbf{x}) + T(\mathbf{x}) \tag{2.22}$$

Der Anteil W_0 teilt sich wiederum auf in einen sinnvoll gewählten Hauptanteil des Gravitationspotentials V_0 und das praktisch fehlerfrei bestimmbare Zentrifugalpotential Z.

$$W_0(\mathbf{x}) = V_0(\mathbf{x}) + Z(\mathbf{x}) \tag{2.23}$$

2.3 Verlauf der Lotlinie 39

 V_0 kann durch verschiedene Modelle dargestellt werden, z.B. durch ein sphärisches Potential oder eine Kugelfunktionsentwicklung bis zu einem bestimmten Grad. Wird W_0 so gewählt, dass die Niveaufläche ein Niveauellipsoid mit den physikalischen Parametern Gesamtmasse M und Rotationswinkelgeschwindigkeit ω der Erde und den geometrischen Parametern a und f des Rotationsellipsoids ist, so spricht man vom Normalpotential U. Das Normalpotential kann in Analogie zu Gleichung 2.20 ebenfalls als Kugelfunktionsreihe entwickelt werden, muss jedoch um das Zentrifugalpotential ergänzt werden:

$$U(\mathbf{x}) = U(r,\vartheta) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n C_{n,0} P_{n,0} \left(\cos \vartheta \right) \right] + \frac{\omega^2}{2} r^2 \sin^2 \vartheta$$
 (2.24)

Wegen der Rotationssymmetrie enthält die Kugelfunktionsreihe nur zonale Terme. Die Normalschwere γ folgt daraus als Gradient des Normalpotentials:

$$\gamma = \operatorname{grad} U \tag{2.25}$$

In U und W ist jeweils ein Anteil aus der Gravitation und aus der Zentrifugalbeschleunigung enthalten. Da die Zentrifugalbeschleunigung der Erde mit hoher Genauigkeit bekannt ist, kann die Gleichheit der Zentrifugalanteile in W und U angenommen werden. Das Störpotential T folgt daraus als Differenz zwischen der Gravitation der Erde und der des Niveauellipsoids (Gl. 2.22) und kann ebenso als Reihenentwicklung in Kugelfunktionen angegeben werden. Auch hier wird die Entwicklung nur bis zu einem Maximalgrad n_{max} ausgeführt:

$$T(\mathbf{x}) = T(r, \vartheta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{n} \left(\frac{a}{r} \right)^{n} \left(\Delta C_{n,m} \cos m\lambda + \Delta S_{n,m} \sin m\lambda \right) P_{n,m} (\cos \vartheta) \right]$$
(2.26)

Die Geometrie des Geoides bzw. Quasigeoides lässt sich aus dem Störpotential mit Hilfe des Theorem von Bruns bestimmen. Hierbei wird aus dem Störpotential direkt die Geoidhöhe N bzw. die Höhenanomalie ζ berechnet:

$$N = \frac{T}{g}, \qquad \zeta = \frac{T}{\gamma} \tag{2.27}$$

Die Horizontalableitung der Geoidhöhe bzw. der Höhenanomalie in Richtung des Meridians und des ersten Vertikals ergibt die Komponenten (ξ, η) der Lotabweichung Θ in Abhängigkeit vom Störpotential:

$$\xi = -\frac{1}{\gamma(M+h)} \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \qquad \eta = -\frac{1}{\gamma(N+h)\cos\varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda}$$
 (2.28)

Hierbei werden in Gleichung 2.28 die ellipsoidischen Bogenelemente mit Hilfe des Meridiankrümmungsradius M, des Querkrümmungsradius N und der ellipsoidischen Höhe h berechnet. Eine detaillierte Darstellung der Algorithmen findet sich u.a. bei Wenzel (1985) und Rapp (1997). Die Bestimmung hochpräziser und lokal sehr hochauflösender Lotabweichungen kann mit dem von Hirt (2004) entwickelten digitalen Zenitkamerasystem erfolgen.

2.3.2 Topographiemodell

Um die Punktschweren unterhalb der Erdoberfläche und somit den Verlauf der Lotlinie bzw. die Lotabweichung an jedem Punkt der Lotlinie bestimmen zu können, bedarf es eines zusätzlichen Topographiemodells. Die Wirkung der topographischen Massen auf die unterschiedlichen Schwerefeldgrößen berechet sich aus dem Newton'schen Gravitationsgesetz nach Gleichung 2.17. Zur Auswertung der entsprechenden Integrale werden diese in Elementarkörper zerlegt, für die geschlossene Lösungen existieren. Die gesamte Wirkung der Topographie berechnet sich aus der Summation der Gravitation der einzelnen Elementarkörper (Götze 1988).

Bei großräumigen Aufgabenstellungen ist in vielen Fällen ein einfaches aus einem digitalen Höhenmodell abgeleitetes Massenmodell ausreichend. Es umfasst die Massen zwischen der Erdoberfläche und der Meereshöhe und wird meist mit einer Einheitsdichte von 2,67 g/cm³ (Dichte von Granit) berechnet. Lokal werden häufig verfeinerte Dichtemodelle benutzt, wobei die Dichtewerte aus geologischen Daten, Schwereprofilen und Gesteinsproben abgeschätzt werden (Torge 1989).

Neben der Topographie hat auch der Dichtekontrast an der Krustenmantelgrenze (Moho) großen Einfluss auf das Schwerefeld. Dieser Einfluss ist jedoch langwelliger Natur und hat keine wesentlichen lokalen Auswirkungen. Zur weiteren Modellverfeinerung können ebenfalls sehr lokal wirkende kleinere Einflüsse wie Wassermassen der Seen, Eismassen der Gletscher und quartäre Sedimentfüllungen einiger großer Täler berücksichtigt werden (Marti u. a. 2004).

Die Ausdehnung und Auflösung des benötigten Modells ist abhängig von der Topographie und den geforderten Genauigkeiten. Zur Modellierung des Einflusses geologischer Strukturen ist im Allgemeinen ein sehr grobes Modell der Störkörper ausreichend, welches nur bei hohem Dichtekontrast verfeinert werden muss. Der Einfluss auf die Lotabweichungen ist praktisch unabhängig von der vertikalen Ausdehnung des Modellgebietes, und es genügen oftmals nur wenige Kilometer. (Marti u. a. 2004)

Zur Abteufung eines 800 m tiefen Schachtes in Sedrun bestimmten Marti u. a. (2004) an Hand von gemessenen Schwerefeldkomponenten und Massenmodellen Lotabweichungen mit einer Genauigkeit von ca. 0,3 mgon.

2.4 Refraktion im vertikalen Schacht

Bei fast allen geodätischen Messungen dienen elektromagnetische Wellen als Signalträger. Diese werden von dem Medium, durch das sie sich fortbewegen, beeinflusst. Terrestrische geodätische Messungen werden ausschließlich im räumlich und zeitlich inhomogenen Medium Luft durchgeführt, wobei die vollständige Erfassung aller Zustandsgrößen dieses Mediums unlösbar ist. Aufgrund der inhomogenen Dichteverteilung des Ausbreitungsmediums verlaufen Visurstrahlen geodätischer

Messungen nicht streng geradlinig, sondern werden unterschiedlich stark abgelenkt. Dieser Effekt wird als Refraktion und die Ablenkung des Visurstrahls aus der Geraden als Refraktionswinkel bezeichnet. Ein Überblick über die Refraktionseinflüsse bei terrestrisch geodätischen Messungen sowie Methoden zur Reduktion bzw. Elimination findet sich u.a. bei Deußen (1999) und Böckem (2001). Wie u.a. Brunner (1979) zeigt, ist der Einfluss der Temperatur auf den Brechungsindex der Luft am größten. Folglich wird auch der Refraktionswinkel in erster Linie vom Temperaturgradienten rechtwinklig zur Ausbreitungsrichtung hervorgerufen. Pilgram (1992) beschäftigt sich speziell mit der Berücksichtigung untertägiger Wetterbedingungen auf den Brechungsindex.

In der Literatur finden sich insgesamt nur wenige quantitative Untersuchungen zur Dichteverteilung der Atmosphäre in vertikalen Schächten. Meist wird lediglich die Ablenkung eines vertikalen Zielstrahles in Abhängigkeit von der Teufe und den herrschenden atmosphärischen Bedingungen untersucht. Hier lässt sich generell zwischen

- ausziehenden Schächten (Luft strömt aus dem Schacht an die Oberfläche) und
- einziehenden Schächten (Oberflächenluft strömt in den Schacht)

unterscheiden. Bei den Einflüssen auf den Verlauf eines Zielstrahls unterscheiden u.a. Knorr (1989) und Rymarczyk (1990) nochmals zwischen

- Refraktion,
- Szintillation und
- Extinktion.

Diese Unterteilung soll hier beibehalten werden. Die drei Einflüsse werden im Folgenden für die Umgebung eins vertikalen Schachts konkretisiert und in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen näher beschrieben.

Laut Rymarczyk (1990) und Knorr (1989) versteht man unter Refraktion die langperiodischen Lageänderungen des Zielstrahls. Diese können erklärt werden durch eine noch laminare Strömung der
Luft, die ihre Temperatur im Tagesverlauf ändert. Rymarczyk untersuchte anhand zahlreicher
Messungen die zeitliche Lageänderung von Lotlaserpunkten in Abhängigkeit von der Teufe, dem
Abstand zur Schachtwand und den atmosphärischen Bedingungen. Bei einziehenden Schächten wurden Lageänderungen des Lotlaserpunktes von bis zu 0,5 m bei 1000 m Teufe beobachtet. Rymarczyk
zufolge wird das Schachtklima von einziehenden Schächten im Wesentlichen von der wechselnden Außentemperatur, der Gebirgstemperatur und dem Wetterstrom beeinflusst. Der mit der Teufe
zunehmende Luftdruck ist bei vertikalen Zielungen offenbar von untergeordneter Bedeutung. Bei
normalem Tagesverlauf strömt am Tag relativ wärmere und in den Abendstunden relativ kältere Luft

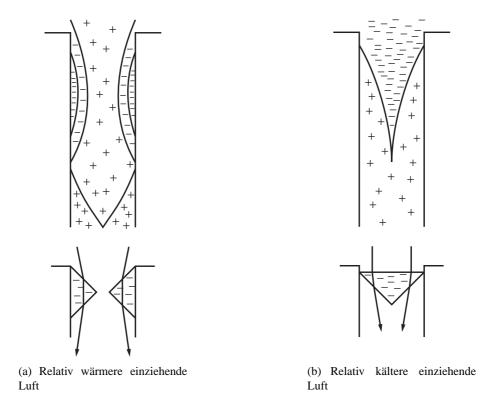


Abb. 2.9: Isothermen im oberen Schachtteil und Ablenkung des Zielstrahls (nach Rymarczyk 1990)

an der Schachtwand vorbei. Durch den Luftsog bedingt, passen sich bei großen Temperaturunterschieden die Isothermen im oberen Schachtteil der Strömungsrichtung an. Am Schachtrand bildet die Luft Schichtungen oder bei turbulenter Strömung flammenartig langgezogene Luftblasen fast parallel zur Schachtwand. Ist die einziehende Luft wärmer als die Schachtwand, kühlt sich die Luft in der Nähe der Schachtwand ab. Die wärmere Luft im mittleren Schachtteil kühlt sich in größerer Teufe, bedingt durch die Geothermik, nicht mehr ab (Abb. 2.9a). Ist die einziehende Luft kälter als im Schacht, wird diese von der Schachtwand aufgewärmt. Die Erwärmung erfolgt am Rand stärker als in der Mitte (Abb. 2.9b). Durch die Verlagerung des dichteren Mediums von der Schachtwand zur Mitte und zurück kommt es im Laufe des Tages zu refraktionsbedingten Ablenkungen des Zielstrahls in Richtung der Schachtachse. Eine Ablenkung quer zur radialen Richtung kann für praktische Bedürfnisse vernachlässigt werden.

Geitner (1969) erhält bei Messungen in den Abendstunden und kälterer einziehender Luft ähnliche Ergebnisse, und berichtet, dass seine Zielstrahlen im Vergleich zur Mechanischen Lotung "nach der Schachtmitte verschoben erscheinen". Hennes u. a. (1999) stellten vergleichbare Ergebnisse bei der Untersuchung eines horizontalen Tunnels mit einem Temperaturmesssystem fest. Auch hier zeigten sich bei den Messungen in der Nacht am Tunnelrand Luftschichten mit unterschiedlicher Temperatur, deren Schichtgrenzen fast parallel zur Tunnelwand ausgerichtet waren. Erst ab einer Tunneltiefe von ca. 1000 m änderten die Schichtgrenzen ihre Ausrichtung ungefähr senkrecht zur Tunnelachse.

Hennes u. a. bestimmten aus den hochauflösend gemessenen Temperaturen für Zielungen von 500 m Länge entlang der Tunnelwand eine nahezu gleichförmige Ablenkung des Zielstrahls in Richtung der Tunnelachse von mehr als 50 mm.

Kubišta (1968) entwickelte, ausgehend von einem für einziehende Schächte empirisch ermittelten parabolischen Verlauf der Schachttemperatur in horizontaler Richtung (Gröber u. a. 1955) mathematische Gleichungen zur Beschreibung des Strahlverlaufs. Für typische Vergleichsfälle berechnet er Ablenkungen des Zielstrahls in Richtung der Schachtachse, welche jedoch nicht durch praktische Messungen überprüft wurden.

Die Refraktion in ausziehenden Schächten untersuchte Knorr (1989). Das Grubenwetter in dem von ihm zur Untersuchung verwendeten Schacht Reiche-Zeche in Freiberg hat unabhängig von der Jahres- und Tageszeit eine gleichbleibende Temperatur zwischen 10 und 12 °C. Die Wettergeschwindigkeit ist mit 2 m/s eher gering. Es konnte keine Refraktion nachgewiesen werden.

Im Hinblick auf den Einfluss der Wettergeschwindigkeit auf die Refraktion vertritt Knorr (1989) die Ansicht, dass höhere Wettergeschwindigkeiten die Refraktion verhindern, da eine Durchmischung der Luftschichten stattfindet. Dagegen berichten Leonhardt und Lützenkirchen (1967), dass gerade bei großen Wettergeschwindigkeiten Refraktionseinflüsse auf den Zielstrahl vorhanden sind.

Den Einfluss unterschiedlicher Staubdichte auf die Refraktion untersuchten Dicke (1970) und Stelling und Thiemann (1983). Bei homogener Verteilung der Staubteilchen konnte kein Einfluss nachgewiesen werden. Sind die Staubteilchen jedoch ungleichmäßig verteilt, konnte eine Ablenkung des Zielstrahls aufgezeigt werden. Dicke begründete dies mit der Bildung von Luftschichten unterschiedlicher Dichte durch die inhomogene Staubkonzentration.

Als Ursache der Szintillation sieht Knorr (1989) eine ungenügende Durchmischung der Schachtatmosphäre an, wobei er bei seinen Versuchen selbst keine Szintillation beobachtete. Dagegen hat Geißler (1992) mit Zunahme der Wettergeschwindigkeit eine Verstärkung der Szintillation beobachtet. Ähnlich äußert sich auch Straßburg (1956).

Die Extinktion des Zielstrahls, also die Minderung von Leistung, Energiegehalt und somit Reichweite wird ausführlich von Knorr (1989) untersucht. Als Einflussfaktoren werden die Luftfeuchtigkeit, der Staubgehalt, der Dunst und die Wettergeschwindigkeit angegeben. Detailliert schreibt Knorr, dass unter 80 % rel. Luftfeuchtigkeit keine Leistungsminderung des Zielstrahls auftritt, ab 90 % rel. Luftfeuchtigkeit steigt der Extinktionskoeffizient an. Dies führt im Extremfall dazu, dass in ausziehenden Schächten im Schachtkopfbereich durch die einsetzende Kondenswasserbildung (Dunst, Nebel) Lotungen nicht mehr möglich sind. Nach Lautsch und Thieme (1968) haben insbesondere Staub und Nebel negativen Einfluss auf die Reichweite des Zielstrahls.

2.5 Spezifische Einflüsse auf die Richtungs- und Winkelmessung mit dem Tachymeter

Die Ergebnisse von Winkelmessungen weisen auch bei optimalen äußeren Bedingungen und gewissenhafter Durchführung Abweichungen auf. Die Ursachen liegen unter anderem in der Unvollkommenheit der Messinstrumente. Auch bei sehr sorgfältiger Herstellung können geringe Abweichungen von der Sollgeometrie nicht ausgeschlossen werden. Zudem verändern die einzelnen Bauteile durch Beanspruchung beim Gebrauch oder durch Temperaturänderungen ihre Solllage ein wenig. Diese Umstände haben Abweichungen zur Folge, welche entweder justiert, durch die Messanordnung eliminiert oder aber bestimmt und als Korrekturen an den Messwerten angebracht werden müssen. Die wichtigsten Abweichungen sind Achsen-, Exzentrizitäts-, Nullpunkts- und Teilungsabweichungen. Eine detaillierte Darstellung dieser Abweichungen findet sich unter anderem bei Deumlich und Staiger (2002) und Möser u. a. (2000).

Bei einem Tachymeter unterscheidet man die Vertikal- oder Stehachse VV, die Horizontal- oder Kippachse HH sowie die Kollimations- oder Zielachse ZZ (Abb. 2.10). Die lokale Lotlinie wird hier mit LL bezeichnet.

Zur korrekten Bestimmung von Horizontalrichtungen müssen folgende konstruktive Bedingungen erfüllt sein (Kahmen 1997):

- Die Zielachse muss rechtwinklig zur Kippachse stehen ($ZZ \perp HH$),
- die Kippachse muss rechtwinklig zur Stehachse sein $(HH \perp VV)$ und
- die Stehachse muss streng lotrecht stehen ($VV \parallel LL$).

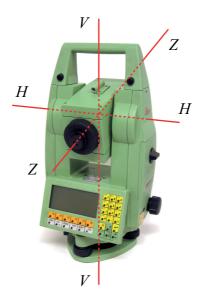


Abb. 2.10: Tachymeterachsen

Wird eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, so ist eine Zielachsenabweichung, eine Kippachsenneigung oder eine Stehachsenneigung vorhanden. Zur korrekten Bestimmung von Zenitwinkeln mittels des Vertikalkreises muss dieser zudem streng nach der lokalen Lotrichtung ausgerichtet sein. Ist dies nicht der Fall, liegt eine Höhenindexabweichung vor.

2.5.1 Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung

In der Literatur werden für den Einfluss der Achsenabweichungen entweder nur Näherungsgleichungen ohne Herleitung angegeben (Kahmen 1997) oder es erfolgt eine Herleitung mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie (Benčić 1990, Cooper 1982, Deumlich und Staiger 2002). Die dort angegebenen Gleichungen vernachlässigen jedoch den gemeinsamen Einfluss von Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung und führen für kleine Zenitwinkel zu nicht korrekten Ergebnissen. Eine Herleitung mit Hilfe von Vektoren, die den gemeinsamen Einfluss der beiden Achsenabweichungen auf die Horizontal- und Zenitwinkelmessung beschreiben, zeigt Matthias (1961). Er bezieht jedoch die Stehachsenneigung mit ein, welche keine Instrumentenabweichung ist und daher getrennt behandelt werden sollte. Stahlberg (1997) konnte durch die Einführung orthonormaler Dreibeine mit Ursprung im Achsenschnittpunkt und Anwendung von Rotationstransformationen den Zusammenhang zwischen Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung und ihrem Einfluss auf die Richtungsmessung darstellen. Die Darstellung führt zu exakten Gleichungen.

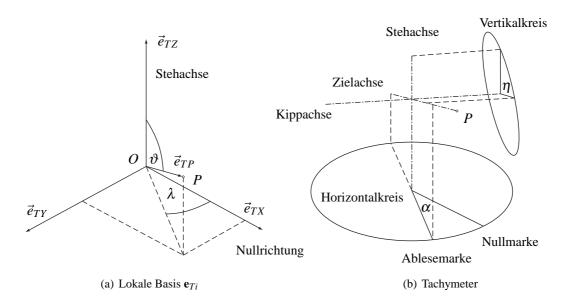


Abb. 2.11: Bestimmung des Einflusses von Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung auf die Winkelmessung (nach Stahlberg (1997)). Anhand der am Tachymeter abgelesenen und durch die Messabweichungen beeinflussten Messwerte α und η werden die Kugelkoordinaten λ und ϑ bezüglich der orthonormalen lokalen Basis \mathbf{e}_{Ti} bestimmt.

Die Realisierung des Tachymeters erfolgt hierbei als beliebig orientiertes orthonormales Dreibein. Ziel der Richtungsmessung ist die Bestimmung der Kugelkoordinaten λ und ϑ bezüglich der lokalen Basis \mathbf{e}_{Ti} (Abb. 2.11a). Der Basisvektor \vec{e}_{TZ} entspricht der Stehachse des Tachymeter. Der Basisvektor \vec{e}_{TX} ist rechtwinklig zu diesem und definiert die Nullrichtung des Horizontalkreises. \vec{e}_{TY} steht senkrecht auf beiden, wodurch sich ein Linkssystem ergibt. Der Ursprung O des Systems befindet sich im Achsenschnittpunkt.

Bei der Herstellung eines Tachymeters kommt es jedoch zu Abweichungen von der Idealgeometrie. D.h. statt der Kugelkoordinaten λ und ϑ ergeben sich die Ablesungen bzw. die Messwerte α und η (Abb. 2.11b). Der Winkel α ist definiert zwischen der Geraden durch den Mittelpunkt und die Nullmarke des Horizontalkreises und der Geraden durch den Mittelpunkt und die Ablesemarke des Horizontalkreises. Der Winkel η ist definiert zwischen den Ebenen, die durch die Kippachse HH und die Stehachse VV und durch die Kippachse HH und die Zielachse ZZ aufgespannt werden. Diese Festlegungen gelten unter der Voraussetzung, dass die drei Achsen sich in einem Punkt schneiden und keine sekundären Achsenabweichungen aufweisen, die Teilkreise rechtwinklig auf den entsprechenden Achsen stehen und bei beiden Teilkreisen keine Indexabweichungen existieren.

Zielachsenabweichung

Eine Zielachsenabweichung c entsteht, wenn die Zielachse ZZ nicht rechtwinklig zur Kippachse HH des Instruments steht (Abb. 2.12). Die Zielachsenabweichung kann durch Anzielen eines Punktes in beiden Fernrohrlagen bei einem Zenitwinkel von $\zeta=100\,\mathrm{gon}$ bestimmt werden. Als Differenz aus beiden Horizontalkreisablesungen erhält man jeweils die doppelte Zielachsenabweichung.

$$c = \frac{\left(\alpha^{II} - \alpha^{I}\right) - 200\,\mathrm{gon}}{2} \tag{2.29}$$

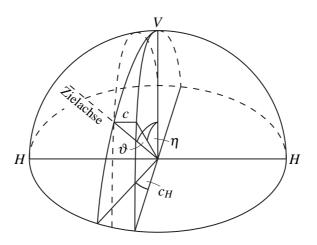


Abb. 2.12: Zielachsenabweichung

Für den Einfluss der Zielachsenabweichung auf eine Horizontalrichtungsmessung c_H gilt unter der Annahme, dass keine Kippachsenneigung vorliegt:

$$\tan c_H = \frac{\tan c}{\sin \eta} \tag{2.30}$$

Im Horizont entspricht der Einfluss der Zielachsenabweichung auf eine Horizontalrichtungsmessung c_H dem Wert der Zielachsabweichung c selbst. Gegen den Zenit und den Nadir wird c_H immer größer, in diesen Punkten selbst erreicht c_H maximal 100 gon.

Für ϑ ergibt sich, ebenfalls unter der Annahme, dass keine Kippachsenneigung vorliegt:

$$\cos \vartheta = \cos c \cdot \cos \eta \tag{2.31}$$

bzw. für den Einfluss der Zielachsenabweichung auf eine Vertikalwinkelmessung c_V :

$$c_V = \vartheta - \eta \tag{2.32}$$

Im Horizont besitzt eine Zielachsenabweichung keinen Einfluss auf eine Vertikalwinkelmessung. Der Wert nimmt jedoch mit kleiner bzw. größer werdendem Winkel η zu und erreicht für $\eta=0$ gon bzw. $\eta=200$ gon sein Maximum von $c_V=c$.

Kippachsenneigung

Eine Kippachsenneigung *i* entsteht, wenn die Kippachse *HH* nicht rechtwinklig zur Stehachse *VV* des Instruments steht (Abb. 2.13).

Für den Einfluss der Kippachsenneigung auf eine Horizontalrichtungsmessung i_H gilt unter der Annahme, dass keine Zielachsenabweichung vorliegt:

$$tan i_H = \frac{\sin i}{\tan \eta} \tag{2.33}$$

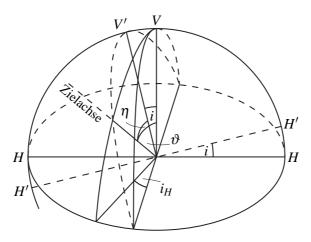


Abb. 2.13: Kippachsenneigung

Im Horizont ist der Einfluss der Kippachsenneigung auf eine Horizontalrichtungsmessung i_H gleich Null. Gegen den Zenit und den Nadir wird i_H immer größer, in diesen Punkten selbst erreicht i_H maximal 100 gon. Die Kippachsenneigung kann nach Beseitigung der Zielachsenabweichung durch Anzielen eines hochgelegenen Punktes in beiden Fernrohrlagen bestimmt werden. Die um 200 gon verminderte Differenz der beiden Kreisablesungen entspricht dem Einfluss der doppelten Kippachsenneigung.

$$i = \frac{\left(\alpha^{II} - \alpha^{I}\right) - 200\,\mathrm{gon}}{2} \cdot \tan\eta \tag{2.34}$$

Entsprechend Gleichung 2.31 erhält man für ϑ unter der Annahme, dass keine Zielachsenabweichung vorliegt:

$$\cos \vartheta = \cos i \cdot \cos \eta \tag{2.35}$$

Daraus lässt sich wiederum der Einfluss der Kippachsenneigung auf eine Vertikalwinkelmessung i_V bestimmen:

$$i_V = \vartheta - \eta \tag{2.36}$$

Analog zum Einfluss einer Zielachsenabweichung besitzt auch eine Kippachsenneigung im Horizont keinen Einfluss auf eine Vertikalwinkelmessung. Der Wert nimmt jedoch ebenfalls mit kleiner bzw. größer werdendem Winkel η zu und erreicht für $\eta=0$ gon bzw. $\eta=200$ gon sein Maximum von $i_V=i$.

Gemeinsamer Einfluss von Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung

In den vorhergehenden Kapiteln wurde der Einfluss der Zielachsenabweichung und der Kippachsenneigung auf eine Horizontal- bzw. Vertikalwinkelmessung separat behandelt. In der Praxis treten diese beiden Abweichungen jedoch nahezu niemals getrennt voneinander auf.

Für den Gesamteinfluss einer Zielachsenabweichung und einer Kippachsenneigung auf eine Horizontalrichtungsmessung ci_H ergibt sich:

$$\tan ci_H = \frac{\cos i \cdot \tan c}{\sin \eta} + \frac{\sin i}{\tan \eta} \tag{2.37}$$

Wie Gleichung 2.37 zeigt, sind die Einflüsse beider Abweichungen nicht unabhängig voneinander. Eine getrennte Ermittlung beider Einflüsse ist daher nicht exakt und kann bei steilen Visuren zu beträchtlichen Fehlern führen. Auch zeigt sich, dass ci_H bei einem Winkel von $\eta=100\,\mathrm{gon}$ im Allgemeinen nicht gleich der Zielachsenabweichung c ist. Der Einfluss nimmt gegen den Zenit und den Nadir an Größe zu, in diesen Punkten selbst erreicht ci_H sein Maximum von 100 gon.

Für die Kugelkoordinate ϑ ergibt sich:

$$\cos \vartheta = \cos c \cdot \cos i \cdot \cos \eta - \sin c \cdot \sin i \tag{2.38}$$

Der Einfluss beider Abweichungen auf eine Vertikalwinkelmessung ci_V lässt sich einfach bestimmen nach:

$$ci_V = \vartheta - \eta \tag{2.39}$$

Wie Gleichung 2.38 zeigt, ist ci_V beim Vorliegen einer Zielachsenabweichung und einer Kippachsenneigung auch bei einem Winkel von $\eta=100\,\mathrm{gon}$ ungleich Null. Der Wert nimmt mit kleiner bzw. größer werdendem Winkel η zu und erreicht für $\eta=0\,\mathrm{gon}$ bzw. $\eta=200\,\mathrm{gon}$ sein Maximum von $ci_V=c+i$.

Messungen in beiden Fernrohrlagen

Wird ein Punkt mit dem Strichkreuz sowohl in Lage I als auch in Lage II unter dem gleichen Vertikalwinkel $\eta^I = \eta^{II}$ angezielt, so ermittelte Stahlberg (1997) für die Ablesungen am Horizontalkreis:

$$\alpha^{II} = \alpha^I + 200 \operatorname{gon} + 2 \cdot ci_H \tag{2.40}$$

Wird die Mittelbildung der Horizontalrichtungsmessungen in üblicher Weise nach

$$\frac{\alpha^I + \alpha^{II} - 200 \operatorname{gon}}{2} = \alpha^I + ci_H = \lambda^I$$
(2.41)

vollzogen, beseitigt sie den Einfluss der beiden Abweichungen auf die Richtungsmessung.

Die Mittelbildung der Vertikalkreisablesung nach

$$\frac{\eta^{I} + (400 \operatorname{gon} - \eta^{II})}{2} = \frac{\eta^{I} + (400 \operatorname{gon} - (-\eta^{I}))}{2} = \eta^{I}$$
(2.42)

führt jedoch nicht zur gesuchten Kugelkoordinate ϑ^I sondern zu η^I . Durch Messung in zwei Lagen kann ci_V demnach nicht beseitigt werden. Dies ist besonders bei Visuren nahe dem Zenit bzw. dem Nadir zu beachten. In diesen Fällen sind die Achsenabweichungen zu bestimmen und die Vertikalwinkel rechnerisch zu korrigieren.

2.5.2 Höhenindexabweichung

Bei der Höhenindexabweichung handelt es sich um eine Nullpunktsabweichung. Während beim Messen von Horizontalrichtungen der Horizontalkreis fixiert ist und die Ablesemarke der Bewegung des Fernrohrs folgt, steht bei der Messung von Zenitwinkeln die Ablesemarke fest und der Vertikalkreis folgt den Bewegungen des Fernrohrs. Der Zenitwinkel wird nicht wie der Horizontalwinkel als Differenz aus zwei Richtungen bestimmt, sondern kann direkt an der Ablesemarke abgegriffen werden. Fehlerfreie Zenitwinkel erhält man, wenn

 die Zielachse des Fernrohrs auf der Vertikalkreisebene mit den Stellen 100 und 300 gon übereinstimmt und

- die Ablesemarke des Vertikalkreises parallel zur Lotrichtung ausgerichtet ist.

Abweichungen hiervon verfälschen den abgelesenen Zenitwinkel und werden als Höhenindexabweichung *h* bezeichnet. Sie ist als Korrektur an den Zenitwinkel anzubringen.

$$h = h' + h'' \tag{2.43}$$

Während h' durch Abweichungen bei der Kalibrierung des Strichkreuzes verursacht wird, entsteht h'' durch Abweichungen bei der Kalibrierung der Ablesemarke des Vertikalkreises. Sind beide Abweichungen gleich groß, jedoch gegensätzlich gerichtet, so werden fehlerfreie Zenitwinkel erhalten.

Zielt man einen Punkt in beiden Fernrohrlagen an (Abb. 2.14), so erhält man in der Fernrohrlage I die Ablesung

$$\eta^I = \zeta - h \tag{2.44}$$

und in Fernrohrlage II die Ablesung

$$\eta^{II} = 200 \operatorname{gon} - \zeta - h \tag{2.45}$$

Unter der Voraussetzung, dass h in beiden Fernrohrlagen gleich groß ist, folgt für den Zentiwinkel, welcher frei von einer Höhenindexabweichung ist

$$\zeta = \frac{\eta^{I} + (400 \operatorname{gon} - \eta^{II})}{2} \tag{2.46}$$

Die Höhenindexabweichung lässt sich berechnen nach

$$h = \frac{400 \operatorname{gon} - (\eta^I + \eta^{II})}{2} \tag{2.47}$$

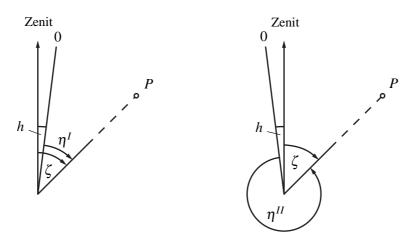


Abb. 2.14: Bestimmung der Höhenindexabweichung

2.5.3 Stehachsenneigung

Bei der Stehachsenneigung u handelt es sich um keine Instrumentenabweichung im eigentlichen Sinne sondern um einen Aufstellfehler. Sie tritt auf, wenn die Stehachse des Tachymeters nicht streng lotrecht steht. Durch die Stehachsenneigung u als Winkel zwischen der Stehachse SV' und der Lotlinie SV ist auch die Horizontalkreisebene gegen die Horizontale um den Winkel u geneigt (Abb. 2.15).

Mathematische Beschreibung

Der durch V und V' verlaufende Großkreisbogen BVB liegt in der Vertikalebene. Zielt man einen auf diesem Bogen liegenden Punkt an, so ist die Kippachse H_1H_1 horizontal und die Horizontal-kreisablesung frei von einer Stehachsenneigung. Die Stehachsenneigung u wirkt sich direkt auf die Zenitwinkelmessung aus. Wird ein Punkt P außerhalb des Bogens angezielt, so lässt sich die Stehachsenneigung u aufteilen in einen Anteil u_{HH} in Richtung der Kippachse und einen Anteil u_{VV} in Richtung der Vertikalkreisebene.

$$|u| = \sqrt{u_{HH}^2 + u_{VV}^2} \tag{2.48}$$

Die Kippachse $H_2'H_2'$ ist um den Winkel u_{HH} gegen die Horizontale geneigt. Die Normale zur Stehachse in Zielachsenrichtung C'C' bildet den Winkel u_{VV} mit der Horizontalen.

Wird die in Kapitel 2.5.1 eingeführte Darstellung eines Tachymeters durch ein orthonormales Dreibein weitergeführt, so lässt sich der Anteil u_{HH} in Richtung der Kippachse als eine Drehung der lokalen Basis \mathbf{e}_{Ti} um den Basisvektor \vec{e}_{TX} darstellen (Abb. 2.16). Eine Neigung der Stehachse in Richtung der Kippachse wirkt hierbei wie eine Kippachsenneigung.

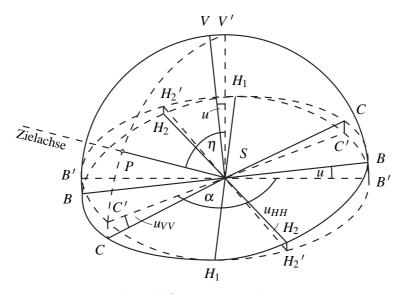


Abb. 2.15: Stehachsenneigung

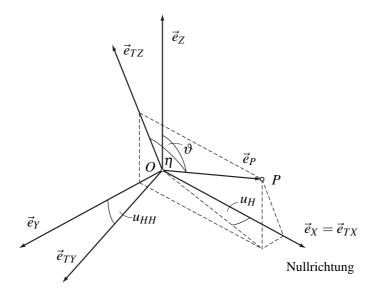


Abb. 2.16: Einfluss des Anteils u_{HH} der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse

Die in Abbildung 2.16 dargestellte Basis \mathbf{e}_i beschreibt das übergeordnete Koordinatensystem. Der Vektor \vec{e}_Z orientiert sich an der lokalen Lotlinie. Die Vektoren \vec{e}_X , \vec{e}_Y und \vec{e}_Z stehen paarweise senkrecht aufeinander und schneiden sich im Ursprung O. Das Koordinatensystem des Tachymeters wird durch die Basis \mathbf{e}_{Ti} dargestellt. Der Vektor \vec{e}_{TX} steht senkrecht zum Vektor \vec{e}_{TZ} . Der Vektor \vec{e}_Y ist rechtwinklig zu \vec{e}_{TX} und \vec{e}_{TZ} . Alle drei Vektoren schneiden sich ebenfalls im Ursprung. Die Vektoren \vec{e}_X und \vec{e}_{TX} zeigen in Richtung der Ablesemarke des Horizontalkreises. Die Richtung zu einem Punkt P, welcher sich in einer Ebene aufgespannt durch die Vektoren \vec{e}_{TX} und \vec{e}_{TZ} befindet, kann durch seinen Einheitsvektor \vec{e}_P dargestellt werden. Bezüglich der Basis \mathbf{e}_{Ti} gilt:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}} = \begin{pmatrix} \sin \eta \\ 0 \\ \cos \eta \end{pmatrix} \tag{2.49}$$

Nach einer Rotationstransformation auf die Basis \mathbf{e}_i ergeben sich die Kugelkoordinaten von Punkt P als Winkel u_{HH} und ϑ . Punkt P lässt sich durch Rotation um \vec{e}_{TX} mit dem Rotationswinkel u_{HH} bezüglich der Basis \mathbf{e}_i darstellen als:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \mathbf{R}_{X} \left(u_{HH} \right) \cdot \vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{T_{i}}}} \tag{2.50}$$

Für die Drehmatrix $\mathbf{R}_X(u_{HH})$ gilt (Kraus 2004):

$$\mathbf{R}_{X}(u_{HH}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos u_{HH} & -\sin u_{HH} \\ 0 & \sin u_{HH} & \cos u_{HH} \end{pmatrix}$$
(2.51)

Der Anteil der Stehachsenneigung in Richtung der Zielachse u_{VV} lässt sich ebenfalls als Rotationstransformation der lokalen Basis \mathbf{e}_{Ti} darstellen (Abb. 2.17).

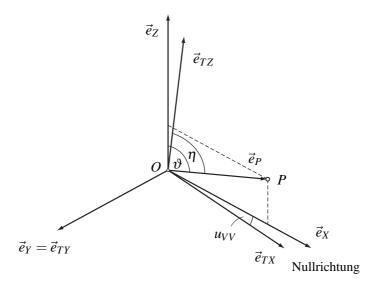


Abb. 2.17: Einfluss des Anteils u_{VV} der Stehachsenneigung in Richtung der Zielachse

Punkt P wird dabei durch Rotation um \vec{e}_{TY} mit dem Rotationswinkel u_{VV} bezüglich der Basis \mathbf{e}_i abgebildet. Der in Gleichung 2.49 definierte Einheitsvektor $\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}}$ des Punktes P kann in Bezug auf die Basis \mathbf{e}_i angegeben werden als:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \mathbf{R}_{Y}\left(u_{VV}\right) \cdot \vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}} \tag{2.52}$$

Die Drehmatrix $\mathbf{R}_{Y}(u_{VV})$ lautet hier:

$$\mathbf{R}_{Y}(u_{VV}) = \begin{pmatrix} \cos u_{VV} & 0 & \sin u_{VV} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin u_{VV} & 0 & \cos u_{VV} \end{pmatrix}$$
 (2.53)

In der Praxis treten die Neigungen u_{VV} und u_{HH} normalerweise gemeinsam auf. Somit sind hintereinander beide Rotationen auf den Vektor \vec{e}_P anzuwenden, um diesen bezüglich der Basis \mathbf{e}_i darzustellen. Da die Matrizenmultiplikation im Allgemeinen nicht kommutativ ist, ergeben sich hier prinzipiell zwei Möglichkeiten. Je nachdem in welcher Reihenfolge die Rotationen auf den Vektor \vec{e}_P angewendet werden, führt dies zu zwei nicht gleichen Transformationen. Die in modernen Tachymetern eingebauten zweiachsigen Neigungssensoren registrieren zwar die Neigung in Richtung der Kipp- und Zielachse, aufgrund der Messwerte kann jedoch nicht auf die Reihenfolge der Rotationen geschlossen werden. Für den Fall, dass die Basis \mathbf{e}_{Ti} zuerst um den Vektor \vec{e}_{TX} gedreht wird, folgt für den Vektor \vec{e}_P bezüglich der Basis \mathbf{e}_i :

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \mathbf{R}_{Y}\left(u_{VV}\right) \cdot \mathbf{R}_{X}\left(u_{HH}\right) \cdot \vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}} \tag{2.54}$$

bzw. in aufgelöster Form:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \begin{pmatrix} \cos u_{VV} \cdot \sin \eta + \sin u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \eta \\ -\sin u_{HH} \cdot \cos \eta \\ -\sin u_{VV} \cdot \sin \eta + \cos u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \eta \end{pmatrix}$$

Hieraus lassen sich die Kugelkoordinaten des Punktes P zur Basis \mathbf{e}_i einfach bestimmen. Der Einfluss einer Stehachsenneigung auf die Horizontalrichtungsmessung u_H berechnet sich nach:

$$\tan u_H = \frac{Y_{P_{\mathbf{e}_i}}}{X_{P_{\mathbf{e}_i}}} = \frac{-\sin u_{HH} \cdot \cos \eta}{\cos u_{VV} \cdot \sin \eta + \sin u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \eta}$$
(2.55)

Und für den Zenitwinkel ζ folgt:

$$\cos \zeta = \cos \vartheta = Z_{P_{\mathbf{e}_i}} = -\sin u_{VV} \cdot \sin \eta + \cos u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \eta \tag{2.56}$$

Entsprechend den vorhergehenden Darstellungen lässt sich der Einfluss einer Stehachsenneigung auf die Vertikalwinkelmessung u_V angeben als:

$$u_V = \zeta - \eta = \vartheta - \eta \tag{2.57}$$

Analog zu Gleichung 2.54 kann für den Fall, dass die Basis \mathbf{e}_{Ti} zuerst um den Vektor \vec{e}_{TY} gedreht wird, für den Vektor \vec{e}_P bezüglich der Basis \mathbf{e}_i auch geschrieben werden:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \mathbf{R}_{X} (u_{HH}) \cdot \mathbf{R}_{Y} (u_{VV}) \cdot \vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}}$$

$$(2.58)$$

Die Berechnung der Kugelkoordinaten kann aus Gleichung 2.58 in gleicher Weise erfolgen. Die sich dabei ergebenden Gleichungen sind formal jedoch nicht mit den Gleichungen 2.55 und 2.56 identisch. Bei der Berechnung der Einflüsse einer Stehachsenneigung auf die Richtungsmessung liefern sie jedoch im geforderten Genauigkeitsbereich numerisch gleiche Ergebnisse (Tab. 2.1). Die Unterschiede der aus beiden Gleichungen berechneten Werte sind selbst für sehr steile Zenitwinkel vernachlässigbar gering. Daher werden im Folgenden nurmehr die Gleichungen 2.55, 2.56 und 2.57 verwendet.

Um die Größenordnungen des Einflusses einer Stehachsenneigung auf die Vertikal- und Horizontalrichtungsbestimmung zu verdeutlichen, aber auch um die numerische Übereinstimmung der beiden Berechnungswege zu belegen, sind in Tabelle 2.1 die Ergebnisse für ausgewählte Winkel η zusammengestellt. Für die Berechnungen wurde $c_{HH}=0.01$ gon und $c_{VV}=0.01$ gon gewählt.

Berechnung der Anteile der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse und in Richtung der Vertikalkreisebene

Neigungskompensatoren in modernen elektronischen Tachymetern bestehen in der Regel aus fest im Tachymeter verbauten zweiachsigen Neigungssensoren. Ihre beiden Sensorachsen sind parallel zur Kippachse und der dazu rechtwinkligen Richtung ausgerichtet. Wird das Tachymeter um seine

η in gon	0,00	0,01	0,10	1,00	10,00	100,00
<i>u_{HH}</i> (n. Gl. 2.54)	50,000000	29,516724	5,771583	0,630245	0,063075	0,000000 $-0,000002$
<i>u_{HH}</i> (n. Gl. 2.58)	50,000000	29,516723	5,771582	0,630243	0,063073	
<i>u</i> _{VV} (n. Gl. 2.54)	0,014142	0,012361	0,010454	0,010049	0,010005	0,010000
<i>u</i> _{VV} (n. Gl. 2.58)	0,014142	0,012361	0,010454	0,010049	0,010005	0,010000

Tab. 2.1: Einfluss der Stehachsenneigung auf die Richtungsbestimmung in gon ($c_{HH} = c_{VV} = 0.01$ gon)

Stehachse gedreht, so dreht sich auch der Neigungssensor um die Stehachse des Tachymeters. Die vom Neigungssensor registrierten Werte entsprechen direkt den gesuchten Anteilen der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse u_{HH} und in Richtung der Vertikalkreisebene u_{VV} .

Die Stehachsenneigung eines Tachymeters kann jedoch auch mit einem externen Neigungssensor erfasst werden. Für den Fall, dass der zweiachsige Neigungssensor zwar fest mit der Stehachse des Tachymeters verbunden ist, sich bei einer Drehung des Tachymeters jedoch nicht mit diesem dreht, müssen die Anteile u_{HH} und u_{VV} aus den Neigungswerten rechnerisch bestimmt werden.

Zur Berechnung wird vorausgesetzt, dass der Neigungssensor starr mit der Stehachse des Tachymeters verbunden ist (Abb. 2.18). Die Stehachse des Neigungssensors Z_N soll zudem parallel zur Stehachse des Tachymeters sein. Der Neigungssensor ist frei von Restfehlern und somit entspricht die angezeigte Neigung dem Winkel zwischen Stehachse und lokaler Lotlinie LL. Die Rotation des Neigungssensors um seine X_N -Achse wird mit ω_N , um seine Y_N -Achse mit φ_N bezeichnet. Der Winkel zwischen X_N -Achse und Vertikalkreisebene des Tachymeters wird mit κ bezeichnet.

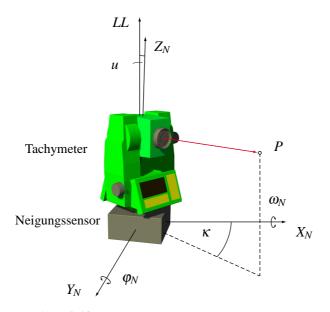


Abb. 2.18: Tachymeter mit externem Neigungssensor

Aus den vom Neigungssensor erfassten Neigungen φ_N und ω_N lässt sich der Betrag und die Richtung der Stehachsenneigung u im System des Neigungssensors berechnen:

$$|u| = \sqrt{\varphi_N^2 + \omega_N^2} \tag{2.59}$$

$$\tan \alpha_u = \frac{\omega_N}{\varphi_N} \tag{2.60}$$

 α_u bezeichnet hier den Winkel zwischen positiver X_N -Achse und der Richtung, in die die Stehachse geneigt ist.

Um aus diesen Werten die Anteile der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse und rechtwinklig zu dieser zu berechnen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Werte von u_{HH} und u_{VV} können sowohl über eine Rotationstransformation, eine ebene Transformation als auch mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie berechnet werden.

Rotationstransformation: Die Transformation, die zur Berechnung des Einflusses der Stehachsenneigung auf die Vertikal- und Horizontalrichtungsmessung verwendet wurde, wird hierbei um eine Rotation um den Vektor \vec{e}_Z erweitert. Für den Einheitsvektor des Punktes P bezüglich der Basis \mathbf{e}_{Ti} soll hier gelten:

$$ec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}} = \left(egin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \end{array}
ight)$$

Für den Vektor \vec{e}_P bezüglich der Basis \mathbf{e}_i folgt daraus:

$$\vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{i}}} = \mathbf{R}_{Z}(\kappa) \cdot \mathbf{R}_{Y}(\varphi_{N}) \cdot \mathbf{R}_{X}(\omega_{N}) \cdot \vec{e}_{P_{\mathbf{e}_{Ti}}}$$
(2.61)

Wobei für die Drehmatrix $\mathbf{R}_Z(\kappa)$ gilt:

$$\mathbf{R}_{Z}(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0\\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
 (2.62)

Die gesuchten Werte u_{VV} und u_{HH} berechnen sich daraus folgend nach:

$$u_{VV} = \arcsin X_{P_{\mathbf{e}_i}} = \arcsin \left(\sin \kappa \cdot \sin \omega_N + \cos \kappa \cdot \sin \varphi_N \cdot \cos \omega_N\right)$$
 (2.63)

$$u_{HH} = \arcsin Y_{P_{\mathbf{e}_i}} = \arcsin(-\cos\kappa \cdot \sin\omega_N + \sin\kappa \cdot \sin\varphi_N \cdot \cos\omega_N)$$
 (2.64)

Da sich aus den vom Neigungssensor erfassten Rotationswinkeln nicht auf die Reihenfolge der Rotationen schließen lässt, kann in Gleichung 2.61 auch die Drehungen um den Vektor \vec{e}_X bzw. \vec{e}_Y vertauscht werden. Dies führt zu unterschiedlichen Gleichungen, welche jedoch im Hinblick auf die Instrumentengenauigkeit numerisch gleiche Ergebnisse liefern (vgl. Tab. 2.1).

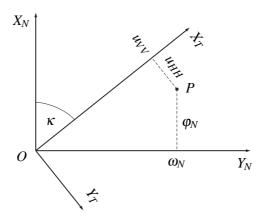


Abb. 2.19: Berechnung von u_{VV} und u_{HH} mittels ebener Transformation

Ebene Transformation: Einfach lassen sich u_{VV} und u_{HH} auch durch eine ebene Transformation bestimmen. Dabei werden die Neigungswerte ω_N und φ_N als Koordinatenpaar eines Punktes P in einem rechtwinkligen Koordinatensystem mit den Achsen X_N und Y_N betrachtet (Abb. 2.19). Dieser Punkt P lässt sich durch eine ebene Transformation in das ebenfalls rechtwinklige Koordinatensystem des Tachymeters (X_T, Y_T) überführen. Die beiden Koordinatensysteme sind dabei um den Ursprung O im Winkel κ zueinander verdreht.

Die gesuchten Neigungen können bestimmt werden nach (Luhmann 2003):

$$u_{VV} = \cos \kappa \cdot \varphi_N + \sin \kappa \cdot \omega_N \tag{2.65}$$

$$u_{HH} = -\sin\kappa \cdot \varphi_N + \cos\kappa \cdot \omega_N \tag{2.66}$$

Sphärische Trigonometrie: Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Anteile der Stehachsenneigung u_{VV} und u_{HH} mit Hilfe der sphärischen Trigonometrie zu berechnen. Abbildung 2.20 stellt einen Ausschnitt aus Abbildung 2.15 dar.

Der Betrag von u_{HH} ergibt sich aus dem sphärischen Dreieck $H_1H_2H_2'$. Da SH_1 lotrecht auf der Vertikalebene durch SBB' steht, entspricht der sphärische Winkel $H_2H_1H_2'$ dem Betrag der Stehachsenneigung u. Der sphärische Winkel $H_1H_2'H_2$ ist ein rechter Winkel. Werden die Berechnungen auf einer Einheitskugel mit dem Radius r=1 und dem Mittelpunkt S durchgeführt, so entspricht der Großkreisbogen p zwischen H_1 und H_2' dem Winkel H_1SH_2' in Radiant. Berücksichtigt man, dass u ein kleiner Wert ist, ergibt sich nach dem Winkelkosinussatz der sphärischen Trigonometrie für den sphärischen Winkel $H_1H_2H_2'$ ebenfalls ein rechter Winkel. Daraus folgt nach dem Sinussatz der sphärischen Trigonometrie für den Betrag der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse

$$u_{HH} = \arcsin\left(\sin u \cdot \sin p\right) \tag{2.67}$$

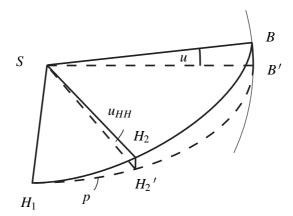


Abb. 2.20: Berechnung des Anteils der Stehachsenneigung in Richtung der Kippachse

und für den Betrag der Stehachsenneigung in Richtung der Vertikalkreisebene u_{VV}

$$u_{VV} = \arcsin\left(\sin u \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - p\right)\right) \tag{2.68}$$

mit dem Winkel p

$$p = \alpha_u - \kappa \tag{2.69}$$

Die dargestellten Verfahren können zur Berechnung von u_{VV} und u_{HH} äquivalent verwendet werden. Sie liefern zur Berechnung der Anteile der Stehachsenneigung im geforderten Genauigkeitsbereich numerisch gleiche Ergebnisse. Dies soll anhand von Tabelle 2.2 dargestellt werden.

Der Einfluss der Stehachsenneigung auf eine Horizontal- bzw. Vertikalwinkelmessung kann nicht durch Messungen in zwei Fernrohrlagen eliminiert werden.

Tab. 2.2: Ergebnisse der	Berechnung von u_{VV} un	$d u_{HH} (\omega_N = 0, 1)$	$2 \operatorname{gon}, \varphi_N = 0,$	1 gon und $\kappa = 30$ gon)
---------------------------------	----------------------------	------------------------------	--	------------------------------

	u_{VV} in gon		u_{HH} in gon
nach Gleichung 2.63	0,179898	nach Gleichung 2.64	0,132802
nach Gleichung 2.65	0,179899	nach Gleichung 2.66	0,132802
nach Gleichung 2.68	0,179899	nach Gleichung 2.67	0,132802

2.5.4 Besonderheiten bei Messungen nahe dem Zenit bzw. Nadir

Bei Messungen mit dem Tachymeter nahe dem Zenit bzw. theoretisch auch nahe dem Nadir gibt es einige Besonderheiten zu beachten.

Durch die Zielachsenabweichung und die Kippachsenneigung wird um die Stehachse ein Bereich begrenzt, in dem Punkte nicht durch die Zielachse angezielt werden können. Dieser Bereich lässt sich durch einen Drehkegel beschreiben (Abb. 2.21). Seine Spitze liegt im Schnittpunkt von Ziel-

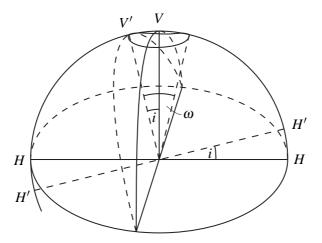


Abb. 2.21: Durch die Zielachse nicht erfassbarer Bereich um den Zenit bzw. Nadir am Beispiel einer Kippachsenneigung

und Kippachse, die Stehachse bildet seine Rotationsachse und sein Öffnungswinkel ω beträgt die doppelte Summe aus Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung.

$$\omega = 2 \cdot (c+i) \tag{2.70}$$

Punkte in diesem Bereich können jedoch trotzdem gemessen werden, indem man mit dem Horizontalstrich ihre Vertikalwinkel in zueinander rechtwinkligen Azimuten bestimmt.

Die Einflüsse der Zielachsenabweichung und der Kippachsenneigung auf die Horizontalrichtungsmessung nehmen gegen den Zenit als auch gegen den Nadir immer größere Werte an (Abb. 2.22). Hierdurch ergeben sich jedoch auch Genauigkeitsprobleme aufgrund der ungünstigen Varianzfortplanzung. Für ci_H aus Gleichung 2.37 lässt sich die Standardabweichung σ_{ci_H} nach dem Varianz-Fortplanzungs-Gesetz (VFG) wie folgt angeben:

$$\sigma_{ci_H}^2 = f(c, i, \zeta, \sigma_r) = \sigma_r^2 \cdot \left[\left(\frac{\partial}{\partial c} ci_H \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial i} ci_H \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial \zeta} ci_H \right)^2 \right]$$
(2.71)

Die einzelnen Größen werden dabei als nicht miteinander korreliert angenommen. Zudem wird die Standardabweichung für c, i und ζ als gleich angesetzt und soll hier der Richtungsmessgenauigkeit σ_r des Tachymeters entsprechen. In Tabelle 2.3 sind die Ergebnisse für verschiedene Zenitwinkel zusammengestellt.

Tab. 2.3: Standardabweichung σ_{ci_H} von ci_H in gon (c = i = 0,001 gon, $\sigma_r = 0,0006$ gon)

η	0,000	0,001	0,010	0,100	1,000	10,000	20,000	100,000
$ci_H \ \sigma_{ci_H}$,	70,4833 18,7127	,	,	,	0,0127 0,0054	0,0063 0,0027	0,0010 0,0006

Für Vertikalrichtungen nahe dem Zenit bzw. dem Nadir nimmt σ_{ci_H} sehr große Werte an. Schon bei einem Zenitwinkel von 20 gon bzw. 180 gon verstärken sich die jeweiligen Einflüsse der Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung, sowie deren Standardabweichungen gegenüber einer horizontalen Zielung um den Faktor drei (Dzierzega und Scherrer 2003). Viele Instrumentenhersteller bringen daher Korrekturen an den Horizontalrichtungen nur bis zu einem gewissen Grenzwinkel um den Zenit bzw. Nadir an (Glaus und Ingensand 2002). Für Positionen innerhalb dieses Bereichs werden dann keine separaten Korrekturen mehr berechnet, sondern lediglich die entsprechenden Korrekturen der Grenzwinkel angebracht. Die Einflüsse der Zielachsenabweichung und Kippachsenneigung auf die Horizontalrichtungsmessung können in diesem Bereich durch Messungen in zwei Fernrohrlagen eliminiert werden (Kap. 2.5.1). Dies ist auch aus dem punktsymmetrischen Verlauf der Graphen in Abbildung 2.22 ersichtlich.

Darüber hinaus wirkt sich bei Zielungen nahe dem Zenit bzw. Nadir eine Anzielabweichung *a* besonders stark auf die Genauigkeit der Horizontalrichtungen aus. Zur Bestimmung einer Horizontalrichtung wird die Zielachse auf die Horizontalkreisebene projiziert. Bei einer steilen Zielung aber gleicher Zielweite verringert sich daher der projizierte (horizontale) Abstand zwischen Zielpunkt und Stehachse des Tachymeters im Gegensatz zu einer horizontalen Zielung (Abb. 2.23). Die Anzielabweichung bleibt gleich.

Der Einfluss einer Anzielabweichung auf die Horizontalrichtung a_H berechnet sich nach

$$a_H = f(\zeta) = \frac{a}{\sin \zeta \cdot s} \cdot \rho \tag{2.72}$$

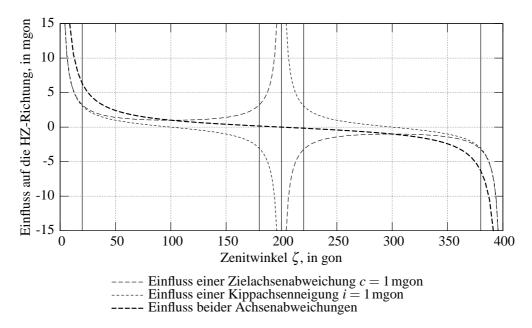


Abb. 2.22: Einfluss der Achsenabweichungen auf eine Horizontalrichtungsmessung, berechnet nach den Gleichungen 2.30, 2.33 und 2.37

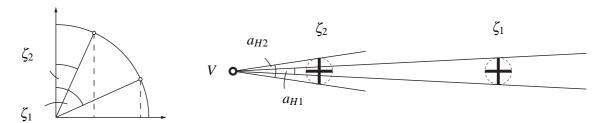


Abb. 2.23: Einfluss der Anzielabweichung auf die Horizontalrichtungsbestimmung

Er ist im Horizont am geringsten, gegen den Zenit und den Nadir wird er immer größer, in diesen Punkten selbst geht er gegen Unendlich. Bei einer Anzielabweichung von a=1 mm und einer Entfernung von s=100 m beträgt $a_H=0,6$ mgon bei einem Zenitwinkel von $\zeta=100$ gon, $a_H=2$ mgon bei $\zeta=20$ gon und $a_H=40$ mgon bei $\zeta=1$ gon.

Auf die Genauigkeit, mit welcher ein Punkt erfasst werden kann, hat dies jedoch keinen Einfluss. Bei einer steilen Zielung nimmt der Einfluss der Anzielabweichung auf eine Horizontalrichtungsmessung zu, und damit die Präzision, mit der eine Horizontalrichtung bestimmt werden kann, ab, jedoch nimmt die horizontale Entfernung des Zielpunktes von der Stehachse des Tachymeters ebenfalls ab. Da die Positionen der Punkte polar bestimmt werden, bleibt unabhängig von der Größe des Zenitwinkels die horizontale Abweichung rechtwinklig zur Zielrichtung gleich. Die Abweichung in Zielrichtung ist abhängig vom Einfluss der Anzielabweichung auf die Vertikalwinkelmessung. Diese ist jedoch nicht abhängig vom Zenitwinkel und berechnet sich nach der Bogenformel.

3 Entwicklung eines Hängetachymeters

Aufgrund seiner Bauart können mit einem Tachymeter keine Messungen in einem Zenitwinkelbereich zwischen ca. 170 bis 230 gon durchgeführt werden. Wie in Kapitel 1.1 dargestellt wurde, ist dies für verschiedene Anwendungsgebiete jedoch wünschenswert. Im folgenden Kapitel wird daher die Entwicklung eines sogenannten Hängetachymeters dargestellt. Der Ansatz besteht darin, ein Tachymeter mit Hilfe einer geeigneten Aufhängevorrichtung in hängender Position zu montieren. Da in dieser Position der interne Neigungskompensator des Tachymeters nicht funktionsfähig ist, wird das System mit einem externen Neigungssensor kombiniert.

Im strengen Sinne müsste bei einem sich in hängender Position befindlichen Tachymeter der Vertikalwinkel als Nadirwinkel bezeichnet werden. Da jedoch nahezu alle Programme zur weiteren Verarbeitung der tachymetrischen Daten einen am Zenit ausgerichteten Vertikalwinkel erfordern, wird weiterhin der Begriff Zenitwinkel verwendet. Dieser bezeichnet im Folgenden unabhängig von der Position des Tachymeters einen am Zenit ausgerichteten Vertikalwinkel.

Die Konstruktion der Aufhängevorrichtung wird in Kapitel 3.1 beschrieben und allgemeine Anforderungen an die eingesetzten Sensoren definiert. Die verwendeten Sensoren werden näher vorgestellt sowie Alternativen hierzu diskutiert.

Die mit dem Tachymeter ermittelten Messwerte werden auch in hängender Position durch Instrumentenabweichungen beeinflusst. Es kann nicht generell vorausgesetzt werden, dass diese mit denen in aufrechter Position bestimmten Werten übereinstimmen. Die Messwerte können daher nicht durch die internen Korrekturalgorithmen des Tachymeters korrigiert werden. Die Messwerte sind auch um die mit dem Neigungssensor ermittelte Stehachsenneigung zu korrigieren. In Kapitel 3.2 werden die am Hängetachymeter verwendeten Koordinatensysteme beschrieben, die einzelnen Mess- und Kalibrierwerte erläutert, sowie der gesamte Korrekturalgorithmus dargestellt.

Kapitel 3.3 beschreibt die Kalibrierung des Hängetachymeters. Um einen Neigungssensor als Kompensator zu verwenden, muss die Richtung seiner Neigungsachsen bestimmt werden. Die Übertragung der Richtung der Neigungsachsen in das System des Tachymeters erfolgt mit Hilfe eines Richtungslasers bzw. mit einem Diopter. Die Instrumentenabweichungen des Tachymeters müssen in hängender Position bestimmt werden. Aufgrund von Fertigungstoleranzen der Aufhängevorrichtung sind die Stehachsen des Tachymeters und des Neigungssensors nicht parallel. Neigungsrichtung und -betrag müssen bestimmt und als Korrektur an die Neigungswerte angebracht werden. Zur Bestimmung werden drei Verfahren entwickelt und auf ihre Genauigkeit untersucht.

Die gesamte Steuerung des Hängetachymeters, die Auswertung und Korrektur der Messwerte, deren Speicherung und Weiterverarbeitung sowie der Datenexport, wird auf einem externen Rechner durchgeführt. Hierzu wurde eine spezielle Software entwickelt, welche in Kapitel 3.4 beschrieben wird.

3.1 Konstruktion

Ein Hängetachymeter besteht aus drei wesentlichen Teilen,

- einem Tachymeter,
- einem Neigungssensor und
- einer Aufhängevorrichtung zur Verbindung der einzelnen Komponenten.

3.1.1 Sensoren

Um ein Tachymeter als Hängetachymeter einsetzen zu können, müssen von diesem gewisse Voraussetzungen erfüllt werden. Generell dürfen sich durch die hängende Montage, mit Ausnahme des Stehachsenkompensators, keine Beeinträchtigungen seiner Funktionalität ergeben. Das Tachymeter darf sich nicht unkontrolliert um seine Achsen bewegen. Auch darf die Richtungs- und Streckenmessgenauigkeit nicht beeinträchtigt werden. Zur Auswertung der Messungen auf einem externen Rechner muss das Tachymeter über eine Schnittstelle verfügen, welche in eigene Programme eingebunden werden kann. Zur Automatisierung der Arbeitsabläufe sollte das Tachymeter zusätzlich eine Motorisierung sowie eine automatische Zielerfassung besitzen. Die Verwendung eines Tachymeters mit integrierter Kamera bzw. die Kombination des Tachymeters mit einer Kamera bietet vielzählige Möglichkeiten. Dieser Aspekt wird daher im Folgenden in einem eigenen Kapitel behandelt.

Im Rahmen dieser Arbeit kamen Tachymeter der Firma Leica Geosystems zum Einsatz. Im Einzelnen wurden die Instrumente TCRM 1102 und TCA 2003 verwendet (Leica Geosystems 2003b;a). Deren technische Daten sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Beide Instrumente können über die GeoCOM Schnittstelle angesteuert werden. Die Kommunikation mit dem Rechner erfolgt dabei über eine serielle Verbindung (RS232). Diese Verbindung kann auch zur Stromversorgung verwendet werden. Hierzu werden spezielle Verbindungskabel benötigt.

Das Tachymeter TCA 2003 ist mit einer automatischen Zielerfassung (ATR) ausgestattet (u.a. Deumlich und Staiger 2002). Wird ein Zielpunkt im Gesichtsfeld detektiert, bestimmt das Tachymeter die Ablagen der Ziellinie zu diesem in Richtung des Horizontal- und Vertikalstrichs. Anschließend führt

3.1 Konstruktion 65

TCRM 1102 TCA 2003 Winkelmessung, Genauigkeit HZ, V (ISO 17123-2) $0.6\,\mathrm{mgon}$ 0,15 mgon Distanzmessung (infrarot), Genauigkeit $2 \, \text{mm} + 2 \, \text{ppm}$ 1 mm + 1 ppmKompensator, Einspielbereich 0,07 gon 0,07 gon Kompensator, Einspielgenauigkeit $0.2 \, \mathrm{mgon}$ 0,1 mgon Gewicht $4.9 \,\mathrm{kg}$ 7,5 kgMotorisiert ja ja

nein

ja

Automatische Zielerfassung (ATR)

Tab. 3.1: Technische Daten der verwendeten Tachymeter

das Tachymeter das Fernrohr nach. Bei dem eingesetzten Tachymeter TCA 2003 erfolgt eine präzise Ausrichtung der Zielachse auf den Zielpunkt. Die Nachführung um den Horizontal- bzw. Vertikalkreis bestimmt sich aus den ermittelten Ablagen und ist abhängig vom Zenitwinkel. Sie kann nach den Gleichungen (2.30), (2.31) und (2.44) zur Bestimmung des Einflusses einer Zielachsen- bzw. Höhenindexabweichung auf eine Horizontalrichtungs- bzw. Vertikalwinkelmessung berechnet werden. Wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, werden zu dieser Berechnung in Tachymetern meist Näherungsgleichungen herangezogen, bzw. die Berechnungen nur bis zu einem bestimmten Grenzwinkel durchgeführt (u.a. Dzierzega und Scherrer 2003). Besonders für Zenitwinkel nahe 0 gon bzw. 200 gon liefern die Algorithmen daher keine korrekten Ergebnisse. Mit dem untersuchten TCA 2003 ist die automatische Zielerfassung eines Zielpunktes nahe dem Zenit nicht möglich. Das Tachymeter bricht den Vorgang nach mehreren erfolglosen Positionierungsversuchen ab, da mit den verwendeten Algorithmen die Drehwinkel zur präzisen Ausrichtung der Zielachse nicht mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Die Stabilität der Tachymeterachsen in hängender Position ist von entscheidender Bedeutung für die Verwendung des Tachymeters als Hängetachymeter. Die Abbildungen 3.1 zeigen die Stehachse eines Tachymeters der Serie 1600 der Firma Leica Geosystems, welche vom Prinzip identisch mit den Achsen der Nachfolgemodelle ist. Das Achssystem wird im zusammengesetzten Zustand (Abb. 3.1a) von einem Vorschubring (Abb. 3.1b) zusammengehalten. In hängender Position stützt sich das Achssystem auf diesem Ring und der Auflagefläche der Achse (Abb. 3.1b) ab. Die Abbildungen 3.1c und 3.1d zeigen die zwei speziellen Kugellagerbuchsen mit mehreren Ebenen. Diese Kugellager sind so ausgelegt, dass die Kugeln leicht gequetscht werden und somit ein völlig spielfreies System entsteht. Des Weiteren ist das Stützlager (flache Scheibe mit Kugeln) zu erkennen, auf welchem die Achse in aufrechter Position aufliegt. Die Auflageflächen sind geschliffen, gehärtet und absolut eben und rechtwinklig. (Ingensand 2009)

Die Lagerung der Kippachse der eingesetzten Tachymeter wird in einem folgenden Kapitel beschrieben. Zudem werden die Achsenabweichungen in hängender Position untersucht.



(a) Zusammengesetzter Zustand



(b) Vorschubring



(c) Kugellagerbuchsen



(d) Stützlager

Abb. 3.1: Lagerung der Stehachse

Als Alternativen von der Firma Leica Geosystems können alle Leica Tachymeter mit GeoCOM Schnittstelle eingesetzt werden. Des Weiteren bieten sich als Alternativen von anderen Herstellern die Trimble VX Spatial Station und die Topcon IS Imaging Total Station an. Beide Stationen verfügen über eine Schnittstelle zur Kommunikation mit einem Rechner, Motorisierung, automatische Zielerfassung und eine integrierte Digitalkamera. Stabilitätsuntersuchungen sind für alle Instrumente zwingend notwendig.

Um die Stehachsenneigung des Tachymeters trotz deaktiviertem Kompensators zu überwachen, wird das Tachymeter mit einem externen zweiachsigen Neigungssensor kombiniert. Wichtige Voraussetzungen an den eingesetzten Neigungssensor sind seine Genauigkeit, Stabilität, Linearität und seine Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Temperaturschwankungen. Um die Neigungsdaten an einem Rechner verarbeiten zu können, muss der Neigungssensor über eine Schnittstelle ansteuerbar sein. Im Hinblick auf einen Einsatz des Hängetachymeters im Feld sollte der Neigungssensor auch über eine Batterie betrieben werden können. Eine möglichst leichte und kompakte Bauweise ist von Vorteil.

3.1 Konstruktion 67

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Nivel20 Neigungssensor der Firma Leica Geosystems verwendet (Leica Geosystems 2000). Er ermöglicht das gleichzeitige präzise Messen von Neigung und Neigungsrichtung (zweiachsiger Neigungssensor). Er arbeitet wie die internen Kompensatoren der Leica Tachymeter nach dem Prinzip des Flüssigkeitshorizonts.

Das neigungsempfindliche Element besteht aus Silikonöl in einem geschlossenen Behälter (Abb. 3.2). Die Oberfläche des Silikonöls richtet sich immer unabhängig von der Sensorneigung horizontal aus. Der Winkel zwischen dem Boden des Behälters und der Flüssigkeitsoberfläche entspricht somit der Neigung. Im Flüssigkeitssystem befinden sich, ebenfalls fest verbunden mit dem Behälter, eine Leuchtdiode, ein Linsensystem und ein positionsempfindlicher Photodetektor. Der von der Leuchtdiode ausgesendete Lichtstrahl wird über das Linsensystem durch das Silikonöl hindurch auf den Photodetektor abgebildet. Dabei liegt die infolge von Totalreflexion als Spiegel wirkende Flüssigkeitsoberfläche ebenfalls im Strahlengang. Wird nun das Instrument geneigt, erreicht ein von der Diode ausgesendeter Lichtstrahl den Photodetektor an einer anderen Position. Aus der Position des Auftreffpunktes kann der Neigungswinkel bestimmt werden.

Der Neigungssensor Nivel20 verfügt über eine digitale (serielle) Datenschnittstelle. Die Stromversorgung erfolgt über ein externes Netzgerät oder eine externe Batterie. Am Sensor befinden sich keine Bedienelemente, so dass zur Steuerung und für die Anzeige der Messwerte ein Rechner benötigt wird.

Die für den Nivel20 angegebenen Systemgenauigkeiten können Tabelle 3.2 entnommen werden. Für den Stehachskompensator eines Tachymeters des Typs TCA 2003 wird als Vergleich eine Einspielgenauigkeit von 0,1 mgon bei einem Messbereich von 0,07 gon angegeben (Tab. 3.1). Zur zuverlässigen Bestimmung der Stehachsschiefe ist die Systemgenauigkeit des Nivel20 daher ausreichend. Da jedoch der Messbereich mit ca. 0,1 gon relativ gering ist, mussder Neigungssensor so

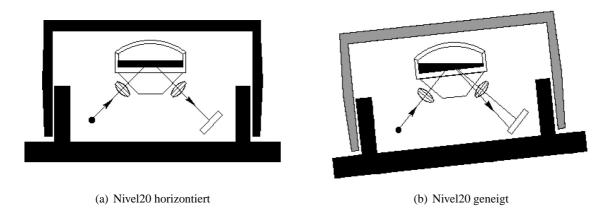


Abb. 3.2: Der verwendete Neigungssensor Nivel20 von Leica arbeitet nach dem Prinzip des Flüssigkeitshorizonts (Leica Geosystems 2000)

Messbereich Auflösung	1,5 0,001	mrad mrad	<u>^</u>	0,095 0,06	gon mgon
Nullpunktstabilität	0,005	mrad/°C	â	0,3	mgon/∘C
Einspielfehler	< 0,002	mrad	â	< 0,1	mgon
Linearitätsfehler	0,005	mrad	â	0,3	mgon

Tab. 3.2: Nivel20 - Vom Hersteller angegebene Systemgenauigkeiten

mit dem Tachymeter verbunden werden, dass die Stehachse des Neigungssensors und die des Tachymeters nahezu parallel verlaufen, sonst lässt sich der Messbereich des Neigungssensors nicht voll ausschöpfen. Zur Grobhorizontierung dient eine auf der Gehäuseoberseite angebrachte Dosenlibelle.

Ein Temperaturfühler registriert zusätzlich die Temperatur des Sensors. Temperaturschwankungen können so registriert werden. Im Betrieb erhöht sich die Temperatur des Sensors gegenüber der Umgebungstemperatur. Der Aufwärmvorgang ist vor Beginn der Messung unbedingt abzuwarten und kann bis zu vier Stunden betragen (Leica Geosystems 2004).

Generell kann bei allen Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf Neigungssensoren festgestellt werden, dass sich die Anzeige y bei konstanter Neigung als Funktion der Temperatur T ändert (y=f(T)). Die Temperaturabhängigkeit elektronischer Neigungssensoren begründet sich in einer mechanisch-geometrischen Veränderung des Lotsensors und in einer Veränderung des elektrischen Verhaltens der Umformer- und Verstärkerbauelemente. Vor und während der Messung sollte daher möglichst eine konstante Temperatur herrschen. Vor allem einseitige Temperaturänderungen sind zu vermeiden, da es hier durch einen Temperaturgradienten innerhalb des Gebersystems zu einer unsymmetrischen Materialausdehnung kommt. Zur Verminderung des Temperatureinflusses wird bei Neigungsmesssystemen eine Thermostatisierung des Instruments oder eine mechanische, elektronische oder rechnerische Kompensation angewandt. (Ingensand 1985)

Um den Temperatureinfluss des eingesetzten Neigungssensors zu untersuchen, wurden zwei Messreihen über einen Zeitraum von jeweils mehreren Tagen durchgeführt (Knoblach und Möser 2007). Die erste Messreihe diente als Referenzmessung unter stabilen äußeren Bedingungen. Die Aufstellung erfolgte daher im Keller des geodätischen Messlabors auf einem Messtisch aus massivem Beton. Der Neigungssensor selbst befand sich auf einer schweren Metallplatte, deren Neigung durch Fußschrauben verändert werden konnte. Aufgrund des Alters des Gebäudes ist mit Setzungen nicht zu rechnen. Zudem herrschen in den Räumen unabhängig von der Außentemperatur konstante atmosphärische Bedingungen. Während der Messung wurde die Neigung des Sensors schrittweise in drei Stufen verändert.

Bei der zweiten Messreihe wurde auf dem Messtisch um den Neigungssensor ein Klimaschrank errichtet. Zum Schutz gegen Strahlungswärme wurde der Neigungssensor einschließlich Metallplatte zusätzlich mit einem Styropormantel umgeben. Der Zeitraum der Messungen betrug zwei Wochen.

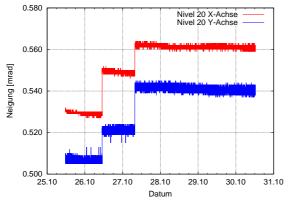
3.1 Konstruktion 69

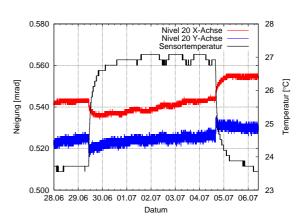
Während dieser Zeit wurde die Neigung des Sensors nicht verändert. In der ersten Woche befand sich das System in einem stabilen Zustand, d.h. über den Klimaschrank wurde keine Wärme zugeführt. Im Anschluss wurde die Temperatur um ca. 5°C erhöht und dieser Zustand über 60 Stunden beibehalten. Nach einer Abkühlung des Systems auf die ursprüngliche Temperatur wurden die Messungen noch weitere drei Tage fortgesetzt.

Die Ergebnisse der ersten Messreihe sind in Abbildung 3.3a dargestellt. Der Nivel20 Neigungssensor liefert zuverlässige Ergebnisse im Rahmen der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit. Die am Messtisch durchgeführten Neigungsänderungen wurden vom System sicher wiedergegeben. Eine Drift über den Messzeitraum ist nicht erkennbar.

Die Auswertung der zweiten Messreihe zeigt hingegen kein stabiles Verhalten (Abb. 3.3b). Die durchgeführten Temperaturänderungen besitzen einen deutlichen Einfluss auf die vom Sensor angezeigten Werte. Eine Drift über den Messzeitraum ist zu erkennen. Die Neigungswerte erreichen zudem nach dem Abklingen des Temperaturanstiegs nicht mehr ihr Ausgangsniveau. Als Konsequenz ist bei Verwendung des Nivel20 Neigungssensors die Temperatur zu überwachen und bei registrierter Änderung eine Neukalibrierung des Systems durchzuführen.

Als Alternativen zum Nivel20 werden eine Vielzahl unterschiedlicher Neigungssensoren angeboten. Schobert (1998) stellte die Produktinformationen von über 500 verschiedenen Neigungssensoren zusammen. Einen Überblick über die Bauformen von Lotsensoren, ihre verschiedenen Umformungsverfahren und ihre Verwendung an einigen praktischen Beispielen finden sich u.a. bei Ingensand (1985) und Deumlich und Staiger (2002).





(a) Messreihe 1 - konstante Temperatur und Luftfeuchte

(b) Messreihe 2 - Temperaturänderung bei stabilem Untergrund

Abb. 3.3: Neigungsmessung mit Nivel20 im Messlabor

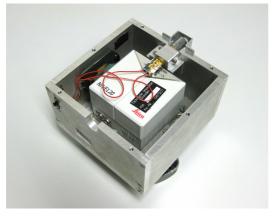
3.1.2 Aufhängevorrichtung

Um die Stehachsenneigung des Tachymeters zu erfassen, muss der Neigungssensor stabil mit diesem verbunden sein. Hierzu wurde eine Aufhängevorrichtung konstruiert (Abb. 3.4 und 3.5). Sie besteht aus einem Gehäuse zur Aufnahme des Nivel20 sowie zwei Verbindungselementen an dessen Oberund Unterseite.

Das Gehäuse besitzt die Maße 140 x 140 x 90 mm. Als Material wurden Aluminiumplatten mit einer Stärke von 10 mm verwendet. Die einzelnen Platten wurden durch Schrauben miteinander verbunden. In der hinteren Seitenplatte befindet sich eine Öffnung zur Stromversorgung und Datenverbindung. Eine Grobhorizontierung des Systems ist mit einer auf der Deckenplatte angebrachten Dosenlibelle möglich.

Um am Tachymeter die Horizontalrichtungen der Instrumentenachsen des Neigungssensors bestimmen zu können, wurde an der vorderen Seitenplatte ein Richtungslaser befestigt (Abb. 3.4). Dieser ist parallel zur Y-Achse des Neigungssensors ausgerichtet. Seine Richtung kann mit einer Stellschraube justiert werden. Der Laser wird über Batterien betrieben und ein Schalter an der Rückseite des Gehäuses steuert seinen Betrieb. Zur Richtungsübertragung wird mit dem Laser ein entfernter Punkt signalisiert, auf welchen sich anschließend der Vertikalstrich des Tachymeters ausrichten lässt. Die Wellenlänge des Richtungslasers beträgt ca. 532 nm (grün), da die Optik der Leica Tachymeter zum Schutz vor Reflexion des Visurlasers mit einem Filter im Bereich um 670 nm (rot) ausgestattet ist. Grünes Licht wird zudem vom menschlichen Auge intensiver wahrgenommen. Zur Richtungsübertragung unter sehr hellen Lichtverhältnissen ist an der Gehäuseunterseite zusätzlich ein Diopter angebracht.

An der Oberseite des Gehäuses wurde ein modifizierter Zeiss Dreifuß angeschraubt (Abb. 3.5a). Eine Befestigung des Hängetachymeters an einer Konsole oder einem Stativ ist mittels des 5/8 Zoll







(b) Seitenansicht mit Diopter

Abb. 3.4: Die Aufhängevorrichtung des Hängetachymeters

3.1 Konstruktion 71

Gewindes der Dreifußgrundplatte möglich. Die Federplatte des Dreifußes wurde durch Schrauben festgestellt, um ein Federn der Aufhängung zu verhindern. Zum Horizontieren des Hängetachymeters dienen die Dreifußschrauben.

Zur Verbindung mit dem Tachymeter wurde ein Dreifußkörper ohne Grundplatte und Fußschrauben an der Bodenplatte des Gehäuses mittels Schrauben und dreier Abstandshalter befestigt (Abb. 3.5b). Der Dreifußkörper kann je nach Befestigungssystem des verwendeten Tachymeters adaptiert werden. Um eine annähernde Parallelität zwischen der Grundplatte des Neigungssensors und der Auflagefläche des Dreifußkörpers zu erreichen, müssen die Abstandshalter mit einer Toleranz von nur einigen hundertstel Millimetern die gleiche Länge besitzen. Eine größere Abweichung würde im späteren Betrieb dazu führen, dass sich der Neigungssensor bei lotrechter Stehachse des Tachymeters am Rande oder außerhalb seines Arbeitsbereiches befindet.

Die Stabilität der Verbindung zwischen dem Neigungssensor und dem Tachymeter wurde durch folgenden Versuchsaufbau nachgewiesen: Um eine Neigungsänderung des Tachymeters unabhängig vom Neigungssensor zu bestimmen, wurde ein Zenitlot verwendet, welches unterhalb des Neigungssensors platziert wurde. Die Zielebene des Zenitlotes bildet eine Referenzebene, auf welche die Ziellinie des Tachymeters durch Kollimation ausgerichtet werden kann. Der Vertikalwinkel des Tachymeters gibt die relative Neigung der Tachymeterstehachse in Richtung der Vertikalkreisebene an. Die Neigung des Hängetachymeters wurde durch Drehen der Dreifußschrauben schrittweise verändert und die Ziellinien des Zenitlotes und des Tachymeters anschließend in Richtung der Vertikalkreisebene kollimiert. Im Rahmen der Genauigkeiten der einzelnen Komponenten werden die Neigungsänderungen des Tachymeters durch den Neigungssensor sicher wiedergegeben. Eine Instabilität der Verbindung zwischen Neigungssensor und Tachymeter ist nicht zu erkennen.



(a) Oberseite zur Verbindung mit einer Konsole oder einem Stativ



(b) Unterseite zur Verbindung mit einem Tachymeter

Abb. 3.5: Verbindungselemente des Gehäuses an Ober- und Unterseite

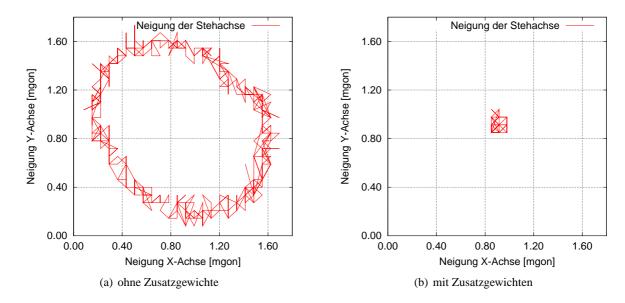


Abb. 3.6: Nachweis der Unwucht des Tachymeters

Die Aufhängevorrichtung einschließlich des Nivel20 hat ein Gewicht von 3,2 kg. Alle Elemente wurden so montiert, dass der Schwerpunkt des Gesamtsystems mit den Vertikalachsen beider Dreifüße auf einer Linie liegt, d.h. die Aufhängevorrichtung besitzt keine Unwucht. Wird die Aufhängevorrichtung zwangfrei am Aufhängepunkt befestigt, läuft die Lotlinie durch diesen ebenfalls durch den Mittelpunkt des unteren Dreifußkörpers.

Es wurde jedoch festgestellt, dass die eingesetzten Tachymeter (mit Batterie) eine leichte Unwucht aufweisen, d.h. der Schwerpunkt des Tachymeters befindet sich außerhalb seiner Stehachse. Zum Nachweis der Unwucht wurde der Hängetachymeter zwangsfrei an einer Konsole befestigt. Abbildung 3.6a zeigt die am Neigungssensor registrierten Neigungswerte, wenn das Tachymeter um seine Stehachse gedreht wird. Um den Schwerpunkt des Tachymeters in dessen Stehachse zu verschieben, wurden am Gehäuse externe Zusatzgewichte angebracht. Hiernach zeigen sich am Neigungssensor keine Änderungen bei einer Drehung des Tachymeters um seine Stehachse (Abb. 3.6b). Eine Drehung des Zielfernrohres um die Kippachse zeigt keine Auswirkung auf die Werte des Neigungssensors.

3.2 Mathematische Korrektur der Messwerte

Neben der Korrektur aufgrund einer Stehachsenneigung müssen Korrekturen an die mit dem Tachymeter bestimmten Horizontal- und Vertikalwinkel wegen Abweichungen von der Idealgeometrie der Tachymeterachsen angebracht werden. Dazu gehören die Zielachsenabweichung, die Höhenindexabweichung und der Einfluss der Kippachsenneigung.

Zuvor müssen die am Tachymeter ausgelesenen Messwerte jedoch noch in das System eines aufrecht stehenden Tachymeters transformiert werden, um die in Kapitel 2.5 dargestellten Algorithmen zu verwenden. Zudem hat dies den Vorteil, dass die Daten nach der Korrektur mit geodätischen Programmen weiter verarbeitet werden können.

3.2.1 Koordinatensysteme

Beim Hängetachymeter sind insgesamt drei verschiedene rechtwinklige Koordinatensysteme von Bedeutung (Abb. 3.7):

- Das Koordinatensystem des Neigungssensors (X_N, Y_N, Z_N) ,
- das Koordinatensystem des Tachymeters (X_T, Y_T, Z_T) sowie
- das sich an der Lotlinie orientierende übergeordnete Koordinatensystem (X, Y, Z).

Bei allen diesen Koordinatensystemen handelt es sich um linkshändige Systeme, deren gegenseitige Lage und Orientierung zueinander bekannt ist, bzw. diese durch Kalibrierung bestimmt werden kann. Die einzelnen Systeme lassen sich somit durch Transformation ineinander überführen.

Das Koordinatensystem des Neigungssensors wird durch die beiden zueinander rechtwinkligen Instrumentenachsen X_N und Y_N festgelegt. Die Z_N -Achse steht senkrecht zu diesen beiden Achsen. Die Z_N -Achse wird nachfolgend auch als Stehachse des Neigungssensors bezeichnet.

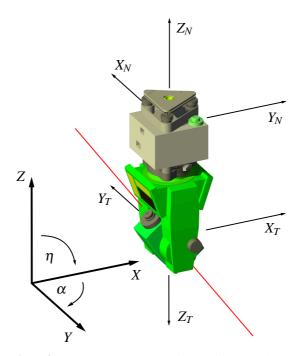


Abb. 3.7: Hängetachymeter mit Koordinatenachsen

Die Z_T -Achse des Koordinatensystems des Tachymeters wird durch dessen Stehachse definiert. Die X_T -Achse steht senkrecht auf der Z_T -Achse. Die Y_T -Achse steht senkrecht zur X_T - und zur Z_T -Achse. X_T -, Y_T - und Z_T -Achse schneiden sich im Ursprung des Koordinatensystems, welcher im Schnittpunkt aus Steh-, Kipp- und Zielachse des Tachymeters liegt. Die X_T -Achse definiert die Nullrichtung des Horizontalkreises. Die Horizontalrichtung des Tachymeters wird von der X_T -Achse aus positiv in Richtung der Y_T -Achse gezählt.

Die Z-Achse des übergeordneten Koordinatensystems orientiert sich an der lokalen Lotlinie. X-, Y-, und Z-Achse stehen paarweise senkrecht aufeinander und schneiden sich im Ursprung des Koordinatensystems. Das Koordinatensystem des Tachymeters und das übergeordnete Koordinatensystem besitzen denselben Ursprung. Die X-Achse definiert die Nullrichtung der Horizontalrichtung α . Diese wird von der X-Achse aus positiv in Richtung der Y-Achse gezählt. Die Z-Achse definiert die Nullrichtung der Vertikalrichtung η des übergeordneten Systems.

3.2.2 Mess- und Kalibrierwerte

Im Folgenden werden alle Mess- und Kalibrierwerte näher erläutert, die zur Richtungsbestimmung mit einem Hängetachymeter im übergeordneten Koordinatensystem von Bedeutung sind.

Die am Tachymeter in hängender Position abgelesenen Werte des Horizontal- bzw. Vertikalkreises werden mit α_T bzw. η_T bezeichnet. Hierbei definiert die X_T -Achse die Nullrichtung des Horizontal-kreises und die Z_T -Achse die Nullrichtung des Vertikalkreises (Abb. 3.8). Die an den beiden Teil-kreisen abgelesenen Werte sind noch nicht um die Einflüsse durch Zielachsenabweichung, Kippachsenneigung und Höhenindexabweichung korrigiert.

Die Neigung bzw. die Neigungsänderung des Gesamtsystems kann am Neigungssensor abgelesen werden (s. Kap. 3.1). Hierbei bezeichnet der Winkel ω_N eine Drehung des Systems um die X_N -Achse, d.h. in Richtung der Y_N -Achse. Der Winkel φ_N bezeichnet eine Drehung um die Y_N -Achse, d.h. in Richtung der X_N -Achse (Abb. 3.9). Die Nullpunkte der beiden Drehwinkel ω_N und φ_N beziehen

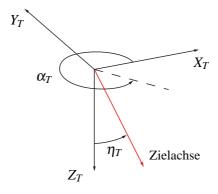


Abb. 3.8: Die Werte α_T und η_T werden an den Teilkreisen abgelesen

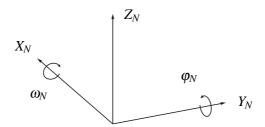


Abb. 3.9: Die Drehwinkel ω_N und φ_N des Neigungssensors

sich auf die horizontal ausgerichtete Grundplatte des Neigungssensors und werden in der Regel bei einer Herstellerkalibrierung festgelegt. Für den Einsatz im Hängetachymeter sind sie jedoch ohne Relevanz, da dieser nach Einbau des Neigungssensors nochmals als Gesamtsystem kalibriert werden muss.

Aufgrund von Fertigungstoleranzen kann die Stehachse des Tachymeters nicht streng lotrecht zur Bodenplatte des Neigungssensors angebracht werden. Die Achsen des Tachymeters (X_T, Y_T, Z_T) und die Achsen des Neigungssensors (X_N, Y_N, Z_N) sind daher nicht parallel. Dies macht eine anschließende Kalibrierung des Gesamtsystems notwendig, welche im Kapitel 3.3 beschrieben wird. Die Winkel zwischen den Instrumentenachsen werden im Folgenden Offset des Neigungssensors genannt. Hierbei bezeichnet ω_{OS} das Offset des Winkels ω_N und φ_{OS} das Offset des Winkels φ_N (Abb. 3.10). ω_{OS} und φ_{OS} stellen also die Werte für ω_N und φ_N dar, bei denen die Stehachse des Tachymeters streng lotrecht steht. Nachdem diese Werte bestimmt wurden, werden sie als Korrektur an den Rotationsparametern des Neigungssensors angebracht.

Um den Neigungssensor als Kompensator zu verwenden, müssen die vom Neigungssensor registrierten Rotationsparameter ω_N und φ_N vom System des Neigungssensors (X_N, Y_N, Z_N) in das System des Tachymeters (X_T, Y_T, Z_T) transformiert werden. Hierzu wird jedoch auch die Rotation der beiden Systeme um die Z_N - bzw. Z_T -Achse benötigt. Der horizontale Winkel zwischen positiver Y_N -Achse und positiver X_T -Achse (Nullrichtung des Horizontalkreises) wird als Offset κ_{OS} bezeichnet (Abb. 3.11).

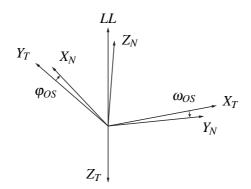


Abb. 3.10: Offset des Neigungssensors

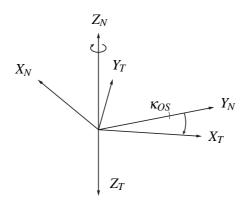


Abb. 3.11: Offset κ_{OS} zwischen Y_N -Achse und X_T -Achse

Der Winkel κ_{OS} wird mit Hilfe eines Richtungslasers bzw. eines Diopters bestimmt (Kap. 3.1.2). Mittels dieser an der Aufhängevorrichtung befestigten und parallel zur Y_N -Achse ausgerichteten Richtungsgeber lässt sich ein entfernter Punkt bestimmen, welcher anschließend mit dem Vertikalstrich des Tachymeters angezielt werden kann (Abb. 3.12). Der Winkel (400 gon $-\kappa_{OS}$) kann nun am Horizontalkreis des Tachymeters abgelesen werden.

Der Richtungslaser ermöglicht die Bestimmung von κ_{OS} mit einer geschätzten Genauigkeit von besser als 0,1 gon. Mit dem Diopter lässt sich κ_{OS} mit einer geschätzten Genauigkeit von 0,2 gon bestimmen. Dies bewirkt an den Grenzen des Messbereichs des Neigungssensors (± 95 mgon) eine Abweichung der Drehwinkel ω_N und φ_N nach der Transformation in das System des Tachymeters von maximal 0,3 mgon. Im normalen Arbeitsbereich von ± 20 mgon um den Nullpunkt beträgt die Abweichung maximal 0,06 mgon.

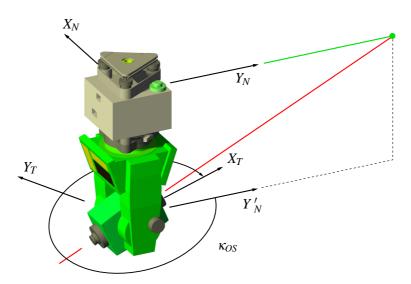


Abb. 3.12: Bestimmung von κ_{OS} mit Hilfe des Richtungslasers

3.2.3 Korrekturalgorithmus

Die am Horizontal- und Vertikalkreis abgegriffenen Winkel α_T und η_T beziehen sich auf das System des in hängender Position befestigten Tachymeters (X_T,Y_T,Z_T) , dessen Stehachse Z_T im Allgemeinen nicht parallel zur lokalen Lotlinie ist. Die Messwerte sind zudem durch die Achsenabweichungen des Tachymeters beeinflusst. Die Tachymeter von Leica verwenden einen Algorithmus, um bei Kenntnis der Achsenabweichungen die Messwerte um deren Einfluss zu korrigieren. Die Korrekturwerte werden jedoch nur bis zu Grenzwinkeln des Zenitwinkels berechnet. Diese Grenzwinkel bilden je einen Sektor von $\pm 20\,\mathrm{gon}$ um den Zenit und den Nadir. Für Fernrohrpositionen mit einem Zenitwinkel innerhalb dieser Sektoren, werden keine effektiven Korrekturen mehr berechnet, sondern nur noch die entsprechenden Korrekturen für die Grenzwinkel angebracht (Dzierzega und Scherrer 2003). Die Korrekturen werden daher nach den in Kapitel 2.5.1 angegebenen Gleichungen auf einem externen Rechner durchgeführt. Um die ursprünglichen Messwerte zu erhalten, sind die Achsenabweichungen am Tachymeter auf Null zu setzen oder die Korrektur zu deaktivieren. Zur weiteren Verarbeitung der Messwerte müssen diese um die Achsenabweichungen korrigiert und in das an der lokalen Lotlinie orientierte übergeordnete System (X,Y,Z) transformiert werden.

Hierzu werden die Richtungen α_T und η_T zuerst in das System eines Tachymeters in aufrechter Position (X'_T, Y'_T, Z'_T) überführt (Abb. 3.13):

$$\alpha_T' = -\alpha_T \tag{3.1}$$

$$\eta_T' = -\eta_T + 200 \,\mathrm{gon}$$
 (3.2)

Der Einfluss der Zielachsenabweichung c und Kippachsenneigung i auf die Horizontalrichtung berechnet sich nach Gleichung 2.37. Die Höhenindexabweichung h kann direkt an η'_T angebracht werden.

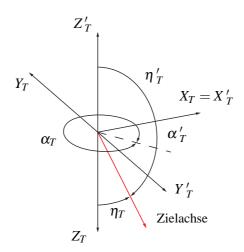


Abb. 3.13: Die Richtungen α_T und η_T werden in das System eines Tachymeters in aufrechter Position überführt

$$\tan ci_H = \frac{\cos i \cdot \tan c}{\sin (\eta'_T + h)} + \frac{\sin i}{\tan (\eta'_T + h)}$$
(3.3)

Die um die Achsenabweichungen korrigierten Beobachtungen werden analog zu Kapitel 2.5.1 mit λ und ϑ für die Kugelkoordinaten des Zielpunktes P bezeichnet. Die korrigierte Horizontalrichtung λ'_T berechnet sich nach:

$$\lambda_T' = \alpha_T' + ci_H \tag{3.4}$$

Für den korrigierten Vertikalwinkel ϑ_T' folgt nach Gleichung 2.38:

$$\cos \vartheta_T' = \cos c \cdot \cos i \cdot \cos \left(\eta_T' + h \right) - \sin c \cdot \sin i \tag{3.5}$$

Anschließend erfolgt die Transformation von λ_T' und ϑ_T' in das übergeordnete System (X,Y,Z). Hierzu muss die Neigung der Tachymeterstehachse in Richtung der Ziel- und Kippachse (u_{VV},u_{HH}) bestimmt werden. In Kapitel 2.5.3 werden hierfür mehrere Möglichkeiten angegeben. Erfolgt die Berechnung durch eine ebene Transformation, ergeben sich die Gleichungen zu (Abb. 2.19):

$$u_{VV} = \cos \kappa_N \cdot (\varphi_N - \varphi_{OS}) + \sin \kappa_N \cdot (\omega_N - \omega_{OS})$$
(3.6)

$$u_{HH} = -\sin \kappa_N \cdot (\varphi_N - \varphi_{OS}) + \cos \kappa_N \cdot (\omega_N - \omega_{OS})$$
(3.7)

Der Rotationsparameter κ_N bezeichnet hier den im Uhrzeigersinn gezählten horizontalen Winkel zwischen positiver X_N -Achse und Zielrichtung.

$$\kappa_N = \alpha_T' + \kappa_{OS} + 100 \,\text{gon} \tag{3.8}$$

Zur Berechnung von κ_N darf λ_T' nicht verwendet werden, da $ci_H = f(\eta_T')$ ist und dies bei Zielungen nahe dem Zenit bzw. Nadir zu Beträgen von bis zu 100 gon führen kann. Die Stehachsenneigung in Richtung der Ziel- bzw. Kippachse ist hingegen keine Funktion des Vertikalwinkels.

Der Einfluss der Stehachsenneigung auf die Horizontalrichtung u_H berechnet sich nach Gleichung 2.55 wie folgt:

$$\tan u_H = \frac{-\sin u_{HH} \cdot \cos \vartheta_T'}{\cos u_{VV} \cdot \sin \vartheta_T' + \sin u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \vartheta_T'}$$
(3.9)

Daraus ergibt sich die um die Achsenabweichungen korrigierte Horizontalrichtung im übergeordneten System zu:

$$\alpha = \lambda = \lambda_T' + u_H \tag{3.10}$$

Und der entsprechende Zenitwinkel zu (Gl. 2.56):

$$\cos \zeta = \cos \eta = \cos \vartheta = -\sin u_{VV} \cdot \sin \vartheta_T' + \cos u_{VV} \cdot \cos u_{HH} \cdot \cos \vartheta_T' \tag{3.11}$$

Zur Korrektur der Streckenmessung können die internen Algorithmen des Tachymeters verwendet werden. Hierzu müssen vor Beginn der Messung die Werte für die Additionskorrektion k_0 und die

Geschwindigkeitskorrektion k_n an das Tachymeter übermittelt werden. Die Werte der Frequenzkorrektion k_f und zyklischen Korrektion k_z werden werkseitig bestimmt und instrumentenintern gespeichert. Zur Korrektur um k_0 und k_n auf einem externen Rechner werden beide Werte auf Null gesetzt. Die korrigierte Streckenmessung s ergibt sich nach:

$$s = S + k_n + k_0 = S\left(1 + \frac{n_0 - n}{n_0}\right) + k_0 \tag{3.12}$$

Hierbei bezeichnet S die am Tachymeter abgelesene Distanz, n_0 den bei der Messung eingestellten Festwert und n den für die Messstrecke relevanten tatsächlichen Mittelwert des Brechungsindexes.

3.3 Kalibrierung

3.3.1 Kalibrierung des Richtungslasers

Zur Übertragung der Richtung der Y_N -Achse in das System des Tachymeters wird ein Richtungslaser parallel zu dieser an der Aufhängevorrichtung angebracht (Abb. 3.4). Um die Abweichungen bei der Berechnung der Stehachsenneigung des Tachymeters in Ziel- und Kippachsenrichtung geringer als die Sensorauflösung zu halten, sollte die Abweichung zwischen Y_N -Achse und Laserstrahlrichtung nicht mehr als 0,1 gon betragen. Zugleich gehen die in Kapitel 2.5.3 und 3.2.3 angegebenen Gleichungen von einer Orthogonalität der X_N - und Y_N -Achse aus. Die Abweichung hiervon sollte ebenfalls maximal 0,1 gon betragen. Am Nivel20 Neigungssensor selbst ist die Richtung der Y_N -Neigungsachse nur näherungsweise durch eine Markierung in der Kunststoffabdeckung zu erkennen. Zur Kalibrierung des Richtungslasers und zur Überprüfung der Achsen des Neigungssensors wurde daher folgende Anordnung verwendet (Abb. 3.14).

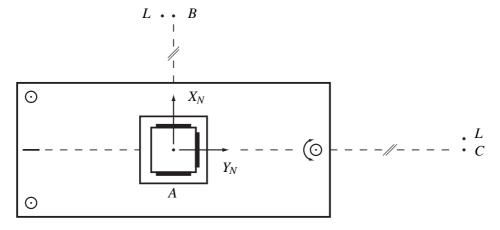


Abb. 3.14: Anordnung zur Kalibrierung des Richtungslasers und zur Überprüfung der Achsen des Neigungssensors

Der Neigungssensor wurde in der Aufhängevorrichtung fest montiert und seine Lage durch Anschlagspunkte fixiert. Durch diese Anschlagspunkte kann der Neigungssensor nach einer Entnahme ohne erneute Kalibrierung des Richtungslasers wieder in die Aufhängevorrichtung eingesetzt werden. Der Richtungslaser wurde am Gehäuse der Aufhängevorrichtung befestigt und grob in Richtung der Y_N -Achse ausgerichtet. Anschließend wurde die gesamte Vorrichtung mit einer Zwangszentrierung auf einem Neigungstisch befestigt. Dessen Neigungsrichtung ist durch Passmarken sehr gut erkennbar und wurde mit einem Tachymeter in den Punkt C verlängert. Ebenfalls mit einem Tachymeter wurde der Punkt C orthogonal zur Neigungsachse im Punkt C abgesteckt. Der Schnittpunkt der Neigungssensorachsen fällt mit dem Punkt C zusammen. Die Aufhängevorrichtung war in der Zwangszentrierung drehbar um den Punkt C gelagert. Das Grundprinzip dieser Anordnung besteht darin, dass sich orthogonal zur Neigungsrichtung des Neigungstisches keine Neigungsänderung ergibt.

Im ersten Schritt befand sich die Y_N -Achse in Richtung zu Punkt B ausgerichtet (Abb. 3.14). Abwechselnd wurde die Neigung des Neigungstisches an der Fußschraube verändert und der Sensor um den Punkt A leicht verdreht, bis an der Y_N -Achse keine Neigungsänderung mehr feststellbar war. Die Neigung des Tisches wurde dabei über den gesamten Arbeitsbereich des Neigungssensors durchgeführt. Anschließend erfolgte eine Ausrichtung des Richtungslasers auf den Punkt B. Das Vorgehen wurde mehrere Male wiederholt. Aus der seitlichen Ablage des Laserpunktes L zum Punkt B und der Entfernung zum Punkt A kann eine Richtungsabweichung berechnet werden. Bei n=10 Wiederholungen ergab sich eine Standardabweichung der einzelnen Richtungsbestimmung zu $S_r=0.05$ gon. Die berechnete Standardabweichung kann als Genauigkeitsmaß des dargestellten Verfahrens betrachtet werden.

Im zweiten Schritt wurde der Neigungssensor um den Punkt A gedreht. Die Y_N -Achse zeigte nun in Richtung zu Punkt C. Das Ausrichten der X_N -Achse erfolgte wie im ersten Schritt für die Y_N -Achse. Die seitliche Ablage wurde hier zwischen dem Laserpunkt L und dem Punkt C bestimmt. Die aus den gemittelten Ablagen berechnete Richtungsabweichung stellt ein Maß für die Orthogonalität der beiden Neigungssensorachsen zueinander dar. Der Winkel zwischen X_N - und Y_N -Achse berechnete sich daraus zu 99,93 gon. Die Orthogonalität ist damit ausreichend gegeben.

3.3.2 Kalibrierung der Instrumentenabweichungen

Um mit dem Hängetachymeter die vom Tachymeterhersteller angegebenen Instrumentengenauigkeiten zu erreichen, muss die entsprechende Stabilität der Instrumentenachsen auch in hängender Position gewährleistet sein. Hierzu wurden die Achsenabweichungen der verwendeten Tachymeter TCA 2003 und TCRM 1102 sowohl in aufrechter als auch in hängender Position untersucht.

Die Messungen wurden unter konstanten äußeren Bedingungen im Messlabor durchgeführt. Als Fernziele dienten jeweils zwei Kollimationsfernrohre. Der Messaufbau ist in Abbildung 3.15 dar-

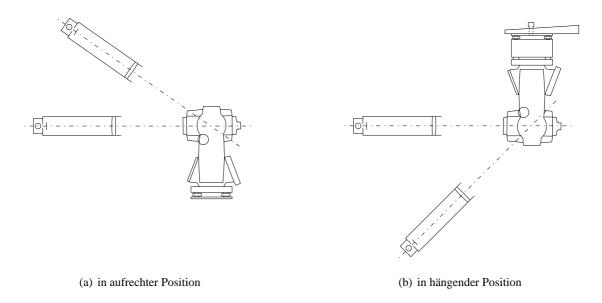


Abb. 3.15: Bestimmung der Achsenabweichungen des Tachymeters

gestellt. Es wurden mit jedem Tachymeter jeweils fünf Messreihen abwechselnd in hängender und in aufrechter Position durchgeführt. Eine Messreihe bestand aus jeweils fünf Messungen in zwei Fernrohrlagen zum Horizontal- und zum Steilziel. Vor jeder Messreihe in aufrechter Position wurde eine Wartezeit von 10 Minuten eingehalten, um ein Rückfließen der Flüssigkeit im Stehachsenkompensator zu ermöglichen. Anschließend wurde dieser kalibriert. Auch in hängender Position erfolgte vor jeder Messreihe eine Bestimmung der Rotationsparameter φ_{OS} und ω_{OS} (Abb. 3.10). Die Messwerte des Tachymeters wurden nur um die Stehachsenneigung korrigiert. Alle anderen Achsenabweichungen des Tachymeters wurden über die GeoCOM Schnittstelle auf Null gesetzt.

Die Berechnung der Achsenabweichungen erfolgte nach den Gleichungen (2.29), (2.34) und (2.47). Für die Bestimmung eines Parametersatzes wurden die Einzelmessungen einer Messreihe zu einem Mittelwert zusammengefasst. Tabelle 3.3 stellt die Mittelwerte und die Standardabweichungen einer Einzelbestimmung aus den jeweils fünf Messreihen in hängender und in aufrechter Position dar.

Tab. 3.3: Achsenabweichungen der Tachymeter in mgon in hängender und in aufrechter Position. c: Zielachsenabweichung, h: Höhenindexabweichung, i: Kippachsenneigung

	\overline{c}	S_C	\overline{h}	s_h	\bar{i}	s_i
TCA 2003 aufrecht TCA 2003 hängend	-1,06 0,89	0,06 0,07	0,20 1,93	0,07 0,12	1,01 5,93	0,26 0,12
TCRM 1102 aufrecht TCRM 1102 hängend	-3,06 $1,86$	0,05 0,15	-5,19 3,27	0,28 0,15	-1,79 $-1,96$	0,39 0,23

Die Mittelwerte der Achsenabweichungen unterscheiden sich in aufrechter und in hängender Position um maximal 8 mgon. Wie die Standardabweichungen zeigen, sind die Werte in der jeweiligen Position jedoch stabil. Die Begründung hierfür findet sich in der Lagerung der Kippachse des Tachymeters. Diese ist sowohl bei der TPS 1000 Serie als auch bei der TPS 1100 Serie gleich aufgebaut. Die Kippachse des Tachymeters bewegt sich auf beiden Seiten in einem kreisrunden Lagerring (Abb. 3.16a). Die beiden Lagerringe sind dabei fest mit den beiden Kippachsenträgern verbunden. Zur Justierung der Kippachse befindet sich auf der Rückseite einer Lagerringscheibe ein zweiter Lagerring nicht zentrisch zu dieser (Abb. 3.16b). Durch eine Drehung der Scheibe rechtwinklig zur Kippachse kann diese einseitig vertikal verschoben werden. Nach Abschluss der Justierung wird die Lagerringscheibe mit Schrauben fixiert.

Die Differenzen in den Ergebnissen der Kalibrierung können auf die Toleranzen bei der Fertigung der Kippachse und der beiden Lagerringe zurückgeführt werden. Der Innendurchmesser der Lagerringe ist geringfügig größer als der entsprechende Außendurchmesser der Kippachse. Bei einem Abstand der beiden Lagerringe zueinander von 8 cm ergibt eine einseitige vertikale Verschiebung der Kippachse von 0,01 mm bereits eine Kippachsenneigungsänderung von 8 mgon. In aufrechter Position liegt die Kippachse daher auf den unteren Seiten der beiden Lagerringe auf, in hängender Position auf den beiden oberen. In beiden Positionen ergeben sich jedoch stabile Lagerungen der Kippachse, welche allerdings nicht identisch miteinander sind.

Hieraus folgt, dass die Achsenabweichungen des Hängetachymeters zwingend in hängender Position bestimmt werden müssen. Aufgrund der Ergebnisse kann bei den untersuchten Tachymetern von der Stabilität der Instrumentenachsen ausgegangen werden.



(a) Lagerringscheibe



(b) Kippachse mit exzentrischem Lagerring

Abb. 3.16: Lagerung der Kippachse des Tachymeters (TPS 1100 Serie von Leica)

3.3.3 Kalibrierung des Neigungssensors

Die mit dem Hängetachymeter bestimmten und um die Achsenabweichungen korrigierten Beobachtungen λ_T' und ϑ_T' beziehen sich auf das System des aufrechten Tachymeters (X_T', Y_T', Z_T') . Dessen Z_T' -Achse wird durch die Stehachse des Tachymeters definiert. Um die Stehachsenneigung zu kompensieren bzw. die Beobachtungen in das übergeordnete, sich an der Lotlinie orientierende System zu transformieren, muss die Neigung der Tachymeterstehachse bekannt sein. Diese wird mit dem externen Neigungssensor ermittelt. Um die Stehachsenneigung in Bezug zum übergeordneten System zu erhalten, sind die am Neigungssensor angezeigten Werte ω_N und φ_N noch um deren Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} zu korrigieren (Kap. 3.2). Die Winkel ω_{OS} und φ_{OS} stellen die Neigung zwischen Z_T' - und Z_N -Achse dar. Da diese durch Fertigungstoleranzen, Abweichungen bei der Verbindung zwischen Tachymeter und Neigungssensor, aber auch äußere Temperatureinflüsse auf den Neigungssensor entstehen, sind die Winkel ω_{OS} und φ_{OS} vor jedem Einsatz des Hängetachymeters neu zu bestimmen.

Im Folgenden werden drei Verfahren zur Bestimmung der Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} beschrieben. Das Grundkonzept ist bei allen Verfahren gleich: Die Neigung der Tachymeterstehachse wird in Bezug zum übergeordneten System (Lotrichtung) bestimmt. Dabei werden die Messwerte des Neigungssensors registriert. Die Winkel ω_{OS} und φ_{OS} ergeben sich als Differenz zwischen angezeigter und tatsächlicher Neigung in der entsprechenden Richtung.

Beim **ersten Verfahren** wird die Bezugsrichtung (Lotrichtung) mit Hilfe eines Zenitlotes realisiert. Das Tachymeter wird so ausgerichtet, dass sich dessen Vertikalkreisebene parallel zu einer der beiden Achsenrichtungen (X_N, Y_N) des Neigungssensors befindet. Mit dem unterhalb des Hängetachymeters positionierten Zenitlot wird eine Vertikalebene erzeugt. Durch Drehen des Zenitlotes um seine Steh-

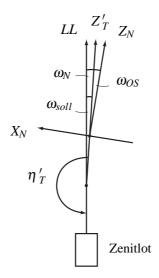


Abb. 3.17: Bestimmung der Offsetwerte des Neigungssensors ω_{OS} und φ_{OS} mit einem Zenitlot

achse kann die Vertikalebene parallel zur Kippachse des Tachymeters ausgerichtet werden. Anschließend wird die Zielachse des Tachymeters mittels Kollimation parallel zu dieser Ebene ausgerichtet (Abb. 3.17). Der Winkel ω_{OS} ergibt sich nach:

$$\omega_{OS} = \omega_N - \omega_{soll} = \omega_N - (\eta_T' - 200 \,\text{gon}) \tag{3.13}$$

Der Winkel φ_{OS} wird äquivalent hierzu durch Ausrichten der Vertikalkreisebene in Richtung der Y_N -Achse bestimmt. Gleichung 3.13 gilt unter der Voraussetzung, dass keine Achsenabweichungen des Tachymeters und des Zenitlotes vorliegen. Besonders die Höhenindexabweichung des Tachymeters h und die Ziellinienabweichung des Zenitlotes c_L beeinflussen das Ergebnis jedoch direkt und müssen berücksichtigt werden. Die Abweichungen können durch Messung in zwei Lagen eliminiert werden. Abbildung 3.18 stellt den Verfahrensablauf dar:

In der Ausgangsposition befindet sich der Vertikalkreis des Tachymeters parallel zur X_N -Achse. Die Vertikalebene des Zenitlotes steht parallel zu seiner Kippachse. Nach der Kollimation der beiden Vertikalstriche kann am Tachymeter der Vertikalwinkel $\eta'_{T,a}$ und an der X_N -Achse des Neigungssensors $\omega_{N,a}$ abgelesen werden. Anschließend wird das Zenitlot um 200 gon um seine Stehachse gedreht. Die korrekte Ausrichtung ist an der Parallelität der Vertikalstriche im Fernrohr des Tachymeters ersichtlich. Nach erneuter Kollimation ergeben sich am Tachymeter bzw. Neigungssensor die Werte $\eta'_{T,b}$ und $\omega_{N,b}$. Im nächsten Schritt wird das Tachymeter in die zweite Lage gedreht ($\eta'_{T,c}$, $\omega_{N,c}$). Die Werte $\eta'_{T,d}$ und $\omega_{N,d}$ können abgelesen werden, nachdem das Zenitlot wieder in seine Ausgangsposition gebracht wurde. Der Winkel ω_{OS} berechnet sich aus den Messwerten nach:

$$\omega_{OS} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\left(\eta'_{T,a} - \omega_{N,a} \right) + \left(\eta'_{T,b} - \omega_{N,b} \right)}{2} - \frac{\left(\eta'_{T,c} + \omega_{N,c} \right) + \left(\eta'_{T,d} + \omega_{N,d} \right)}{2} \right)$$
(3.14)

Der Winkel φ_{OS} kann für die Y_N -Achse äquivalent hierzu bestimmt werden.

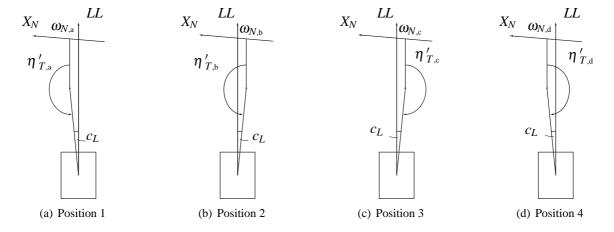


Abb. 3.18: Bestimmung der Offsetwerte des Neigungssensors mit einem Zenitlot - Verfahrensablauf

Das **zweite Verfahren** ist gleich dem ersten Verfahren aufgebaut. Als Bezugsrichtung dient bei diesem jedoch eine Horizontalebene, welche mit einem Nivellierinstrument realisiert wird. Dieses wird in der Verlängerung einer der beiden Achsen (X_N, Y_N) des Neigungssensors positioniert. Die Zielachse des Nivellierinstruments muss sich mit der Kippachse des Tachymeters nahezu auf der gleichen Höhe befinden (Abb. 3.19).

Um die Höhenindexabweichung des Tachymeters h und die Ziellinienabweichung (Kompensatorrestabweichung) des Nivellierinstruments c_{Ni} eliminieren zu können, müssen die Messungen in zwei Lagen durchgeführt werden. Als Nivellierinstrument eignet sich besonders das Ni002 von Carl Zeiss Jena. Das Ni002 ist ein Kompensatornivellierinstrument, welches die Möglichkeit besitzt in zwei Kompensatorlagen zu messen um so den Einfluss der Restfehler zu eliminieren und einen quasiabsoluten Horizont zu erhalten (Deumlich und Staiger 2002).

In der Ausgangsposition befinden sich sowohl das Tachymeter als auch das Nivellierinstrument in der ersten Lage. Nach der Kollimation der beiden Vertikalstriche kann am Tachymeter der Vertikalwinkel $\eta'_{T,a}$ und an der X_N -Achse des Neigungssensors $\omega_{N,a}$ abgelesen werden. Anschließend wird der Kompensator des Nivellierinstruments in die zweite Lage gedreht, die Vertikalstriche erneut kollimiert und die Werte $\eta'_{T,b}$ und $\omega_{N,b}$ abgelesen. Der Vorgang wiederholt sich für die zweite Lage des Tachymeters ($\eta'_{T,c}$, $\omega_{N,c}$, $\eta'_{T,d}$, $\omega_{N,d}$). Der Winkel ω_{OS} berechnet sich hieraus nach:

$$\omega_{OS} = -\frac{1}{2} \left(\frac{\left(\eta'_{T,a} - \omega_{N,a} \right) + \left(\eta'_{T,b} - \omega_{N,b} \right)}{2} - \frac{\left(\eta'_{T,c} + \omega_{N,c} \right) + \left(\eta'_{T,d} + \omega_{N,d} \right)}{2} + 200 \, \text{gon} \right) (3.15)$$

Der Winkel φ_{OS} ergibt sich für die Y_N -Achse wiederum äquivalent hierzu. Die Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} können nach diesem Prinzip auch mit einem Nivellierinstrument ohne drehbaren Kompensator bestimmt werden. Anstelle der Messung in der zweiten Kompensatorlage wird das Nivellierinstrument auf der gegenüberliegenden Seite des Hängetachymeters positioniert. Die auf die Horizontale bezogenen Vertikalwinkel ergeben sich durch Ergänzung der Messwerte auf den Sollwert.

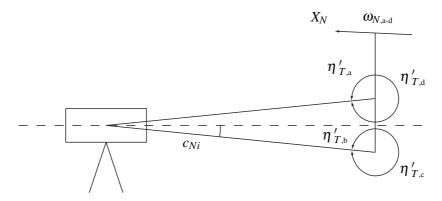


Abb. 3.19: Bestimmung der Offsetwerte des Neigungssensors ω_{OS} und φ_{OS} mit einem Nivellierinstrument

Beim **dritten Verfahren** wird die Lage der Stehachse durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (räumliche Helmert Transformation) ermittelt. Hierzu werden Passpunkte im übergeordneten System (X,Y,Z) benötigt, welche mit dem Hängetachymeter im System des Tachymeters (X_T,Y_T,Z_T) bestimmt werden. Die Transformation beider Systeme liefert die benötigten Rotationsparameter zur Bestimmung der Offsetwerte ω_N und φ_N des Neigungssensors.

Die Transformation besitzt sieben Parameter. Zur sicheren Bestimmung der Transformationsparameter sollten jedoch mindestens vier über den Horizont verteilte Passpunkte gemessen werden. Der Ablauf des Verfahrens ist wie folgt:

Die im System des Tachymeters vorliegenden Beobachtungen α_T und η_T werden zunächst in das System des Tachymeters in aufrechter Position transformiert (Gl. 3.1 und 3.2). An die Beobachtungen α_T' und η_T' werden anschließend Korrekturen aufgrund der vorher bestimmten Achsenabweichungen des Tachymeters angebracht (Gl. 3.3, 3.4 und 3.5). Es ergeben sich die Kugelkoordinaten λ_T' und ϑ_T' .

Damit sich die Beobachtungen aller Passpunkte auf eine einheitliche und räumlich stabile Stehachse beziehen, erfolgt die Transformation der einzelnen Beobachtungen λ'_T und ϑ'_T mit den entsprechenden Neigungswinkeln ω_N und φ_N in das System (X''_T, Y''_T, Z''_T) (Kap. 3.2.3, Gl. 3.6 bis 3.11). Für die Offsetparameter des Neigungssensors wird jedoch $\omega_{OS} = 0$ und $\varphi_{OS} = 0$ gewählt. Das System (X''_T, Y''_T, Z''_T) ist somit in Bezug zum übergeordneten System (X, Y, Z) in Richtung der X_N -Achse um den Winkel φ_{OS} und in Richtung der Y_N -Achse um den Winkel ω_{OS} geneigt (Abb. 3.20).

Wurden die Beobachtungen der Passpunkte in zwei Lagen durchgeführt, erfolgt nun deren Reduktion auf die erste Lage nach den Gleichungen 2.41 und 2.42. Hierbei soll noch angemerkt werden, dass beim Vorliegen von Beobachtungen in zwei Lagen eine vorherige Korrektur der Messwerte infolge von Achsenabweichungen des Tachymeters entfallen kann. Der Einfluss ci_V ist bei annähernd horizontaler Zielung vernachlässigbar klein (Kap. 2.5.1). Die Korrektur der Streckenmessung kann mit Hilfe der internen Algorithmen des Tachymeters oder nach Gleichung 3.12 erfolgen.

Für n Passpunkte liegen nun die reduzierten Beobachtungen $\lambda_{Tn}^{"}$, $\vartheta_{Tn}^{"}$ und s_n im System $(X_T^{"}, Y_T^{"}, Z_T^{"})$ vor. In die folgende räumliche Ähnlichkeitstransformation geht das System $(X_T^{"}, Y_T^{"}, Z_T^{"})$ als Quellsystem ein. Der Ortsvektor eines Raumpunktes sei im Quellsystem mit \mathbf{Q} und im Zielsystem mit \mathbf{Z} bezeichnet. Die kartesischen Koordinaten der Passpunkte im Quellsystem \mathbf{Q}_n ergeben sich aus den Beobachtungen wie folgt:

$$\mathbf{Q}_{n} = \begin{pmatrix} X_{Tn}^{"} \\ Y_{Tn}^{"} \\ Z_{Tn}^{"} \end{pmatrix}^{T} = \begin{pmatrix} s_{n} \cdot \cos \lambda_{Tn}^{"} \cdot \cos \vartheta_{Tn}^{"} \\ s_{n} \cdot \cos \lambda_{Tn}^{"} \cdot \sin \vartheta_{Tn}^{"} \\ s_{n} \cdot \sin \lambda_{Tn}^{"} \end{pmatrix}^{T}$$

$$(3.16)$$

Der Ursprung des Quellsystems liegt im Schnittpunkt aus Stehachse und Kippachse des Tachymeters.

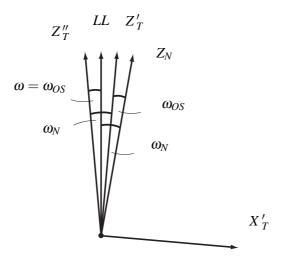


Abb. 3.20: Bestimmung der Offsetwerte mit einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (Schnitt durch die Z_T - X_T -Ebene für den Sonderfall, dass $\kappa_{OS} = 0$)

Das Zielsystem der Ähnlichkeitstransformation sei das übergeordnete System (X, Y, Z). Für die Ortsvektoren der Passpunkte im Zielsystem \mathbb{Z}_n folgt demnach:

$$\mathbf{Z}_{n} = \begin{pmatrix} X_{n} \\ Y_{n} \\ Z_{n} \end{pmatrix}^{T} \tag{3.17}$$

Die Ähnlichkeitstransformation zwischen dem Quell- und Zielsystem wird durch die Beziehung

$$\mathbf{Z} = \mathbf{t} + \mu \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{Q} \tag{3.18}$$

beschrieben. Mit μ ist der Maßstabsfaktor bezeichnet, \mathbf{t} ist der Verschiebungsvektor

$$t = \begin{pmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{pmatrix}, \tag{3.19}$$

und **R** bezeichnet eine dreiachsige Drehmatrix. Diese setzt sich aus drei sukzessiven Drehungen um die drei Achsen des Quellsystems zusammen, und kann zerlegt werden in (Gl. 2.51, 2.53 und 2.62):

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \mathbf{R}_{X}(\omega) \cdot \mathbf{R}_{Y}(\varphi) \cdot \mathbf{R}_{Z}(\kappa) \tag{3.20}$$

Mit den Drehwinkeln ω , φ und κ lautet sie allgemein:

$$\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa \cdot \cos \varphi & -\sin \kappa \cdot \cos \varphi & \sin \varphi \\ \cos \kappa \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega & -\sin \kappa \cdot \sin \varphi \cdot \sin \omega & -\cos \varphi \cdot \sin \omega \\ +\sin \kappa \cdot \cos \omega & +\cos \kappa \cdot \cos \omega \\ -\cos \kappa \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega & \sin \kappa \cdot \sin \varphi \cdot \cos \omega & \cos \varphi \cdot \cos \omega \\ +\sin \kappa \cdot \sin \omega & +\cos \kappa \cdot \sin \omega \end{pmatrix}$$
(3.21)

Bei Gleichung 3.18 handelt es sich um eine nichtlineare Abbildungsgleichung. Für die Ausgleichung ist Gleichung 3.18 daher durch eine Taylor-Reihenentwicklung, welche nach dem ersten Glied abgebrochen wird, zu linearisieren, wobei Näherungswerte für die unbekannten Transformationsparameter benötigt werden. Das weitere Vorgehen der Ausgleichung (Aufstellen der Designmatrix, Bestimmung der Transformationsparameter und deren Genauigkeitsmaße) entspricht den bekannten Algorithmen (u.a. Jäger u. a. 2005, Niemeier 2002). Solange nichts weiteres bekannt ist, sollten die Beobachtungsgleichungen als unkorreliert und gleichgewichtig in die Ausgleichung eingeführt werden. Durch die Verwendung von Näherungswerten ist die Bestimmung der Transformationsparameter iterativ durchzuführen.

Als Resultat der Ausgleichung erhält man die gesuchten Transformationsparameter: die drei Rotationen ω , φ und κ , die drei Translationen t_X , t_Y und t_Z und den Maßstabsfaktor μ . Die Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} des Neigungssensors berechnen sich aus den Rotationswinkel ω und φ zu:

$$\omega_{OS} = \cos \kappa_{OS} \cdot \varphi - \sin \kappa_{OS} \cdot \omega \tag{3.22}$$

$$\varphi_{OS} = -\sin \kappa_{OS} \cdot \varphi - \cos \kappa_{OS} \cdot \omega \tag{3.23}$$

Daneben erhält man aus den Translationsparametern \mathbf{t} den Ortsvektor des Schnittpunktes aus Stehachse und Kippachse des Tachymeters \mathbf{O}_T im übergeordneten System (X,Y,Z):

$$\mathbf{O}_T = \mathbf{t} \tag{3.24}$$

Die Orientierung des Hängetachymeters ergibt sich aus dem Rotationsparameter κ . Dieser bezeichnet den horizontalen Winkel zwischen dem Nullpunkt des Horizontalkreises und der positiven X-Achse.

3.3.4 Vergleich der Kalibrierung mit Zenitlot und räumlicher Ähnlichkeitstransformation

Ziel dieser Untersuchung war die Bestimmung eines Genauigkeitsmaßes für die vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung des Neigungssensors und deren Vergleich. Da die beiden ersten Verfahren einen ähnlichen Aufbau besitzen, wurden die Untersuchungen nur für das erste (Zenitlot) und dritte (Ähnlichkeitstransformation) Verfahren durchgeführt.

Die Messungen erfolgten unter nahezu konstanten äußeren Bedingungen im Messlabor der TU Dresden. Als Tachymeter wurde das TCA 2003 verwendet (Tab. 3.1). Zur Realisierung einer vertikalen Ebene für das erste Verfahren diente das Präzisionszenitlot PZL von Carl Zeiss Jena. Dieses ist mit einem Neigungskompensator ausgestattet und besitzt eine vom Hersteller angegebene Genauigkeit einer Lotung von 1:100000. Bei praktischen Untersuchungen wurden jedoch Genauigkeiten von besser 1:200000 erreicht (Hüther 1967, Köppke 1967).

Die zur Kollimation mit dem Tachymeter benötigte Fokussierung auf Unendlich wurde mittels Autokollimation erzeugt. Als Festpunkte für die Transformation dienten vier Rundprismen, welche sich in einem Abstand von 8 m und 16 m vom Hängetachymeter befanden. Die Positionen der Festpunkte im übergeordneten System wurden mit dem TCA 2003 mit ATR in aufrechter Lage bestimmt. Das Tachymeter wurde vor den Messungen neu kalibriert, die Kalibrierung der ATR erfolgte für eine Strecke von ca. 12 m. Die Prismen wurden von mehreren Standpunkten aus eingemessen. Die nach der Ausgleichung erhaltenen Punktkoordinaten weisen in der Lage eine Standardabweichung (Präzision) von 0,07 mm und in der Höhe von 0,02 mm auf.

Nach einer Aufwärmphase des Neigungssensors wurden die Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} abwechselnd je 20-mal mit dem Zenitlot und über eine Ähnlichkeitstransformation bestimmt. Durch die Verwendung der ATR zur Anzielung der Festpunkte konnte der Vorgang weitgehend automatisiert werden. Bei der Kollimation mit dem Zenitlot ist unbedingt auf eine Fokussierung auf Unendlich zu achten. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 3.4 und Abbildung 3.21 zusammengesellt.

Die Standardabweichung einer Einzelmessung berechnet über den gesamten Messzeitraum beträgt 0,20 mgon. Die maximale Abweichung der aus den Einzelwerten der beiden Verfahren bestimmten Mittelwerte beträgt 0,12 mgon und ist nicht signifikant (statistischer Test mit einem Signifikanzniveau von 95 %).

Betrachtet man die Einzelwerte der Messungen in Abbildung 3.21, so ist jeweils ein schwacher Trend erkennbar. Dieser kann zwar mit statistischen Test als signifikant ($\alpha = 0,05$) nachgewiesen werden, für einen sicheren Nachweis ist der Stichprobenumfang von n = 20 jedoch zu gering. Bestimmt man für die Messungen eine lineare Regression, so ergeben sich hieraus für beide Verfahren zu

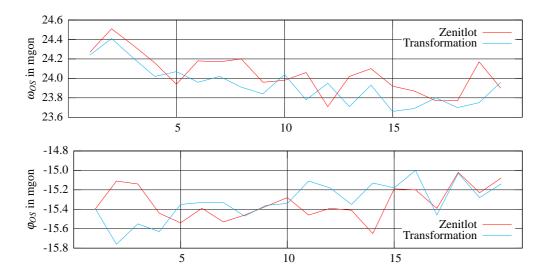


Abb. 3.21: Ergebnisse der Kalibrierung für ω_{OS} und φ_{OS}

	$\overline{\omega_{OS}}$	$s_{\omega_{OS}}$	$\overline{\varphi_{OS}}$	$s_{arphi_{OS}}$
Zenitlot	24,05	0,20	-15,33	0,17
Transformation	23,93	0,20	-15,31	0,19

Tab. 3.4: Mittelwerte und Standardabweichungen der Offsetwerte ω_{OS} und φ_{OS} in mgon

optimistische Genauigkeitsangaben. Eine mögliche Ursache des schwachen Trends könnte die Temperatur des Neigungssensors sein, die sich über den gesamten Messzeitraum von vier Stunden um 1,1 °C änderte.

In Anbetracht der Genauigkeit der eingesetzten Instrumente kann für beide Verfahren die sich bei einer Mittelbildung über den gesamten Messzeitraum ergebende Standardabweichung einer Einzelmessung von 0,20 mgon als realistisch betrachtet werden. Während der Messungen mit dem Hängetachymeter ist auf eine konstante Temperatur des Neigungssensors zu achten. Die Kalibrierung ist bei einer Temperaturänderung und zur Kontrolle in regelmäßigen Abständen zu wiederholen.

3.4 Steuerungssoftware HTSoft

Zur Steuerung des Hängetachymeters wurde die Software HTSoft entwickelt. Neben der Steuerung der Sensoren erfolgt mit dieser die Auswertung und Korrektur der Messwerte, deren Weiterverarbeitung und Darstellung sowie die Datenspeicherung. Zusätzliche Anwendungsprogramme unterstützen den Benutzer bei speziellen Messaufgaben.

Die Software wurde auf der Grundlage der Klassenbibliothek MFC (Microsoft Foundation Classes) in der Programmiersprache C++ geschrieben. Die Betriebsplattform ist daher Windows. Die Steuerung des Tachymeters erfolgt über die GeoCOM Schnittstelle von Leica. Neben Leica bieten auch andere Tachymeterhersteller (u.a. Topcon und Trimble) Schnittstellen zur externen Steuerung ihrer Tachymeter an. Das Programm wurde daher intern so strukturiert, dass grundsätzlich auch die Verwendung von Tachymetern eines anderen Herstellers beim Vorliegen einer entsprechenden Schnittstellenbibliothek möglich ist.

Die Steuerung des Programmablaufs erfolgt über Dialogfenster, welche über die Menüleiste aufgerufen werden. Im Sensorenuntermenü können die Verbindungen zu den einzelnen Sensoren über die seriellen Ports hergestellt werden. Hier können auch die individuellen Funktionen der Sensoren aktiviert (z.B. Rotlaser des Tachymeters) und deren Einstellungen getroffen werden. Die Kalibrierung der Sensoren erfolgt über Anwendungsprogramme die den Benutzer bei der Messung unterstützen. Anschließend werden die Kalibrierwerte in einem Protokoll gespeichert. Wurde das Hängetachymeter kalibriert, kann die Neigung der Tachymeterstehachse angezeigt und graphisch (als elektronische Libelle) dargestellt werden. Die Kompensation der Stehachsenneigung und die Korrektur

91

der Messwerte um die Achsenabweichungen kann separat gewählt werden. Für das Verfahren der vertikalen Punktübertragung nach Morlot besteht daneben noch die Option die Korrekturen nur an den Vertikalwinkel anzubringen. Der Messungsdialog gleicht dem Menü Messen bei Leica Tachymetern der TPS 1100 Serie. In einem Dialogfenster werden die aktuelle Horizontalrichtung und der aktuelle Zenitwinkel angezeigt. Alle Punktinformationen können hier eingetragen und eine Streckenmessung ausgelöst werden. Anschließend erfolgt die Speicherung des Datensatzes. Anhand der aktuellen Stationsdaten (kartesische Koordinaten des Achsenschnittpunktes und Orientierung des Horizontalkreises) werden die Koordinaten der beobachteten Punkte bestimmt. Die Stationsdaten können manuell gesetzt oder über eine Freie Stationierung bestimmt werden. HTSoft ermöglicht das Verwalten von Punkten mit ihren kartesischen Koordinaten, ihrem Punktcode und einer Punktbeschreibung. Die Punktdaten können über eine Textdatei eingelesen werden. Weiter Anwendungsprogramme wurden zur Unterstützung der Absteckung, dem Monitoring und der automatischen Verfolgung von Zielpunkten entwickelt.

Die Messdaten können in Form einer Liste oder Skizze am Bildschirm ausgegeben werden. Die Dateiverwaltung erlaubt die Speicherung, den Druck und den Export der Messdaten im GSI-Format. Die Anpassung der Software an andere Exportformate ist möglich. Vor dem Export können die Datensätze editiert oder gelöscht werden. Die Suche nach einem Datensatz ist über die Punktnummer oder den Punktcode möglich.

4 Kombination des Hängetachymeters mit einem CCD-Sensor

Um das Anwendungsgebiet des Hängetachymeters zu vergrößern wird dieses mit einer Okular-kamera kombiniert. Diese Kombination bietet vor allem den Vorteil nicht auf einen direkten Beobachter angewiesen zu sein. In Verbindung mit einer Motorisierung der Fokussierlinse ist somit eine entfernte Steuerung des gesamten Systems möglich. Dies erlaubt eine Verwendung an Standpunkten ohne direkten Zugang. Denkbar ist z.B. die feste Installation an der Decke einer Montagehalle. Darüber hinaus ergibt sich die Möglichkeit einer automatischen Zielerkennung und -verfolgung nichtsignalisierter Punkte auch bei Messungen nahe des Zenits bzw. Nadirs. Einhergehend mit einer Unterstützung des Benutzers durch die Verwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen, ist zudem eine Steigerung der erreichbaren Genauigkeit des Systems zu erwarten.

In Kapitel 4.1 wird der eingesetzte CCD-Sensor beschrieben und die Implementierung in das System dargestellt. Zur Realisierung eines Autofokus wird das Hängetachymeter mit einem Schrittmotor kombiniert, mit welchem die Fokussierlinse positioniert werden kann (Kap. 4.2). Zur Steuerung werden kontrastbasierte Algorithmen verwendet. Kapitel 4.3 beschreibt die Kalibrierung der Okularkamera in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse. Den Abschluss bildet eine Darstellung der zur optischen Zielerkennung eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen in Kapitel 4.4.

4.1 Konstruktion der Okularkamera

Die eingesetzte Okularkamera wurde am Geodäsie und Geodynamik Labor (GGL) des IGP der ETH Zürich entwickelt. Sie ist Bestandteil des astro-geodätischen Online-Beobachtungssystems DAEDALUS und dient der Automatisierung der Messungen von stellaren und terrestrischen Zielen. Ein Kriterium bei der Entwicklung war, das verwendete Tachymeter nicht konstruktiv zu verändern. Zudem sollte die Größe der Kamera auch ein Durchschlagen des Tachymeterfernrohres erlauben.

Bei der Konstruktion einer Okularkamera können zwei verschiedene Wege verfolgt werden. Zum einen die Nachbildung des Strahlengangs, welcher bei der Beobachtung mit einem menschlichen Auge entsteht, durch ein Linsensystem. Die Strahlen schneiden sich hierbei sowohl in der Strichkreuzebene als auch auf dem CCD-Sensor (Abb. 4.1(a)). So bleiben sowohl das Strichkreuz im

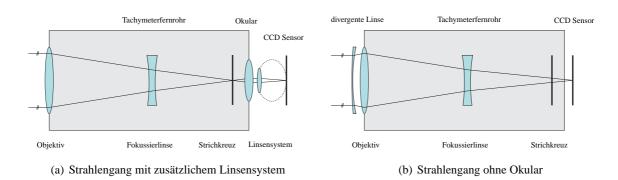


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der optischen Komponenten und des Strahlengangs bei einer Okularkamera (nach Guillaume und Bürki 2008)

Kamerabild sichtbar, als auch der Fokussierbereich des Tachymeters erhalten. Die andere Möglichkeit besteht darin den CCD-Sensor anstelle des Okulars direkt hinter der Strichkreuzebene zu platzieren (Abb. 4.1a).

Der Vorteil dieser Konstruktion liegt in der verbesserten Qualität der Bilder sowie im geringeren Platzbedarf durch den Verzicht auf das Okular und ein zusätzliches Linsensystem. Um im gesamten Entfernungsbereich ein scharfes Bild zu erhalten, muss der CCD-Sensor in der Strichkreuzebene angebracht werden. Ohne eine konstruktive Veränderung des Tachymeters ist eine Montage des Sensors jedoch nur hinter dieser möglich. Durch eine zusätzlich auf dem Objektiv angebrachte divergente Linse kann der Schnittpunkt des Strahlengangs jedoch um den Abstand zwischen Strichkreuz- und Sensorebene nach hinten verschoben werden. Als Folge daraus ist das Strichkreuz auf dem Bild des CCD-Sensors nicht sichtbar. Das System DAEDALUS verwendet die letztgenannte Konstruktionsform.(Guillaume und Bürki 2008)

Die für das System DAEDALUS konstruierte Okularkamera basiert auf der Kamera Guppy F-080B der Firma Allied Vision Technologies GmbH (AVT). Einige wichtige Kameraspezifikationen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tab. 4.1: Kameraspezifikationen AVT Guppy F-080B

Sensortyp	CCD monocrome
Auflösungstiefe	8 bit
max. Bildgröße	$XGA (1032 Px \times 778 Px)$
Sensorgröße	$5,80\mathrm{mm}\times4,92\mathrm{mm}$
Zellengröße (Pixel)	$4,65\mu\mathrm{m}\times4,65\mu\mathrm{m}$
max. Framerate	30 fps (Vollframes)
Belichtungszeit	$54 \mu\mathrm{s} \dots 67 \mathrm{s}$

Die Kamera besitzt eine Firewire-Schnittstelle (IEEE 1394a) zur Bildübertragung sowie zwei weitere Anschlüsse für die Stromversorgung und das Trigger-Signal. Die zeitliche Steuerung der Belichtung kann sowohl intern als auch extern erfolgen. Zur Steuerung der Kamera über einen externen Rechner stehen umfangreiche Programmbibliotheken des Herstellers zur Verfügung (Allied Vision Technologies 2007). Weitere Informationen zur Kamera finden sich im technischen Handbuch (Allied Vision Technologies 2008).

Für die Montage der Kamera am Fernrohr des Tachymeters wurde diese modifiziert. Die Sensorplatine wurde auf einer Montageplatte befestigt, welche sich wie das Okular über einen Bajonettverschluss am Fernrohr montieren lässt. Die übrigen Platinen wurden in ein Gehäuse unterhalb der Sensorplatine ausgelagert. Alle Anschlüsse sind durch eine flexible Verkabelung ersetzt worden. Die Modifikationen führen zu einer sehr kompakten Bauweise der Kamera, so dass sich das Fernrohr in eine senkrechte Position drehen lässt und damit Beobachtungen auch im Zenit bzw. Nadir ermöglicht. Das zusätzliche Gewicht der Kamera wird durch ein Gegengewicht auf der Objektivseite ausgeglichen.

Der auf dem CCD-Sensor abgebildete Bereich beträgt in Verbindung mit einem TCA 2003 in der Höhe 1,24 gon und in der Breite 0,93 gon. Dementsprechend bildet ein Pixel einen Bereich von ca. $1,2 \times 1,2$ mgon ab.

Um die Brennweite des Fernrohrs zu vergrößern, wird vor dessen Objektiv eine divergente Linse angebracht. Mit zusätzlicher Linse können Ziele in einer Entfernung von 2,3 m bis Unendlich, ohne Linse in einer Entfernung von 1,6 m bis 13 m fokussiert werden. Durch die Vergrößerung der Brennweite wird auch die automatische Zielerfassung (ATR) und die Streckenmessung des Tachymeters beeinflusst. Die Automatische Zielerfassung ist bei Verwendung der Zusatzlinse nicht mehr möglich und die Streckenmessung ist lediglich auf ein Prisma möglich.



(a) Modifizierte AVT Guppy CCD-Kamera



(b) AVT Guppy CCD-Kamera am Tachymeter

Abb. 4.2: Die Kamera AVT Guppy F-080B wurde zur Montage am Tachymeter modifiziert.

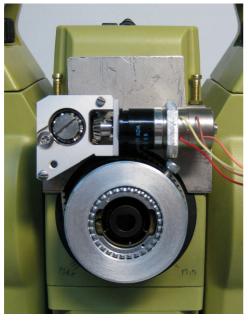
4.2 Fokus

Ein scharfes Abbild des Zielpunktes auf dem CCD-Sensor ist die Grundvoraussetzung für verlässliche Bildverarbeitung. Um ein hohes Maß an Automation zu erreichen wird zudem eine motorisierte Fokussierung benötigt. Das folgende Kapitel beschreibt die Ausstattung des Hängetachymeters mit einem automatisierten Fokussierantrieb.

4.2.1 Konstruktion

Ein Grundgedanke bei der Entwicklung des Hängetachymeters ist es, keine baulichen Veränderungen am Tachymeter selbst vorzunehmen. Der Fokussierantrieb muss daher am Fokussierring des Tachymeters ansetzen. Um steile Zielungen weiterhin zu ermöglichen, steht für einen Antrieb nur ein begrenzter Raum um das Okular des Tachymeters gegenüber der Kamera zur Verfügung.

Als Antrieb wird ein Escap Schrittmotor P110 zusammen mit einem Planetengetriebe verwendet. Die Antriebsachse ist über ein kugelgelagertes Kegelzahnrad und einen Zahnriemen mit dem Fokussierring des Tachymeters verbunden. Zur Befestigung sind alle Komponenten auf einer Grundplatte montiert, welche an den Bohrungen für die Gehäuseabdeckung angeschraubt wird (Abb. 4.3). Um das Gewicht des Fokussierantriebs auf das Fernrohr zu kompensieren wird ein zusätzliches Gegengewicht an der Objektivseite angebracht.







(b) Fokussierantrieb und Kamera

Abb. 4.3: Verwendung eines Schrittmotors zur Steuerung der Fokussierung des Tachymeters.

4.2 Fokus 97

Zur Motorsteuerung wird die Trinamic Steuerkarte TMC-110-42-485 eingesetzt. Die Verbindung zum Rechner erfolgt über USB. Die Steuerkarte unterstützt Microstepping, und über die Funktion StallGuard kann sensorlos ein Stillstand des Motors (Anschlag) detektiert werden. Durch die Auflösung des Schrittmotors und die Übersetzung kann die Position des Fokussierrings von der kürzesten Zielweite bis Unendlich in 2000 Schritte unterteilt werden. Zu Initialisierung des Motors wird der Fokussierring in Richtung der kürzesten Zielweite bewegt. Der Anschlagspunkt wird detektiert und die Positionszählung des Schrittmotors auf Null gesetzt. Die Dauer, um den Fokussierring über den gesamten Fokussierbereich zu bewegen, beträgt ca. 3 Sekunden.

4.2.2 Kontrastbasierter Autofokus

Ist die Distanz eines Zielpunktes bekannt, kann die Fokussierlinse über den Schrittmotor direkt in die entsprechende Position gebracht werden, um ein scharfes Abbild auf dem CCD-Sensor zu erhalten. In der Mehrzahl der Fälle liegen jedoch keine Distanzinformationen vor. Die Steuerung der Fokussierung muss in diesen Fällen daher auf Grundlage der Bildinformationen des CCD-Sensors erfolgen.

Hierzu beschreiben Kessler und Fischer (2000) ein analytisches Modell eines Autofokussystems mit CCD-Kameras, und Liao (1993) und Blessing (2000) zeigen verschiedene Ansätze eines auf kontrastbasierten Methoden beruhenden Autofokus. In Walser (2004) findet sich eine Übersicht über verschiedene Ansätze von Autofokusfunktionen, welche in Zusammenhang mit dem TM3000V entwickelt wurden. So verwendete u.a. Roic (1996) das Maximum der mit dem Mittelwert normierten Standardabweichung der Grauwerte (GW), um die beste Position der Fokussierlinse zu bestimmen.

Das in dieser Arbeit verwendete Verfahren zur Steuerung der Fokussierung beruht, wenn keine Distanzinformationen vorliegen, auf der Maximierung des Bildkontrasts. Verschiedene Methoden, den Kontrast eines Bildes zu bestimmen, finden sich u.a. bei Liao (1993) und Blessing (2000). Die Methoden beinhalten entweder die Berechnung der Varianz, der Entropie oder des Laplace Operators der Grauwerte, welche auf der Helligkeit der einzelnen Pixel beruhen, jedoch deren räumliche Verteilung nicht berücksichtigen. Wie Walser (2004) aufzeigt, führt dies zu unerwünschten Auswirkungen, wenn Teile des Bildes überbelichtet oder absolut schwarz sind. Diese Effekte können gemindert werden, indem Schwellenwerte an den Rändern des Grauwertebereichs eingeführt werden, bis zu denen die Grauwerte der einzelnen Pixel zur Berechnung herangezogen werden. Generell sollte als erster Schritt jedoch eine Anpassung der Belichtungszeit erfolgen. Um die Anfälligkeit der Kontrastbestimmung gegenüber dem Bildrauschen zu reduzieren, schlägt Walser die Verwendung eines Sobelfilters (Sobel-Operators) vor, welcher aus dem Originalbild ein Gradienten-Bild erzeugt. Die Bereiche der größten Intensität (Änderungsraten) ergeben sich dort, wo sich die Helligkeit des Originalbildes am stärksten ändert.

Die automatische Steuerung der Fokussierung verwendet zur Bestimmung des Bildkontrastes die Varianz der Grauwerte s_{GW}^2 :

$$s_{GW}^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g(x,y) - m_g)^{2}$$
(4.1)

g(x,y) Grauwert des Pixels (x,y)

 m_g Mittelwert der Grauwerte des Bildes

R Anzahl der Reihen C Anzahl der Spalten n Anzahl der Pixel $(R \times C)$

Meist ist es nicht sinnvoll das gesamte Bild zur Berechnung des Kontrasts zu verwenden sondern nur einen zentralen Bildausschnitt.

4.2.3 Algorithmus zur Bestimmung des Kontrastmaximums

Zur Bestimmung der Position des Kontrastmaximums (bester Fokus) gibt es mehrere Ansätze. So kann der Verlauf des Kontrasts in Abhängigkeit von der Position p der Fokussierlinse mathematisch beschrieben werden. Eine Kontrastfunktion auf der Grundlage der Optik der TPS 1100 Serie von Leica wurde von Walser (2004) entwickelt. Durch Ausgleichung ist es möglich, die Parameter einer solchen Funktion unter Durchführung von Kontrastmessungen an diskreten (gleichabständigen) Positionen der Fokussierlinse zu bestimmen. Das Kontrastmaximum ergibt sich direkt aus den Funktionsparametern bzw. aus einer anschließenden Funktionsdiskussion. Bei Tachymeterfernrohren mit einem sehr geringen Tiefenschärfebereich, wie bei dem verwendeten TCA 2003, führt dieser Ansatz jedoch meist nicht zu sinnvollen Ergebnissen. Direkt um das Kontrastmaximum steigt der Kontrast steil an, ist das Objekt jedoch stark defokussiert führt eine Positionsänderung der Fokussierlinse nur zu geringen Kontraständerungen. Um die Parameter korrekt bestimmen zu können, müssen die Kontrastmessungen daher vornehmlich in einem schmalen Bereich um das Maximum liegen, was bei gleichabständigen Positionen zu einer hohen Anzahl von Messungen führt.

Ein weiterer Ansatz zur Maximierung des Bildkontrastes besteht in der Verwendung eines Optimierungsalgorithmus. Hier können Verfahren der Liniensuche wie Bisektion (Intervallhalbierungsverfahren) oder Goldener Schnitt, aber auch Algorithmen aus der Kategorie der Hillclimbing-Suchverfahren verwendet werden. Allen Verfahren gemeinsam ist jedoch, dass sie iterativ vorgehen und hierfür die Fokussierlinse sowohl in positiver Richtung, d.h. von der kürzesten Zielweite zu Unendlich, als auch in negativer Richtung, d.h. von Unendlich zur kürzesten Zielweite, bewegt werden muss. Dies bedingt, dass mechanisch ein Impuls des Schrittmotors (Drehung) in eine entsprechende Positionsänderung der Fokussierlinse umgesetzt wird. Wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, ergeben sich jedoch unterschiedliche Positionen der Kontrastmaxima zwischen einer Fokussierung in positiver und negativer Richtung, welche selbst allerdings sehr stabil sind. Dies deutet auf ein mechanisches

4.2 Fokus 99

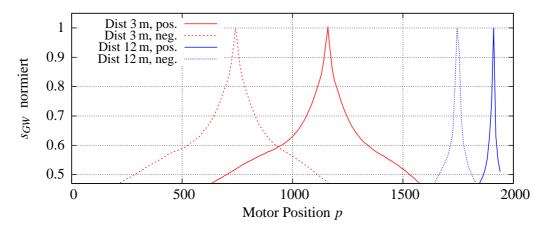


Abb. 4.4: Es ergeben sich unterschiedliche Positionen der Kontrastmaxima zwischen einer Fokussierung in positiver (von der kürzesten Zielweite zu Unendlich) und negativer (von Unendlich zur kürzesten Zielweite) Richtung. Der Abstand der Maxima zwischen beiden Fokussierrichtungen ist nicht konstant. Die Messungen wurden ohne Vorsatzlinse durchgeführt.

Spiel bei der Impulsübertragung zwischen Schrittmotor und Fokussierlinse hin. Als Folge hieraus muss die Positionierung der Fokussierlinse immer in derselben Richtung vorgenommen werden, was bei den genannten Optimierungsalgorithmen zu einer exzessiven Bewegung der Fokussierlinse führt.

Um den Einschränkungen beider genannter Verfahren Rechnung zu tragen, wurde folgender Algorithmus entwickelt:

Die Ausgangsposition der Fokussierlinse stellt die kürzeste Zielweite dar. Zu Beginn wird eine Grobsuche über den gesamten Fokusbereich durchgeführt. Die Schrittweite zwischen den einzelnen Positionen beträgt dabei ca. 10 % des Fokusbereichs. Es ist ausreichend, mit den Kontrastmessungen erst ab einer Position von 20 % des Fokusbereichs zu beginnen. Aus der Position mit dem höchsten gemessenen Kontrast und den beiden angrenzenden Kontrastwerten wird der Bereich für die anschließende Feinsuche festgelegt. Dieser Bereich sollte eine Größe von 15-20 % des Fokusbereichs nicht überschreiten.

Die Feinsuche wird wiederum nur in eine Richtung durchgeführt. Die Schrittweite sollte nicht mehr als 1,5 % des Fokusbereichs betragen. Um die Position mit dem maximalen Kontrast wird anschließend eine Polynomfunktion zweiten Grades angepasst. Die Position des Kontrastmaximums ergibt sich aus den Parametern der Funktion und kann aus der entsprechenden Richtung angefahren werden.

Bei Tests lieferte dieser Algorithmus in der im Verhältnis kürzesten Zeit eine Position, die in ca. 95 % der getesteten Fälle im Bereich der Tiefenschärfe (ca. 0,4 % des Fokusbereichs) um die beste Fokusposition lag. Abbildung 4.5 zeigt die Positionen p der Fokussierlinse (Schrittmotor), bei welchen sich ein Kontrastmaximum ergibt, in Abhängigkeit zur Zielweite.

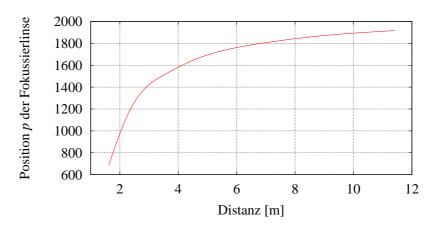


Abb. 4.5: Positionen *p* der Fokussierlinse, bei welchen sich ein Kontrastmaximum ergibt, in Abhängigkeit zur Zielweite. Die Messungen wurden ohne Vorsatzlinse durchgeführt.

Die Kalibrierung der Okularkamera basiert auf einem am GGL entwickelten Kalibrierverfahren. Bei diesem Ansatz wird von zueinander annähernd gleichabständigen Zielpunkten ausgegangen. Eine ausführliche Beschreibung des mathematischen Modells und der Bestimmung der Parameter der Kalibrierung finden sich bei Guillaume und Bürki (2008). Im Folgenden werden die Merkmale des Verfahrens dargestellt und eine Anpassung des Verfahrens an unterschiedliche Zielpunktweiten und an den Einsatz mit dem Hängetachymeter vorgenommen.

Das optische System des Tachymeterfernrohrs besteht im Wesentlichen aus zwei Linsen, dem Objektiv, auch als Hauptlinse bezeichnet, und der Fokussierlinse. Die sich ebenfalls im Strahlengang befindlichen Strahlteilungs- und Umkehrprismen sind für die weiteren Betrachtungen nicht relevant und werden vernachlässigt. Die Hauptlinse und die CCD-Sensorebene sind starr befestigt, während sich die Fokussierlinse entlang der optischen Achse bewegt. Die optische Achse des Tachymeterfernrohrs sollte mit der Zielachse zusammenfallen und orthogonal zur Kipp- und Stehachse des Tachymeters stehen. Die optischen Parameter beider Linsen und ihr Abstand zueinander definieren ein optisches System, welches durch eine gemeinsame Brennweite und zwei Hauptebenen beschrieben werden kann (Pedrotti u. a. 2007).

In klassischen Photogrammetriesystemen befinden sich die Linsen an festen Positionen und der optische Abbildungsprozess wird durch eine Zentralprojektion beschrieben (Abb. 4.6), bei der sich das objektseitige Projektionszentrum O in der Mitte der Eintrittspupille EP des optischen Systems befindet (Kraus 1997). Die Austrittspupille AP ergibt sich in analoger Weise auf der anderen Seite des Objektivs. Da die Bildebene B (CCD-Sensor) nicht in aller Strenge senkrecht auf der optischen Achse OA steht, ist die Bezugsachse ein Hauptstrahl HS, der objektseitig auf der Bildebene senkrecht steht und durch die Mitte der Eintrittspupille geht. Seine physikalische Verlängerung durchstößt die Bildebene im Bildhauptpunkt H. Da die Winkel τ in der Mitte der Eintrittspupille EP

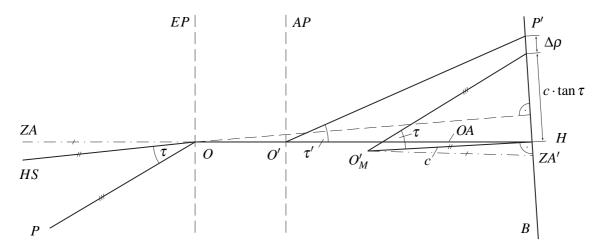


Abb. 4.6: Definition des Projektionszentrums und der Kamerakonstante (nach Kraus 1997)

definiert werden, welche meist nicht in der Hauptebene liegt, entsprechen die bildseitigen Winkel τ' nicht den objektseitigen Winkeln τ . Daher wird ein mathematisches Projektionszentrum O'_M derart definiert, dass es im Abstand c, der Kamerakonstante, orthogonal vor dem Bildhauptpunkt H liegt und sich die Winkel τ auch bildseitig abbilden. Restabweichungen führen zu (radialen) optischen Verzeichnungen $\Delta \rho$.

Eine entlang der optischen Achse OA definierte Zielachse ZA trifft daher nicht im Bildhauptpunkt H auf die Bildebene, sondern im Punkt ZA'. Der Abstand der Punkte H und ZA' auf der Bildebene ist abhängig vom Winkel zwischen der Zielachse ZA und dem Hauptstrahl HS und der Kamerakonstante c. Die Kamerakonstante c kann als Funktion des Abbildungsmaßstabs β und der Objektentfernung angegeben, oder direkt aus den optisch-mechanischen Parametern des Systems abgeleitet werden. Wie Walser (2004) für ein Linsensystem, bestehend aus einer Hauptlinse und einer Fokussierlinse, zeigt, kann die Kamerakonstante c in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse über eine Polynomfunktion zweiten Grades beschrieben werden. Da der Zusammenhang zwischen Fokussierlinsenposition und Stellung des Fokussierrings bzw. der Position des Schrittmotors linear ist (nach Auskunft von Leica Geosystems), gilt diese Beziehung auch für die Schrittmotorposition. Aufgrund des Zusammenhangs von Objektentfernung und Fokussierlinsenposition geht die entfernungsabhängige Änderung der Kamerakonstante c für weit entfernte Objekte gegen Null (Walser 2004).

Befindet sich das Projektionszentrum im Ursprung des Tachymeters (Schnittpunkt der Steh-, Kippund Zielachse des Tachymeters) ist die Bestimmung polarer Winkel für Objektpunkte *P* unabhängig von deren Distanz. Fallen das Projektionszentrum und der Tachymeterursprung nicht zusammen, muss die Distanz des Objektpunktes *d* bekannt sein, um polare Winkel relativ zum Tachymeterursprung bestimmen zu können (Abb. 4.7).

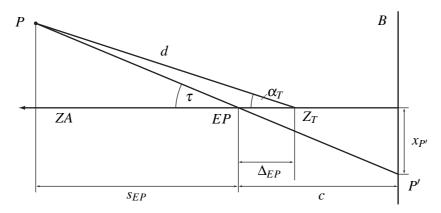


Abb. 4.7: Abstand zwischen Projektionszentrum und Stehachse des Tachymeters (nach Walser 2004)

Der Winkel τ ergibt sich aus der Kamerakonstante c und der Position P' des Objektpunktes auf der Bildebene B. Der Winkel α_T berechnet sich nach:

$$\tan \alpha_T = \frac{s_{EP}}{(s_{EP} + \Delta_{EP}) \cdot c} \cdot x_{P'} \tag{4.2}$$

Für konstante Werte von s_{EP} und Δ_{EP} kann der Winkel α_T auch über einen konstanten Faktor ξ in Abhängigkeit von τ angegeben werden. Der Faktor ξ ist abhängig von den Werten für s_{EP} und Δ_{EP} :

$$\alpha_T = \xi \cdot \tau = \xi \left(s_{EP}, \Delta_{EP} \right) \cdot \tau \tag{4.3}$$

Das Ziel der Kalibrierung ist es, einen Bezug zwischen dem Abbild eines Objektpunktes P auf der Bildebene B (Pixelkoordinaten des CCD-Sensors) und der Richtung zu diesem Objektpunkt (Horizontalrichtung und Vertikalwinkel) herzustellen. Der in der Photogrammetrie verwendete Ansatz zur Modellierung des Abbildungsprozesses sieht die Bestimmung des Bildhauptpunktes H, der Kamerakonstanten c und der Parameter der optischen Verzeichnung vor (u.a. Grün und Huang 2001). Für den sich ergebenden kleinen Abbildungsbereich und unter Berücksichtigung des optischen Designs des Tachymeterfernrohrs können die optischen Verzeichnungen auch durch eine lineare Funktion A korrigiert werden (nach Auskunft von Leica Geosystems). Ebenfalls lassen sich durch die lineare Funktion eine durch die Montage der Okularkamera bedingte Verdrehung und Verkippung des CCD-Sensors sowie eine unterschiedliche Skalierung der Pixelgröße entlang der Sensorachsen berücksichtigen. Die Einflüsse können durch eine Affintransformation ohne Translation modelliert werden:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_{x} & 0 \\ 0 & \mu_{y} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & \lambda \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa \\ \sin \kappa & \cos \kappa \end{pmatrix}$$
(4.4)

 μ_x , μ_y Skalierungsfaktoren in beiden Sensorachsenrichtungen

λ Scherfaktor

κ Rotation des CCD-Sensors orthogonal zur Sensorebene

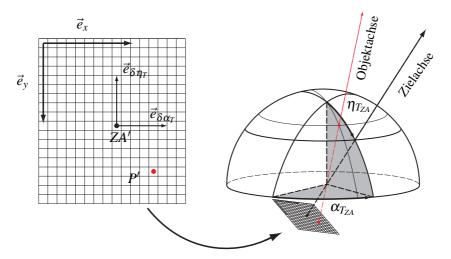


Abb. 4.8: Transformation zwischen dem Abbild des Objekts auf dem CCD-Sensor und der Richtung zum Objekt (nach Guillaume und Bürki 2008)

Wird aufgrund des maximalen Abbildungsbereichs von 1,2 gon zudem die Zentralprojektion ebenfalls durch eine lineare Funktion ersetzt, ist die Transformation A unabhängig von der Lage des Bildhauptpunktes (Walser 2004).

Für eine konstante Objektentfernung und, hierdurch bedingt, ein stabiles optisches System und eine stabile Lage des Projektionszentrums, können nachfolgende Festlegungen getroffen werden. Das Koordinatensystem des CCD-Sensors ist wie folgt definiert (Abb. 4.8): Das Pixel in der oberen linken Ecke des CCD-Sensors stellt den Koordinatenursprung dar. Die Koordinatenachsen \vec{e}_x und \vec{e}_y stehen orthogonal zueinander und verlaufen parallel zum Sensorrand. Das Abbild der Zielachse des Tachymeters ZA schneidet die CCD-Sensorebene im Punkt ZA'. Seine Horizontalrichtung α_{TZA} und sein Vertikalwinkel η_{TZA} im System des Tachymeters entsprechen den an den Teilkreisen abgelesenen und um die Achsenabweichungen korrigierten Werten. Der Punkt ZA' legt den Ursprung des Hilfskoordinatensystems zur Bestimmung der Richtungsdifferenzen ($\delta\alpha_T$, $\delta\eta_T$) zwischen der Zielachse des Tachymeters und der Richtung zum Objektpunkt P fest. Die Achsen $\vec{e}_{\delta\eta_T}$ und $\vec{e}_{\delta\alpha_T}$ stellen die durch Zentralprojektion in die Ebene des CCD-Sensors projizierten Tangenten an die Zielachse, in Richtung des Vertikalteilkreises und in eine Parallelebene des Horizontalteilkreises dar.

Die Beziehung zwischen dem Koordinatensystem des CCD-Sensors (\vec{e}_x, \vec{e}_y) und dem Hilfskoordinatensystem $(\vec{e}_{\delta\eta_T}, \vec{e}_{\delta\alpha_T})$ kann durch eine Affintransformation beschrieben werden:

$$\alpha_{T_P} = \alpha_{T_{ZA}} \underbrace{-\arctan\left(\frac{1}{\sin\eta_{T_{ZA}}} \cdot \tan\left(a_{11} \cdot (x_{P'} - x_{ZA'}) + a_{12} \cdot (y_{P'} - y_{ZA'})\right)\right)}_{\delta\alpha_T}$$
(4.5)

$$\eta_{T_P} = \eta_{T_{ZA}} \underbrace{-a_{21} \cdot (x_{P'} - x_{ZA'}) - a_{22} \cdot (y_{P'} - y_{ZA'})}_{\delta \eta_T} \tag{4.6}$$

$lpha_{T_P},\eta_{T_P}$	Horizontalrichtung und Vertikalwinkel des Objektpunktes P	
	im System des Tachymeters	
$x_{P'}, y_{P'}$	Bildkoordinate des Objektpunktes P	
$lpha_{T_{ZA}},\eta_{T_{ZA}}$	Horizontalrichtung und Vertikalwinkel der Zielachse im	
	System des Tachymeters	
$x_{ZA'}, y_{ZA'}$	Bildkoordinate des Punktes ZA'	
$a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$	Rotations- und Maßstabsparameter der Affintransformation	

Der Faktor

$$\arctan\left(\frac{1}{\sin\eta_{T_{ZA}}}\cdot\tan\left(\ldots\right)\right)$$

in Gleichung 4.5 reduziert die Richtungsdifferenz zwischen den Punkten ZA' und P' in Richtung von $\vec{e}_{\delta\alpha_T}$ auf die Horizontalkreisebene (vgl. Gl. 2.30).

Es ist zu beachten, dass sich die Maßstabsparameter a_{11} und a_{22} der Affintransformation aus drei Anteilen zusammensetzen:

- Einem konstanten Anteil μ zur Korrektur der optischen Verzeichnungen, der Verkippung des Sensors und der unterschiedlichen Skalierungen der Pixelgrößen entlang der Sensorachsen,
- einem von der Kamerakonstante c abhängigen Anteil ψ zur Transformation von Pixelkoordinatendifferenzen in Richtungsdifferenzen und
- einem von s_{EP} und Δ_{EP} abhängigen Anteil ξ zur Korrektur einer Exzentrizität des Projektionszentrums vom Tachymeterursprung.

$$a_{11} = \mu_x + \psi(c) + \xi(s_{EP}, \Delta_{EP}), \qquad a_{22} = \mu_y + \psi(c) + \xi(s_{EP}, \Delta_{EP})$$
 (4.7)

Um für eine konstante Objektentfernung und ein stabiles optisches System mit Hilfe der Gleichungen 4.5 und 4.6 aus den Pixelkoordinaten eines Objektpunktes Richtungen zu diesem zu berechnen, müssen die Transformationsparameter $x_{ZA'}$, $y_{ZA'}$ und a_{11}, \ldots, a_{22} bestimmt werden. Dies kann durch die Verwendung von Referenzpunkten geschehen, welche in beiden Systemen bekannt sind. Da bei der verwendeten Konstruktion das Strichkreuz jedoch nicht auf dem CCD-Sensor abgebildet wird, kann der Punkt ZA' nicht direkt beobachtet werden. Die Bestimmung der Transformationsparameter muss daher in zwei Schritten erfolgen. Im ersten Schritt wird der Punkt ZA' durch Messungen in zwei Fernrohrlagen bestimmt. Anschließend können die Parameter a_{11}, \ldots, a_{22} der Affintransformation geschätzt werden. Beide Rechenschritte beruhen jedoch auf den gleichen Messungen der Referenzpunkte.

Der Punkt ZA' kann durch Messungen zu Zielpunkten in den beiden Fernrohrlagen des Tachymeters bestimmt werden. Ausgehend von einer Parallelität der Zielachse in Fernrohrlage I und II verteilen sich die Bildkoordinaten der in beiden Lagen gemessenen Zielpunkte symmetrisch um den Punkt ZA'. D.h. der Punkt ZA' bildet den Mittelpunkt der Strecke zwischen zwei zusammengehörenden

Bildpunkten. Unter Verwendung eines definierten Zielpunktes lässt sich die Bestimmung von Koordinatenpaaren für verschiedene Positionen des Fernrohrs durchführen. Werden die Bildkoordinaten der Zielpunkte für n verschiedene Fernrohrpositionen (im Folgenden mit dem Index i bezeichnet) in jeweils beiden Fernrohrlagen bestimmt, können n Koordinaten des Punktes ZA' berechnet werden:

$$x_{ZA'_{i}} = \frac{x_{P'_{i}}^{I} + x_{P'_{i}}^{II}}{2}, \qquad y_{ZA'_{i}} = \frac{y_{P'_{i}}^{I} + y_{P'_{i}}^{II}}{2}$$

$$(4.8)$$

Geht man davon aus, dass die berechneten Koordinaten $x_{ZA'_i}$ und $y_{ZA'_i}$ normalverteilt und voneinander unabhängig sind, ergibt sich die Koordinate des gesuchten Punktes ZA' ($\hat{x}_{ZA'}$, $\hat{y}_{ZA'}$) nach:

$$\hat{x}_{ZA'} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} x_{ZA'_i}, \qquad \hat{y}_{ZA'} = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} y_{ZA'_i}$$
(4.9)

Anschließend lassen sich die Parameter der Affintransformation durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmen. Um linearisierte Beobachtungsgleichungen zu erhalten, wird der in Gleichung 4.5 enthaltene Faktor zur Reduktion der Richtungsdifferenz auf die Horizontalkreisebene näherungsweise durch $\frac{1}{\sin\eta_{T_{ZA}}}$ ersetzt (vgl. Kap. 2.5.1). Liegen Beobachtungen zu einem Zielpunkt für unterschiedliche Fernrohrpositionen (idealerweise verteilt nach einem Gittermuster) in jeweils beiden Fernrohrlagen vor, so ergeben sich die linearisierten Beobachtungsgleichungen mit den Verbesserungen $\nu_{\alpha_{T_{ZA}}}$ und $\nu_{\eta_{T_{ZA}}}$ zu:

$$\alpha_{T_{ZA_i}} + \nu_{\alpha_{T_{ZA_i}}} = \alpha_{T_P} + \frac{1}{\sin \eta_{T_{ZA_i}}} \cdot \left(a_{11} \cdot \left(x_{P_i'} - \hat{x}_{ZA'} \right) + a_{12} \cdot \left(y_{P_i'} - \hat{y}_{ZA'} \right) \right)$$
(4.10)

$$\eta_{T_{ZA_i}} + \nu_{\eta_{T_{ZA_i}}} = \eta_{T_P} + a_{21} \cdot \left(x_{P_i'} - \hat{x}_{ZA'} \right) + a_{22} \cdot \left(y_{P_i'} - \hat{y}_{ZA'} \right)$$
(4.11)

Durch die Berechnung des Punktes ZA' nach Gleichung 4.8 ist dessen zugehörige Horizontalrichtung und dessen zugehöriger Vertikalwinkel (Zielachse) frei von einer Zielachsenabweichung bzw. Höhenindexabweichung. Dies gilt jedoch nur, wenn die Messungen exakt in erster und zweiter Fernrohrlage durchgeführt wurden. Die Stehachsenneigung ist daher während der gesamten Kalibrierungsmessungen zu überwachen und eine evtl. Stehachsenneigungsänderung als Korrektur an die Messwerte anzubringen. Da in Gleichung 4.10 eine Näherung verwendet wird, sollten die Kalibrierungsmessungen in annähernd horizontaler Fernrohrlage erfasst werden. Zu beachten ist, dass die ermittelten Transformationsparameter der Affintransformation nur Gültigkeit für den Sensorbereich besitzen, in dem Referenzpunkte gemessen wurden. Da in der Praxis meist nur Referenzpunkte in einem bestimmten Bereich um den Bildmittelpunkt gemessen werden, sind Transformationen am Rand des CCD-Sensors mit den größten Abweichungen behaftet. Bei Verwendung der divergenten Linse ist, bedingt durch die geringfügige Ablenkung des Zielstrahls, eine erneute Kalibrierung durchzuführen.

Um das in den Gleichungen 4.5 und 4.6 formulierte Abbildungsmodell auf den allgemeinen Fall beliebiger Objektentfernungen und hierdurch bedingt, ein sich veränderndes optisches System, auszuweiten, muss dieses um zusätzliche Parameter erweitert werden.

Für die Parameter variabler Linsensysteme besteht durch das Design meist eine nahezu direkte Korrespondenz zwischen dem Linsenkontrollparameter (z.B. Fokus) und den spezifischen Eigenschaften des Abbildungsprozesses des Linsensystems (Fokussierte Distanz oder Abbildungsmaßstab). Diese Korrespondenz kann als Basis für Modelle von Systemen verwendet werden, welche nur einen Kontrollparameter verwenden (Willson und Shafer 2001). Im vorliegenden System stellt die Position p des Schrittmotors zur Positionierung der Fokussierlinse den Linsenkontrollparameter dar. Wie in Gleichung 4.7 dargestellt, können die Parameter a_{11} und a_{22} als Funktion der Kamerakonstante c, der Objektentfernung s_{EP} und der Exzentrizität des Projektionszentrums Δ_{EP} dargestellt werden. Diese drei Parameter lassen sich jedoch wiederum als Funktionen der Position der Fokussierlinse und somit der Position des Schrittmotors p darstellen. So lässt sich sowohl der Anteil p0 als auch der Anteil p1 durch eine quadratische Funktion von p2 ausdrücken:

$$a_{11}(p) = a_{11(0)} + a_{11(1)} \cdot p + a_{11(2)} \cdot p^2, \qquad a_{22}(p) = a_{22(0)} + a_{22(1)} \cdot p + a_{22(2)} \cdot p^2$$
 (4.12)

Hierbei ist aufgrund des optischen Designs bei konstanter Exzentrizität Δ_{EP} eine Änderung der Position p direkt proportional zu einer Änderung des Anteils ξ . Dies bedeutet, dass die Genauigkeit, mit der der Anteil ξ bestimmt werden kann, nicht abhängig ist vom jeweiligen Entfernungsbereich, sondern nur von der Genauigkeit, mit der die Position p der optimalen Fokussierung bestimmt werden kann. Abbildung 4.9 zeigt die sich aus acht Messreihen ergebenden Parameter a_{11} und a_{22} in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse (Schrittmotor). Die Parameter konnten mit einer mittleren Standardabweichung einer Einzelbeobachtung von $0,0007 \cdot 10^{-3}$ bestimmt werden.

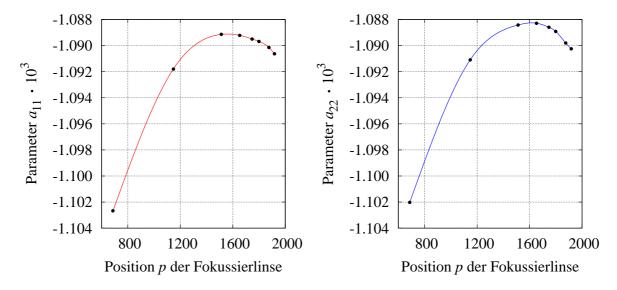


Abb. 4.9: Parameter a_{11} und a_{22} in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse

4.3 Kalibrierung 107

Die von der Kamerakonstanten c abhängige Position des Punktes ZA' kann ebenso über eine Polynomfunktion zweiten Grades von p angeben werden:

$$x_{ZA'}(p) = b_{x(0)} + b_{x(1)} \cdot p + b_{x(2)} \cdot p^2, \qquad y_{ZA'}(p) = b_{y(0)} + b_{y(1)} \cdot p + b_{y(2)} \cdot p^2$$

$$(4.13)$$

Bedingt durch des optischen Designs und die geringe Positionsänderung des Punktes ZA' bei einer Umfokussierung (ca. 2 Px über den gesamten Fokussierbereich) können die Koeffizienten $b_{x(2)}$ und $b_{y(2)}$ jedoch vernachlässigt werden ($b_{x(2)} = b_{y(2)} = 0$). Abbildung 4.10 zeigt die sich aus acht Messreihen ergebenden Koordinaten des Punktes ZA in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse (Schrittmotor). Die mittlere Standardabweichung einer einzelnen Koordinatenbestimmung betrug 0,11 Pixel.

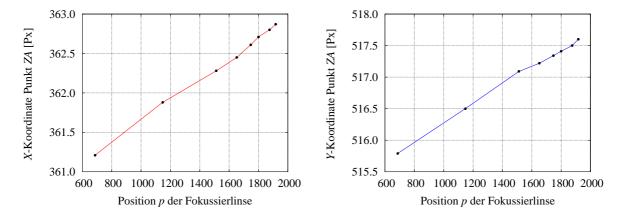


Abb. 4.10: Koordinaten des Punktes ZA in Abhängigkeit von der Position der Fokussierlinse

Hierbei ist anzumerken, dass eine Positionsänderung des Punktes ZA' auch durch eine Abweichung von der Parallelität zwischen Hauptstrahl und Bewegungsachse der Fokussierlinse hervorgerufen werden kann. Anhand der Messwerte lässt sich nicht eindeutig auf die Ursache der Positionsänderung schließen. Jedoch kann auch eine Kalibrierung dieser Abweichung in der angegebenen Weise erfolgen.

Das Abbildungsmodell für den allgemeinen Fall ergibt sich durch Einsetzen der Gleichungen 4.12 und 4.13 in die Gleichungen 4.5 und 4.6.

$$\alpha_{T_{P}} = \alpha_{T_{ZA}} - \arctan\left(\frac{1}{\sin\eta_{T_{ZA}}} \cdot \tan\left(a_{11}(p) \cdot (x_{P'} - x_{ZA'}(p)) + a_{12} \cdot (y_{P'} - y_{ZA'}(p))\right)\right)$$
(4.14)

$$\eta_{T_P} = \eta_{T_{ZA}} - a_{21} \cdot (x_{P'} - x_{ZA'}(p)) - a_{22}(p) \cdot (y_{P'} - y_{ZA'}(p)) \tag{4.15}$$

Die Kalibrierung der Okularkamera wird für diskrete Zielweiten (und Positionen p) wie bereits beschrieben nach den Gleichungen 4.9, 4.10 und 4.11 durchgeführt. Die Parameter $a_{11(0)}$, $a_{11(1)}$, $a_{11(2)}$, $a_{22(0)}$, $a_{22(1)}$, $a_{22(2)}$, $b_{x(0)}$, $b_{x(1)}$, $b_{y(0)}$ und $b_{y(1)}$ ergeben sich durch eine anschließende Ausgleichung nach den Gleichungen 4.12 und 4.13. Im Anschluss an die Kalibrierung des CCD-Sensors erfolgt die Bestimmung der Kippachsen- und Stehachsenneigung (Kap. 3.3.2 und 3.3.3).

4.4 Verfahren zur Bildauswertung und Punktbestimmung

Nach der Orientierung des Kamerabildes kann über die Gleichungen 4.5 und 4.6 die Horizontalrichtung und der Vertikalwinkel des Zielpunktes bestimmt werden. Hierzu werden dessen Bildkoordinaten (in Subpixelgenauigkeit) benötigt. Die Identifizierung des Zielpunktes im Bild und die
Bestimmung seiner Koordinaten kann dabei manuell, schrittweise automatisiert oder automatisch
erfolgen. Hierfür werden Bildverarbeitungstechniken aus den Gebieten der Photogrammetrie und
der Computer Vision (CV) verwendet.

In dieser Arbeit wurden drei Verfahren zur Bestimmung der Bildkoordinaten des Zielpunktes angewandt. Das einfachste Verfahren stellt die manuelle Anzielung des Zielpunktes in einem vergrößerten Bildausschnitt dar.

Für kreisförmige Zielpunkte, welche sich durch einen Helligkeitsunterschied von ihrem Hintergrund unterscheiden (Lichtpunkte oder kreisförmige Zielmarken), wurde ein Ellipsenoperator eingesetzt. In einem ersten Schritt werden Punkte auf dem Rand der Zielmarke identifiziert, über welche in einem zweiten Schritt die Parameter einer bestangepassten Ellipse berechnet werden. Die Zielpunktkoordinaten entsprechen dem Ellipsenmittelpunkt.

Das Bildzuordnungsverfahren (engl. Template Matching) nach der Methode der kleinsten Quadrate (engl. Least Square Matching (LSM)) wurde zur Identifizierung und Bestimmung der Position eines bekannten Referenzmusters (engl. Template) im Bild eingesetzt. Die verwendeten Verfahren werden in diesem Kapitel näher erläutert.

Bei der programmtechnischen Umsetzung kommen für Standardbildverarbeitungsroutinen die Bibliotheken IPL und OpenCV zum Einsatz. Die Open Source Computer Vision Library (OpenCV) ist eine frei verfügbare Sammlung von C/C++-Algorithmen für unterschiedliche Problemstellungen im Bereich der Computer Vision (Intel Corporation 2001). OpenCV wurde erstmals im Jahr 2000 von der Firma Intel Corporation als Nachfolger der Image Processing Library (IPL) veröffentlicht. In der derzeit aktuellen Version OpenCV 1.1 pre-release (10/2008) stehen dem Anwender eine Vielzahl an Datentypen mit entsprechenden Funktionalitäten und zahlreiche Funktionen der Bildbearbeitung sowie zur Bild- und Strukturanalyse auf höchster Ebene zur Verfügung (Bradski und Kaehler 2008).

4.4.1 Manuelle Punktanzielung im Bild

Bei der manuellen Punktanzielung wird mit dem Mauszeiger die Position des Zielpunktes im Bild bestimmt. Die entsprechende OpenCV Funktion zur Positionsbestimmung des Zeigers liefert als Rückgabewert jedoch nur ganzzahlige (engl. integer) Bildkoordinaten. Um das Zentrum des Zielpunktes genauer identifizieren zu können wird daher in einem ersten Schritt der Bildausschnitt um

den Zielpunkt um den Faktor *m* vergrößert. Das Vorgehen erfolgt hierbei in zwei Schritten: die Transformation der Pixelkoordinaten und die Interpolation der Grauwerte (Grauwertinterpolation, engl.: Resampling).

Die geometrische Transformation T bildet jedes Pixel (x,y) des Eingabebildes auf die neue Position (x',y') im Ausgabebild ab:

$$(x',y') = T(x,y) \tag{4.16}$$

Für die Vergrößerung ergibt sich die einfache Abbildungsgleichung (Nischwitz u. a. 2007):

$$(x', y') = m(x, y)$$
 (4.17)

Zur Bestimmung der Grauwerte im Ausgabebild wird die geometrische Transformationsvorschrift umgekehrt. Es wird, von den ganzzahligen Pixelpositionen des Ausgabebildes ausgehend, der zugehörige Grauwert des Eingabebildes bestimmt. Die indirekte geometrische Transformation lautet:

$$(x,y) = T^{-1}(x',y')$$
(4.18)

Die berechneten Positionen der Bildelemente im Eingabebild sind mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Integerwerte und die zugehörigen Intensitätswerte können nicht direkt übernommen werden. Es ist demzufolge notwendig, die Grauwerte für die Pixelpositionen zwischen den Integerwerten zu berechnen (interpolieren). Von den zahlreichen in der Praxis angewandten Verfahren zur Interpolation eines Grauwertes aus der ihn umgebenden Nachbarschaft wird hier die bikubische Interpolation (auch bikubische Faltung, Lagrangepolynome) verwendet. Dieses Interpolationsverfahren liefert das visuell beste Ergebnis und findet bei geometrischen Transformationen mit höchster Grauwertqualität Anwendung (Luhmann 2003). Es bezieht eine 4×4 -Umgebung um die berechnete Position in die Grauwertinterpolation ein. Die Rechenvorschrift zur Bestimmung der Grauwerte g' an der Stelle (x',y') zwischen den Bildelementen (i,j), (i,j+1), (i+1,j) und (i+1,j+1) lautet (nach u.a. Luhmann 2003):

$$g' = a(1) \cdot df(dy+1) + a(2) \cdot df(dy) + a(3) \cdot df(dy-1) + a(4) \cdot df(dy-2)$$
(4.19)

mit

$$df(x) = |x|^3 - 2|x|^2 + 1$$

$$df(x) = -|x|^3 + 5|x|^2 - 8|x| + 4$$

$$df(x) = 0$$
für $|x| < 1$,
für $1 \le |x| < 2$,
sonst

$$a(n) = g(i-1, j+n-2) \cdot df(dx+1) + g(i, j+n-2) \cdot df(dx) + g(i+1, j+n-2) \cdot df(dx-1) + g(i+2, j+n-2) \cdot df(dx-2)$$

sowie einer ersten und zweiten Nachbarschaft mit $n = 1 \dots 4$.

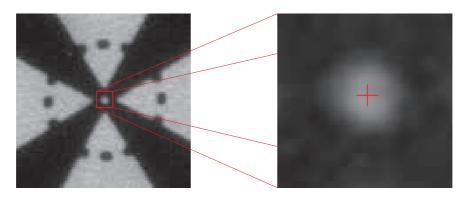


Abb. 4.11: Vergrößerung des Bildausschnitts mit Interpolation der Grauwerte und manuelle Anzielung des Zielpunktes

Die zur Berechnung der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels des Zielpunktes benötigten Bildkoordinaten (x,y) ergeben sich nach Gleichung 4.18 aus den mit dem Mauszeiger im vergrößerten Bildausschnitt bestimmten (ganzzahligen) Bildkoordinaten (x',y') (Abb. 4.11). Für den Vergrößerungsfaktor wird sinnvollerweise maximal m=10 gewählt, da die sich so ergebende Auflösung von 0,1 Px einem Winkel von 0,13 mgon entspricht. Eine stärkere Vergrößerung ist zudem visuell nicht mehr auflösbar.

4.4.2 Messung punktförmiger Muster

Werden als Zielpunkte kreisförmige Klebemarken oder Lichtpunkte eingesetzt, müssen die Bild-koordinaten derer Zentren mit Subpixelauflösung bestimmt werden. Das Vorgehen teilt sich in drei Schritte auf: die Bestimmung von Näherungswerten, die Detektion von Punkten auf dem Randbereich des Musters und die Anpassung einer Ellipse an die gefundenen Punkte.

Näherungswerte

Näherungswerte dienen dazu, die in einem weiteren Schritt eingehender untersuchten Bildbereiche zu begrenzen. Neben der manuellen Bestimmung durch grobes Einstellen mit dem Cursor am Bildschirm werden auch automatisierte Verfahren zur Bestimmung von Kandidaten für mögliche Zielpunkte eingesetzt. Um die automatische Beschaffung von Näherungswerten zu vereinfachen, wurde bei der Signalisierung der Ziele darauf geachtet, dass im Bild weitgehend nur noch (helle) Objektpunkte auf homogenem (dunklen) Hintergrund auftraten.

In einem ersten Schritt erfolgt eine Binärisierung (Segmentierung) des Bildes durch eine Schwellwertoperation. Diese dient der Trennung von Grauwerten, welche dem Zielpunkt zuzuordnen sind, vom Hintergrund. Bei günstiger Punktsignalisierung verfügt das zugehörige Histogramm über zwei ausgeprägte Maxima, welche durch ein Minimum getrennt werden. Die Trennung des Zielpunktes

vom Hintergrund erfolgt durch einen Schwellwert T, der im Bereich des Minimums zwischen den beiden Maxima mit deren mittleren Grauwerten m_1 und m_2 liegt, mit der Festlegung:

$$T = \frac{m_1 + m_2}{2} \tag{4.20}$$

Das Binärbild ergibt sich durch die Anwendung einer Lookup-Tabelle mit den Werten:

$$LUT(g) = \begin{cases} 0 & \text{für } g \leq T \\ 255 & \text{für } g > T \end{cases}$$

$$(4.21)$$

Die Schwellwertbildung verläuft bei mit Klebemarken signalisierten Zielpunkten relativ zuverlässig. Werden retroreflektierende Marken oder LED-Zielmarken verwendet, bilden sich diese im oberen Grauwertbereich des Histogramms ab. Liefert die Binärisierung nicht direkt zufriedenstellende Ergebnisse, muss der Schwellwert T schrittweise erhöht werden. Weitere Segmentierungsverfahren finden sich u.a. bei Lipprandt (2008).

Zusammenhängende Bereiche werden anschließend im Binärbild durch eine Nachbarschafts- oder Konnektivitätsanalyse (Clusterbildung) detektiert (Maas 1992, Niederöst und Maas 1996). Die gefundenen zusammenhängenden Bereiche werden mit ihren Parametern in einer Matrix dargestellt und können hinsichtlich Form und Fläche untersucht werden. Eine geeignete Testgröße zur Identifizierung von potentiellen (kreisförmigen) Zielmarken ist der Formfaktor f_E (Ahn 1997):

$$f_E = \frac{U^2}{4\pi A} \tag{4.22}$$

U Umfang

A Fläche

Für einen Kreis ergibt sich ein Wert von $f_E = 1$ und ein größerer Wert für alle anderen Objekte. Erfolgt die Aufnahme der Zielmarke nicht orthogonal, bildet sich diese als Ellipse ab. Ein Wert von $f_E = 1, 2 \dots 1, 5$ hat sich bei der Auswertung als Schwellwert gut geeignet. Als Näherungswert für die weitere Analyse wird der Schwerpunkt des zusammenhängenden Bereichs mit dem kleinsten Formfaktor f_E verwendet (Abb. 4.12). Liegt der Formfaktor für alle Bereiche über dem Schwellwert schlägt die automatische Näherungswertbestimmung fehl und muss manuell erfolgen.

Alternativ zum dargestellten Verfahren können Näherungswerte durch die Verwendung von Interest-Operatoren (besonders des Förstner-Operators) bestimmt werden (Förstner und Gülch 1987).

Bestimmung der Kantenpunkte (Ellipsenrand)

Zur weiteren Bearbeitung wird nur der Bildausschnitt um den Zielpunkt verwendet. Die Position und Größe des Bildausschnitts ergibt sich aus den Näherungswerten und den Parametern der Clusterbildung. Die besten Ergebnisse bei der Koordinatenbestimmung der Zielmarke bzw. des Lichtpunktes werden erzielt, wenn diese im Bild einen relativ kleinen Durchmesser von ca. 5 bis 20 Pixel besitzen.



Abb. 4.12: Zur Näherungswertbestimmung erfolgt in einem ersten Schritt eine Binärisierung (Segmentierung) des Bildes durch eine Schwellwertoperation. Zusammenhängende Bereiche werden anschließend über eine Clusterbildung detektiert und der wahrscheinlichste Bereich anhand seines Formfaktors f_E bestimmt.

Bei dieser Größe liefert die anschließende Bestimmung der Randpunkte jedoch nur wenige (ganzzahlige) Pixel. Vor dem weiteren Vorgehen wird daher der Bildausschnitt mit dem Faktor m vergrößert ($m = 5 \dots 10$) und die Grauwerte über eine bikubische Interpolation neu berechnet.

Zur Bestimmung der Randpunkte wird der Canny-Algorithmus (Canny 1986) verwendet. Dieser Algorithmus ist in der digitalen Bildverarbeitung zur Kantendetektion weit verbreitet und zeichnet sich durch seine Robustheit aus. Als Ergebnis liefert der Canny-Algorithmus ein Binärbild, welches idealerweise nur noch die Kanten des Ausgangsbildes enthält.

In einem ersten Schritt erfolgt die Bestimmung der Gradienten in Richtung der x- und y-Achsen $(D_x \text{ und } D_y)$ und die Glättung des Bildrauschens. Hierzu wird die Bildfunktion s(x,y) mit den Richtungsableitungen der Gaußfunktion G(x,y) in x- und y-Richtung gefaltet:

$$D_{x}(x,y) = \frac{\partial}{\partial x} \left(G(x,y) \cdot s(x,y) \right), \qquad D_{y}(x,y) = \frac{\partial}{\partial y} \left(G(x,y) \cdot s(x,y) \right) \tag{4.23}$$

mit

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

Aus den berechneten Gradienten leitet sich sowohl der Betrag D(x,y) als auch die Richtung $\Phi(x,y)$ der Gradiente an der Stelle (x,y) ab, und ist somit auch ein Maß für die Intensität und Richtung der Kante:

$$D(x,y) = \sqrt{D_x(x,y)^2 + D_y(x,y)^2}$$
(4.24)

$$\Phi(x,y) = \arctan\left(\frac{D_y(x,y)}{D_x(x,y)}\right) \tag{4.25}$$

Aufgrund der maximal acht Nachbarn eines Pixels werden die Richtungen auf die vier möglichen Kantenrichtungen 0°, 45°, 90° und 135° gerundet. Durch eine Veränderung der Standardabweichung der Gaußfunktion kann der Algorithmus den Gegebenheiten des Bildausschnitts angepasst werden. Eine höhere Standardabweichung führt zu einer stärkeren Glättung und besseren Detektion durchgängiger Kanten auf Kosten der Lagegenauigkeit.

Um Kanten mit der Breite eines Pixels zu erhalten, sollen im folgenden Schritt einzig die Maxima entlang einer Kante erhalten bleiben (Non-Maxima-Supression). Hierfür wird der Gradientenbetrag D(x,y) jedes Pixels mit denjenigen seiner Nachbarn verglichen. Keines der benachbarten Pixel darf einen höheren Wert aufweisen wenn es nicht entlang der berechneten Kantenrichtung liegt. Trifft dies nicht zu wird der Grauwert auf Null gesetzt. Abschließend erfolgt die Differenzierung zwischen Linien, welche zu reellen Kanten zählen, und solchen, welche durch Bildrauschen entstanden sind (engl.: Hysteresis Thresholding) (Nixon und Aquado 2007).

Ellipsenausgleichung

Die Koordinaten sämtlicher Pixel des Bildausschnitts, deren Grauwert ungleich Null ist, werden in einer Matrix gespeichert. Anschließend werden diese gefundenen Kantenpunkte als Beobachtungen für eine Ellipsenausgleichung eingesetzt (Abb. 4.13). Eine ausführliche Darstellung des Algorithmus findet sich u.a. bei Luhmann (2003). Fehlerhaft detektierte Kantenpunkte lassen sich durch einen Ausreißertest eliminieren. Die Bestimmung der Ellipsenparameter sollte iterativ vorgenommen werden. Als Startwert für den Ellipsenmittelpunkt dient der Schwerpunkt der Kantenpunkte, als Startradius der mittlere Abstand zum Schwerpunkt. Das Verfahren konvergiert in der Regel sehr schnell. Die Iteration kann abgebrochen werden, wenn die Änderung des Mittelpunktes unter einen Schwellwert von 0,05 Pixel im Orginalmaßstab sinken. Das Zentrum des Zielpunktes ergibt sich aus den ermittelten Mittelpunktskoordinaten der Ellipse nach Rücktransformation in das ursprüngliche Bildkoordinatensystem nach Gleichung 4.18.

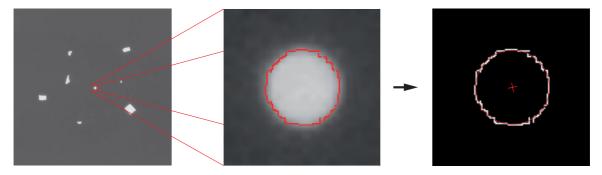


Abb. 4.13: Die Bestimmung des Zielpunktzentrums erfolgt über eine Ellipsenausgleichung. Als Beobachtungen werden die zuvor in einem vergrößerten Bildausschnitt bestimmten Kantenpunkte des Zielpunktes eingesetzt.

Wenn der zu bestimmende Zielpunkt eine symmetrische Verteilung seiner zugehörigen Grauwerte aufweist, kann sein Zentrum auch über dessen lokalen Grauwertschwerpunkt bestimmt werden. Dieser wird als gewichtetes Mittel der Pixelkoordinaten einer Umgebung bestimmt (Luhmann 2003). Bei der Verwendung von retroreflektierenden Zielmarken und Lichtpunkten kommt es jedoch häufig zu einer Plateaubildung der Grauwerte. D.h. mehrere zusammenhängende Pixel besitzen einen Grauwert von 255. Eine zuverlässige Bestimmung des Zentrums ist hier nicht mehr möglich.

4.4.3 Bildzuordnungsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares Matching, LSM)

Für Wiederholungsmessungen und zur Bestimmung relativer Positionsänderungen wird das Verfahren der Bildzuordnung nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Bei diesem Verfahren werden die Beziehungen zwischen den Grauwerten der Muster- und Suchmatrix als nichtlineare Verbesserungsgleichungen in einer vermittelten Ausgleichung formuliert (Ackermann 1984, Grün 1985, Bethel 1997, Luhmann 2003). Ziel ist es, die Parameter einer radiometrischen und geometrischen Transformation zu bestimmen. Als Ähnlichkeitsmaß gilt die Grauwertdifferenz. Das zu einem Suchmuster korrespondierende Grauwertmuster wird durch eine iterative Ausgleichung geschätzt, bei der die Summe der Quadrate der Grauwertunterschiede der Muster- und Suchmatrix minimiert wird. Die Grauwerte der beiden Bildausschnitte (engl.: Patches) gehen in die Ausgleichung als Beobachtungen ein. LSM ist eines der genauesten Bildzuordnungsverfahren (Ackermann 1984) und kann für kontrastreiche und flache Zielmarken eine Standardabweichung der Verschiebungsparameter von 0,01 bis 0,1 Pixel erreichen (Westfeld 2005). Im Rahmen der Ausgleichung lassen sich zudem Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaße ableiten. Zur Bestimmung der Transformationsparameter benötigt das Verfahren hinreichend genaue Näherungswerte für die gesuchte Bildposition.

Näherungswerte

Liegen die Näherungswerte nicht anderweitig vor, werden diese durch eine Kreuzkorrelation ermittelt. Dieses flächenbasierte Korrelationsverfahren bestimmt die Position der größten Übereinstimmung eines Referenzmusters in einem Suchbild. Als Ähnlichkeitsmaß zweier Bildausschnitte dient bei diesem Algorithmus der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient ρ . Ein Suchpatch wird sukzessive mäanderförmig über das Suchbild geschoben, der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient an jeder Verschiebeposition aus den Grauwerten des Referenzmusters und des jeweiligen Bildausschnittes des Suchbildes berechnet und mit den entsprechenden Bildkoordinaten gespeichert. Das Template der Größe $R \times C$ sei bezeichnet als g_1 mit seinen Grauwerten $g_1(r,c)$ und der dementsprechende Bildausschnitt des Suchbildes als g_2 . Der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient ρ ist definiert über:

$$\rho(t_{x},t_{y}) = \frac{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_{1}(r,c) - m_{g_{1}}) \cdot (g_{2}(r + t_{x}, c + t_{y}) - m_{g_{2}})}{\sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_{1}(r,c) - m_{g_{1}})^{2}} \cdot \sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_{2}(r + t_{x}, c + t_{y}) - m_{g_{2}})^{2}}}$$

$$(4.26)$$

 t_x Relative Translation in x

 t_{y} Relative Translation in y

Hierbei stehen m_{g_1} und m_{g_2} für die arithmetischen Mittelwerte der Grauwerte der Patches:

$$m_{g_1} = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_1(r, c), \qquad m_{g_2} = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_2(r + t_x, c + t_y)$$

Die Subtraktion des Grauwertmittels von allen Grauwerten innerhalb des Fensters macht den normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten unempfindlich bezüglich auftretender Helligkeitsunterschiede und der Term im Nenner kompensiert die Kontrastunterschiede der Patches. Der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient besitzt einen Wertebereich von -1 bis 1. Ein Wert von Null lässt auf keinerlei Ähnlichkeit zwischen den Grauwerten der Bildausschnitte schließen, wohingegen vollkommen identische Patches den Wert 1 aufweisen.

Als Ergebnis des Matchings erhält man eine Matrix von normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten. Die Stelle der maximalen Korrelation liefert die Näherungswerte der Position des Referenzmusters im Suchbild für das folgende LSM. Da bei diesem Verfahren lediglich die Translation, nicht aber der Maßstab, die Rotation, sowie andere Verzerrungen modelliert werden, können evtl. falsche Ergebnisse auftreten. Eine Abschätzung der Güte der Ergebnisse kann über den Mittelwert und die Standardabweichung der berechneten normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten erfolgen.

Alternativ zur Methode der Kreuzkorrelation kann eine Bildzuordnung zur Bestimmung von Näherungswerten auch über einen Vergleich der normierten Histogramme der Patches erfolgen (Swain und Ballard 1991).

Radiometrische Anpassung

Zur genauen Bestimmung der Parameter der geometrischen Transformation ist die Korrektur von Helligkeits- und Kontrastunterschieden zwischen den zwei entsprechenden Bildausschnitten notwendig. Die zwei Parameter dieser radiometrischen Anpassung, der additive Faktor der Helligkeits- und der multiplikative Faktor der Kontrastkorrektur, werden entweder im Rahmen des Ausgleichungsmodells oder vor der eigentlichen Ausgleichung bei jedem Iterationsschritt bestimmt. Der Vorteil der hier angewandten zweiten Variante liegt in der Unabhängigkeit der Bestimmungder geometrischen

Transformationsparameter von radiometrischen Einflüssen. Zur Berechnung der radiometrisch korrigierten Grauwerte wird hier eine Korrektur um den Offset der Mittelwerte sowie den Quotienten der Standardabweichungen angewendet (Westfeld 2005).

In einem ersten Schritt werden die einfachen arithmetischen Grauwertmittel m_{g_1} und m_{g_2} bestimmt und anschließend die Differenz der Mittelwerte Δm berechnet:

$$m_{g_1} = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_1(r, c), \qquad m_{g_2} = \frac{1}{R \cdot C} \sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} g_2(r, c)$$
 (4.27)

$$\Delta m = m_{g_1} - m_{g_2} \tag{4.28}$$

Anschließend werden die Standardabweichungen der Grauwerte des Muster- und Suchpatches s_{g_1} und s_{g_2} sowie deren Quotient γ bestimmt:

$$s_{g_1} = \sqrt{\frac{1}{R \cdot C - 1} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g_1(r, c) - m_{g_1})^2}, \quad s_{g_2} = \sqrt{\frac{1}{R \cdot C - 1} \sum_{x=0}^{R-1} \sum_{y=0}^{C-1} (g_2(r, c) - m_{g_2})^2}$$
(4.29)

$$\gamma = \frac{s_{g_1}}{s_{g_2}} \tag{4.30}$$

Hieraus berechnen sich die korrigierten Grauwerte des Suchpatches $g'_2(r,c)$ zu:

$$g_{2}'(r,c) = \begin{cases} \Delta m + m_{g_{2}} + (g_{2}(r,c) - m_{g_{2}}) \cdot \gamma & \text{für } 0 \leqslant g_{2}' \leqslant 255\\ 255 & \text{für } g_{2}' > 255\\ 0 & \text{für } g_{2}' < 0 \end{cases}$$

$$(4.31)$$

Geometrische Transformation

Für genügend kleine Bildausschnitte kann die geometrische Transformation durch eine ebene Affintransformation beschrieben werden. Die sechs Parameter der affinen Transformation erlauben die Berücksichtigung von relativen Translationen in x- und y-Richtung (a_{01} , a_{02}), Maßstabsänderungen in beiden Koordinatenrichtungen (a_{11} , a_{22}), sowie des Dreh- und Scherungswinkels zwischen den Koordinatenachsen (a_{12} , a_{21}).

Das Template der Größe $R \times C$ sei wiederum bezeichnet als g_1 mit seinen Grauwerten $g_1(r,c)$. Der anhand der Näherungswerte bestimmte und um die Helligkeits- und Kontrastunterschiede korrigierte entsprechende Ausschnitt des Suchbildes sei als g_2' bezeichnet. Die Beobachtungsgleichungen der Affintransformation lauten somit $(i = 1 \dots R \times C)$:

$$g_{1_i}(r,c) - v_i(r,c) = g'_{2_i}(r',c')$$
 (4.32)

mit

$$r' = a_{10} + a_{11} \cdot r + a_{12} \cdot c$$

$$c' = a_{20} + a_{21} \cdot r + a_{22} \cdot c$$

Hierbei bezeichnet $v_i(r,c)$ die Grauwertverbesserung an der Stelle (r,c). Von besonderem Interesse sind hier die beiden Translationsparameter a_{10} und a_{20} , welche die relativen Verschiebungen zwischen dem Referenzmuster und dem Ausschnitt des Suchbildes angeben. Die zugehörigen Grauwerte für nicht-ganzzahlige Werte der Koordinaten r' und c' werden durch bikubische Interpolation bestimmt (Kap. 4.4.1). Die Linearisierung der Gleichung 4.32 nach Taylor, bedingt durch die Nichtlinearität der Bildfunktion g'_2 führt zu (ohne Index i):

$$g_{1}(r,c) - v(r,c) = g_{2}^{\prime 0}(r,c) + g_{2_{r}}^{\prime} \cdot da_{10} + g_{2_{r}}^{\prime} \cdot r \cdot da_{11} + g_{2_{r}}^{\prime} \cdot c \cdot da_{12} + g_{2_{c}}^{\prime} \cdot da_{20} + g_{2_{c}}^{\prime} \cdot r \cdot da_{21} + g_{2_{c}}^{\prime} \cdot c \cdot da_{22}$$

$$(4.33)$$

mit

$$g'_{2_r} = \frac{\partial g'_2{}^0(r',c')}{\partial r'}, \qquad g'_{2_c} = \frac{\partial g'_2{}^0(r',c')}{\partial c'}$$

Die ausführliche Beschreibung des Modellansatzes und die Herleitung der Gleichungen finden sich bei Grün (1985; 1996).

Neben den im vorhergehenden Schritt bestimmten Näherungswerten für die Position des Bildausschnittes des Suchbildes werden folgende Startwerte für die Parameter der Affintransformation verwendet:

$$a_{10}^{\ 0} = a_{20}^{\ 0} = a_{12}^{\ 0} = a_{21}^{\ 0} = 0, \qquad a_{11}^{\ 0} = a_{22}^{\ 0} = 1$$

Die geometrischen Unbekannten werden im Rahmen der Ausgleichung im Gauß-Markov-Modell (GMM) geschätzt. Im Allgemeinen können alle Beobachtungen als gleich gewichtig betrachtet werden. Die Ausgleichung muss iterativ durchgeführt werden. Nach jedem Iterationsschritt erfolgen eine erneute radiometrische Anpassung und die Interpolation der Grauwerte. Die Iteration kann abgebrochen werden, wenn die Parameterdifferenzen der Transformation einen bestimmten Schwellwert unterschreiten oder die maximale Anzahl an Iterationen erreicht ist. Bedingung für die Konvergenz des Algorithmus ist, neben der Notwendigkeit von Textur und Gradienten in beiden Bildrichtungen, die Bereitstellung genügend genauer Näherungswerte für die korrespondierende Position des Template im Suchbild. Sie dürfen nicht weiter als die halbe Patchgröße von der wahren Lösung entfernt sein. Während der Berechnung ist zu prüfen, ob die Parameter signifikant schätzbar sind. Gegebenenfalls muss das gewählte Transformationsmodell reduziert werden (Luhmann 2003). Durch geeignete statistische Tests können nichtsignifikante Parameter mit hohen Korrelationskoeffizienten detektiert und im nächsten Iterationsschritt ausgeschlossen werden (Maas 1997).

4.5 Stabilitätsuntersuchungen

Das Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Stabilitätsuntersuchungen ist es herauszufinden, ob das System, bestehend aus Tachymeter, Neigungssensor und Okularkamera, unter konstanten äußeren Bedingungen über einen längeren Zeitraum stabile Messwerte liefern kann. Darüber hinaus soll

untersucht werden, ob es zu unakzeptablen mechanischen Veränderungen des CCD-Sensors während der Aufwärmphase des Systems kommt. Zur Untersuchung wird die evtl. Positionsänderung eines stabilen Zielpunktes auf dem CCD-Sensor bestimmt.

Als stabiler Zielpunkt wird ein Kollimator verwendet. Sowohl das Hängetachymeter als auch der Kollimator sind auf einer gemeinsamen Metallplatte auf einem Betonfundament befestigt. Der Zielpunkt wird über das Bildzuordnungsverfahren LSM verfolgt (Kap. 4.4.3). Da dieses Verfahren zur korrekten Zuordnung ein flächenhaftes und strukturiertes Grauwertmuster benötigt, wird anstelle des Strichkreuzes eine entsprechende Zielmarke in die Strichkreuzebene des Kollimators eingespiegelt. Um die der Positionsänderung der Zielmarke entsprechende Richtungsänderung bestimmen zu können muss das System zuvor kalibriert werden (Kap. 4.3). Die Richtungsmessungen werden mit einem zeitlichen Abstand von sechs Sekunden durchgeführt und der Mittelwert aus zehn Messungen

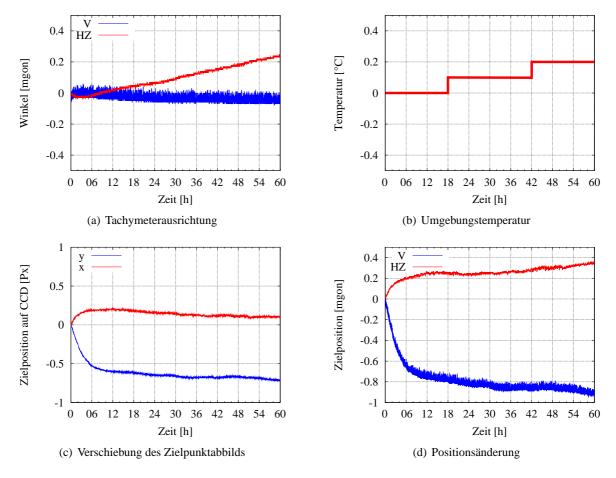


Abb. 4.14: Ergebnisse der Stabilitätsuntersuchung über den gesamten Aufnahmezeitraum von 60 Stunden. Alle Ergebnisse sind relativ zur ersten Messung angegeben. a) Um die Neigungswerte korrigierte Horizontalrichtung und Zenitwinkel des Tachymeters. b) Mit einem externen Temperatursensor bestimmte Umgebungstemperatur. c) Position der Zielmarke auf dem CCD-Sensor. d) Relative Positionsänderung der Zielmarke (Tachymeter- und CCD-Sensormessung).

gespeichert. Um Aufwärmeffekte des Tachymeters und des Neigungssensors in den Messungen zu eliminieren wurden diese bereits vier Stunden vor Beginn der Messungen eingeschaltet. Der CCD-Sensor befand sich mehrere Stunden vor den Messungen in einem ausgeschalteten Zustand, so dass die Ergebnisse nur durch einen Aufwärmeffekt des CCD-Sensors beeinflusst werden. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 60 Stunden durchgeführt. Die Abbildungen 4.14 zeigen die Ergebnisse der Messungen über den gesamten Aufnahmezeitraum.

Über den gesamten Aufnahmezeitraum ist eine Änderung der Horizontalrichtung des Tachymeters von 0,2 mgon erkennbar, während dessen Vertikalwinkel keine Änderung zeigt. Während der ersten sechs Stunden ist eine relative Positionsänderung der Zielmarke in horizontaler Richtung von 0,2 mgon und in vertikaler Richtung von 0,7 mgon zu beobachten. Im Folgenden zeigt sich bis zum Ende des Aufnahmezeitraums eine Positionsänderung der Zielmarke, sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung von 0,2 mgon. Sechs Stunden nach dem Einschalten des CCD-Sensors scheint das System sich in einem stabilen Zustand zu befinden.

Für viele Anwendungen ist eine Drift von ca. 0,1 mgon/h akzeptabel und es kann auf eine Aufwärmzeit zwischen dem Einschalten des Systems und dem Beginn der Messung verzichtet werden. Für Anwendungen mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen sollte das System jedoch wenigstens sechs Stunden vor Beginn der Messung eingeschaltet werden um eine thermisch bedingte Instabilität zu vermeiden.

5 Genauigkeitsuntersuchungen und Anwendungsfälle

5.1 Aufnahme geometrischer Objekte

Mit nachfolgend beschriebenem Aufbau soll allgemein die Einsatzfähigkeit des Hängetachymeters bei vertikaler Zielung erprobt werden. Zudem soll die relative Genauigkeit des Hängetachymeters durch die Aufnahme geometrischer Objekte bestimmt werden.

Die Messungen erfolgten im Turm des Beyerbaus der TU Dresden. Das Hängetachymeter wurde auf der obersten Plattform in einer Höhe von ca. 30 m über der Bodenplatte aufgebaut. Als Tachymeter wurde das TCA 2003 verwendet. Zur Untersuchung wurden diskrete Punkte auf einer Kreisbahn bestimmt. Die Kreisbahn wurde durch einen horizontalen Gelenkarm realisiert, welcher mittels eines Steckzapfens auf einem Dreifuß befestigt wurde. Das Zentrum der Kreisbahn befand sich dabei annähernd senkrecht unterhalb des Tachymeters. Zwei auf dem Gelenkarm in einer Entfernung r_1 und r_2 vom Mittelpunkt des Steckzapfens angebrachte Klebemarken dienten als Zielpunkte (Abb. 5.1). Der Gelenkarm wurde in Abständen von ca. 20 gon über die Kreisbahn bewegt.

Die Anzielung der Zielmarken wurde manuell mittels eines Steilsichtokulars und mit der Okularkamera durchgeführt. Die Messungen mit der Okularkamera erfolgten getrennt nach Messungen, bei denen das Tachymeterfernrohr nachgeführt und auf den Zielpunkt ausgerichtet wurde (Kreis mit Radius r_2), und unter Beibehaltung der Fernrohrausrichtung nur durch Messungen im Bild (Kreis mit Radius r_1). Die Punktbestimmung im Bild wurde sowohl manuell mittels Mauszeiger als auch mit dem Bildzuordnungsverfahren LSM durchgeführt. Bis auf die Messungen bei konstanter

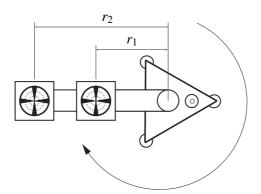


Abb. 5.1: Auf einer Kreisbahn drehbare Zielpunkte

Anzielung	\overline{r} in m	s_r in mm	s_r in mgon
Manuell (r_2)	0,35227	0,06	0,13
Kamera, LSM (r_2)	0,35197	0,07	0,15
Kamera, Cursor (r_2)	0,35216	0,09	0,19
Kamera, LSM (r_1)	0,14414	0,08	0,17
Kamera, Cursor (r_1)	0,14375	0,11	0,24

Tab. 5.1: Ermittelte Kreisradien und deren Standardabweichungen nach der Ausgleichung

Fernrohrausrichtung wurden alle Punkte in zwei Lagen bestimmt. Das Hängetachymeter wurde vor Beginn der Messungen kalibriert. Die Kamerakalibrierung erfolgte nur für die entsprechende Entfernung zum Zielpunkt.

Zur Auswertung wurden die Messwerte zunächst reduziert und die kartesischen Koordinaten der beobachteten Punkte im übergeordneten System bestimmt. In einer anschließenden Ausgleichung lassen sich mit Hilfe der Kreisgleichung

$$(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 = r^2$$

die Abweichungen zur Idealgeometrie errechnen. Tabelle 5.1 stellt die Ergebnisse der Ausgleichung dar.

Die Differenzen zwischen den aus der Ausgleichung erhaltenen Radien \bar{r} , bei denen das Bildzuordnungsverfahren verwendet wurde, zu denen mit manueller Anzielung können durch die Definition des Grauwertmusters erklärt werden. Dessen Zentrum konnte nur auf eine ganzzahlige Pixel-koordinate festgelegt werden. Die Standardabweichungen s_r der Kreisradien spiegeln die Richtungsmessgenauigkeit des eingesetzten Tachymeters wieder. Eine systematische Abweichung in Abhängigkeit von der Horizontalrichtung ist nicht erkennbar. Ein Vergleich der ausgeglichenen Kreisradien (manuelle Anzielung) mit den durch direkte Messung mit einem Messschieber bestimmten Werten ist nicht aussagekräftig, da diese nur auf ca. 0,2 bis 0,3 mm genau bestimmt werden konnten. In diesem Bereich stimmen die ausgeglichenen Kreisradien jedoch mit den mit dem Messschieber bestimmten Werten überein.

5.2 Zentrierung über einem Punkt

Zur Zentrierung des Hängetachymeters über einem Punkt kann ein Nadirlot als optisches Lot verwendet werden. Eine Zentrierung mit lotrecht nach unten gerichteter Ziellinie ist aufgrund der minimalen Fokussierweite des Zielfernrohres des Tachymeters (1,7 m bei TPS 1100 Serie von Leica) in vielen Fällen nicht möglich.

Das optische Zenit- und Nadirlot (ZNL) der Firma Wild (Heerbrugg) kann durch eine beidseitig geschliffene Röhrenlibelle und der sowohl auf der Ober- als auch der Unterseite angebrachten Zwangszentrierung beidseitig verwendet werden. Die Empfindlichkeit der Röhrenlibelle beträgt $30^{\prime\prime}/2$ mm, die Genauigkeit wird mit 1:30000 angegeben, und die minimale Fokussierweite liegt bei 0,35 m (Wild). Das ZNL wird zur Zentrierung anstelle des Tachymeters an der Aufhängevorrichtung befestigt (Abb. 5.2) und mit der Röhrenlibelle horizontiert. Durch Lösen der Befestigungsschraube kann die Aufhängevorrichtung mit PZL unterhalb des Stativtellers verschoben und über dem Bodenpunkt zentriert werden. Abschließend wird die Aufhängevorrichtung wieder befestigt und das PZL gegen das Tachymeter getauscht.

Zur Genauigkeitsuntersuchung des Verfahrens wurde ein Bodenpunkt vermarkt. Um diesen wurden acht Stative mit Reflektoren in einem Abstand von ca. 30 m positioniert und mittels TCA 2003 in einem lokalen System koordinatenmäßig bestimmt. Anschließend wurde das Hängetachymeter mit dem ZNL sieben Mal neu über dem Bodenpunkt zentriert. Der Zentrierung folgten jeweils eine Kalibrierung des Neigungssensors mit einem PZL und eine satzweise Beobachtung der umliegenden Zielpunkte. Als Tachymeter wurde ein TCA 2003 verwendet.

Bei der Auswertung wurden jeweils die Beobachtungen reduziert und die Koordinaten der Standpunkte über eine Freie Stationierung bestimmt. Als Genauigkeit des Zentrierverfahrens kann die aus den Standpunktkoordinaten berechnete empirische Standardabweichung einer Einzelaufstellung $s_x = 0,5$ mm angesehen werden.

Beim Vergleich der ermittelten Offsetwerte des Neigungssensors aus Horizontierung mit dem ZNL und Kalibrierung mit dem PZL wurde festgestellt, dass deren Differenzen, welche sich durch leicht unterschiedliche Auflageflächen und das Lösen der Arretierung ergeben, nur wenige Milligon betrugen. So ist bei einem eingeschränkten Genauigkeitsbedarf (z.B. Grobabsteckung) auch eine sehr zügige Kalibrierung des Neigungssensors nur mit einem ZNL möglich.



Abb. 5.2: Zentrierung des Hängetachymeters über einem Bodenpunkt mit dem Zenit- und Nadirlot der Firma Wild (Heerbrugg)

5.3 Vergleichsmessungen im Passpunktfeld

Zur weiteren Genauigkeitsuntersuchung wurden Messungen in einem Passpunktfeld durchgeführt. Hier wurde die Einsatzfähigkeit des Hängetachymeters bei weitgehend horizontaler Zielung untersucht.

Die Messungen wurden im Passpunktfeld der TU Dresden durchgeführt (Abb. 5.3). Das Passpunktfeld besitzt eine Ausdehnung von 65 m und besteht aus mehreren Reflexmarken, welche an den Außenwänden eines quadratischen Innenhofes angebracht sind. Die Passpunkte liegen bei einem zentralen Standpunkt über den gesamten Horizont verteilt in einem Vertikalwinkelbereich zwischen 70 bis 105 gon. Zur Referenzmessung wurde ein TCA 2003 verwendet.

Aus allen Passpunkten wurden 40 gleichmäßig verteilte Punkte ausgewählt, zu welchen anschließend Vergleichmessungen mit einem TCRM 1102 durchgeführt wurden. Die Messungen wurden einmal in hängender (Abb. 5.4) und einmal in aufrechter Position durchgeführt. Die Aufnahmepunkte (Schnittpunkt der Steh-, Ziel- und Kippachse) waren bei beiden Messungen nahezu identisch. Es wurden jeweils drei Vollsätze zu den Zielpunkten beobachtet. Die Distanzmessung wurde mit dem IR-Messmodus durchgeführt, die mittlere Zielentfernung lag bei ca. 30 m. Die Kalibrierwerte des Neigungssensors des Hängetachymeters wurden vor den Messungen mit einem PZL bestimmt.

Die Auswertung der satzweisen Winkelmessung in aufrechter Position ergab eine Standardabweichung für die Richtung und für den Vertikalwinkel von 0,8 mgon. Für die Messungen mit dem Hängetachymeter betrug die Standardabweichung für die Richtung und für den Vertikalwinkel ebenfalls 0,8 mgon. Beim Vergleich der in aufrechter Position bestimmten Punktkoordinaten zu den Referenzkoordinaten aus Messung mit dem TCA 2003 ergaben sich nach einer räumlichen Ähnlichkeits-





Abb. 5.3: Ausschnitt aus dem Passpunktfeld der TU Dresden mit Zielmarke



Abb. 5.4: Messungen mit dem Hängetachymeter im Passpunktfeld

transformation mit dem Maßstabsfaktor m=1 im Mittel Restklaffungen von 0,8 mm (max. 1,5 mm) für die Lage und von 0,4 mm (max. 1,2 mm) für die Höhe. Für die Messungen mit dem Hängetachymeter betrugen die Restklaffungen im Mittel 0,8 mm (max. 1,4 mm) für die Lage und 0,4 mm (max. 1,4 mm) für die Höhe (Tab. 5.2).

Berechnete man aus den Restklaffungen der Lage einen Anteil in Zielrichtung und einen Anteil quer zu dieser, so zeigte sich, dass der Anteil in Zielrichtung durchschnittlich doppelt so groß war wie der Anteil quer zur Zielrichtung. Dies ist auf die im Vergleich zur Richtungsmessgenauigkeit schlechtere Streckenmessgenauigkeit zurückzuführen. Es ergab sich für den Anteil der Restklaffung quer zur Zielrichtung im Mittel ein Betrag von 0,4 mm, welcher bei einer mittleren Punktentfernung von 30 m der aus der Auswertung der satzweisen Winkelmessung bestimmten Standardabweichung für die Richtung von 0,8 mgon entspricht. Der Einfluss der im Vergleich zur Vertikalwinkelmessgenauigkeit schlechteren Streckenmessgenauigkeit zeigte sich auch bei der Betrachtung der Restklaffungen der Höhe. Deren Betrag nahm mit steiler werdender Zielung zu. Bei annähernd horizontaler Zielung betrugen die Restklaffungen der Höhe 0,4 mm.

 $\textbf{Tab. 5.2:} \ Restklaffungen \ in \ mm \ nach \ der \ Transformation \ ins \ Referenzsystem \ (Maßstab = 1)$

Position	Mittel (Lage)	Max (Lage)	Mittel (Höhe)	Max (Höhe)
aufrecht	0,8	1,5	0,4	1,2
hängend	0,8	1,4	0,4	1,4

Die als Ergebnis der räumlichen Ähnlichkeitstransformation zwischen Aufnahme mit dem Hängetachymeter und Referenznetz ermittelten Rotationsparameter um die X- und Y-Achse stellen den Winkel zwischen der Stehachse des Hängetachymeters und der Z-Achse des Referenzsystems dar. Hier entspricht die Z-Achse des Referenzsystems der Stehachse des TCA 2003. Der Winkel zwischen beiden Stehachsen hatte einen Betrag von 1,6 mgon bei einer Standardabweichung von 0,8 mgon.

Insgesamt ist zwischen den erzielten Genauigkeiten des Hängetachymeters und des Tachymeters in aufrechter Position kein Unterschied festzustellen.

5.4 Netzmessung im Überwachungsnetz einer Staumauer

Nicht alle bei der Errichtung eines Staubauwerks vorgesehenen Lotschächte werden auch tatsächlich mit permanenten Loteinrichtungen versehen. Die ungenutzten Schächte können für regelmäßige Kontrollmessungen verwendet werden. Hierfür kann anstelle der Kombination aus mechanischer Lotung und Alignement eine optische Punktübertragung mit dem Hängetachymeter und Stationierung im Festpunktfeld der Staumauer vorgenommen werden. Auf diese Weise können gleichzeitig Punkte auf der Mauerkrone und im Inneren des Staubauwerkes mit einer mobilen Messeinrichtung überwacht werden (Fuhrland 2006). Daneben ist es im Berg- und Tunnelbau oftmals notwendig, untertägige Punkte in einem übertägigen System zu bestimmen. Hierbei kann mit dem Hängetachymeter sowohl die (übertägige) Netzmessung als auch die vertikale Punktübertragung durch senkrechte und geneigte Schächte kombiniert werden.

Im Weiteren wird daher die Genauigkeit des Hängetachymeters bei einer tachymetrischen Netzmessung untersucht. Eine Untersuchung der vertikalen Punktübertragung findet sich im darauffolgenden Kapitel.

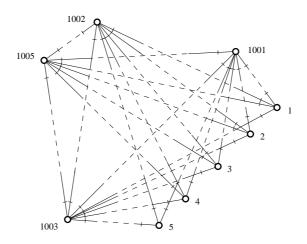


Abb. 5.5: Lage der Punkte und Beobachtungsanordnung

Das Überwachungsnetz der Staumauer Schräh im Wägital (Schweiz) besteht insgesamt aus neun Punkten. Von diesen befinden sich fünf Beobachtungspunkte direkt auf der Mauerkrone (1–5), vier weitere Punkte sind als Beobachtungspfeiler ausgeführt (1001–1005). Abbildung 5.5 zeigt die Lage der Punkte und die Beobachtungsanordnung. Die Referenzmessung des Überwachungsnetzes erfolgte direkt vor den Hängetachymetermessungen mit einem TCA 2003. Die Standardabweichung der Punktkoordinaten betrug nach der Ausgleichung maximal 0,2 mm.

Um mit dem Hängetachymeter die Zwangszentrierung der Beobachtungspunkte verwenden zu können, wurde für dieses ein spezieller Zentrierrahmen konstruiert (Abb. 5.6). Über zwei Röhrenlibellen auf dessen Oberseite lässt sich die Stehachse des Tachymeters mit einer Abweichung kleiner 0,2 mm über dem Punkt zentrieren. Aufgrund der Größe des Zentrierrahmens kann in diesen nur ein Tachymeter der TPS 1100 Serie von Leica eingesetzt werden. Eine größere Konstruktion des Rahmens bot keine ausreichende Stabilität. Als Tachymeter wurde daher ein TCRM 1102 verwendet. Die Kalibrierung des Neigungssensors erfolgte über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation. Die hierfür benötigten Koordinaten der Passpunkte stammten aus der vorangegangenen Referenzmessung. Die Beobachtungsanordnung der Vergleichsmessung entsprach der Referenzmessung. Es wurden jeweils drei Vollsätze zu den Zielpunkten beobachtet.

Die Auswertung der Vergleichsmessung mit dem Hängetachymeter lieferte eine a posteriori Standardabweichung für die Richtung von 0.76 mgon und für den Vertikalwinkel von 0.74 mgon. Die von der hängenden Position unbeeinflusste Steckenmessung wies eine a posteriori Standardabweichung von 0.7 mm auf. Der Vergleich der mit dem Hängetachymeter bestimmten Punktkoordinaten mit den Referenzkoordinaten aus der Messung mit dem TCA 2003 zeigte nach einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation mit dem Maßstabsfaktor m=1 Restklaffungen für die Lage von 0.4 bis 0.8 mm (max. 1.2 mm) und für die Höhe von 0.3 bis 0.4 mm (max. 0.6 mm).





Abb. 5.6: Hängetachymeter im Zentrierrahmen

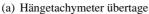
Die erzielten Ergebnisse der Netzmessung mit dem Hängetachymeter unterscheiden sich nicht von den Genauigkeiten, welche mit dem TCRM 1102 in aufrechter Position zu erreichen sind. Das Hängetachymeter kann somit zur Netzmessung, auch zusammen mit Tachymetern in aufrechter Position, eingesetzt werden.

5.5 Lotungsmessungen in Bergwerkschacht

Die Untersuchung der vertikalen Punktübertragung mit dem Hängetachymeter erfolgte in Zusammenarbeit mit der TU Bergakademie Freiberg im Lehr- und Forschungsbergwerk Reiche Zeche in Freiberg. Dieser Schacht wurde gewählt, da hier infolge der unabhängig von der Jahres- und Tageszeit gleichbleibenden Temperatur und der mit geringer Geschwindigkeit ausziehenden Schachtwetter bei einer Lotungsmessung kaum Refraktion auftritt (Kap. 2.4) und somit alle Abweichungen auf die Instrumentengenauigkeit zurückgeführt werden können.

Als Referenz für die vertikale Punktübertragung diente ein Schwergewichtslot. Dieses wurde zusammen mit dem Hängetachymeter auf einer Konsole über der Schachtöffnung montiert (Abb. 5.7a). Das Lot erreichte die erste Sohle mit einer Teufe von ca. 147 m, auf der auch die beleuchtete Zieltafel für die Punktübertragung mit dem Hängetachymeter angebracht wurde (Abb. 5.7b). Abbildung 5.8 stellt die Lage der einzelnen Komponenten dar. Mit einem Maßstab konnte direkt unterhalb des Tachymeters der horizontale Abstand des Lotdrahtes von dessen Stehachse (d_1) sowie der horizontale Abstand des Lotdrahtes von der Zieltafel auf der ersten Sohle (d_2) gemessen werden. Die Bestimmung des Winkels α und der horizontalen Exzentrizität e erfolgt mit dem Hängetachymeter. Der Lotdraht kann als Referenz für die Lage der Zieltafel nur in eine Richtung dienen. Die Installation eines zweiten Schwergewichtslotes war aufgrund des Grubenfahrbetriebes nicht möglich.







(b) Zieltafel untertage

Abb. 5.7: Lotungsmessung im Berkwerkschacht

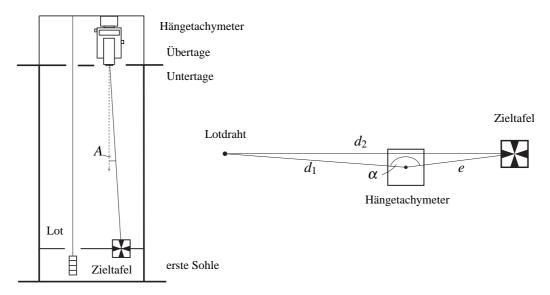


Abb. 5.8: Messaufbau und Lage der einzelnen Komponenten

Die Richtung zur Zieltafel wurde mit dem Hängetachymeter nach zwei unterschiedlichen Verfahren bestimmt, zum einen durch eine satzweise Richtungsmessung (pro Durchgang wurden fünf Sätze gemessen), und zum anderen durch das im Kapitel 2.1.2 beschriebene Verfahren der Zenitwinkelmessung nach Morlot (die Unterteilung des Horizontalkreises erfolgte in Schritten zu je 25 gon). Die Richtungsbestimmung wurde abwechselnd mit beiden Verfahren jeweils fünfmal durchgeführt. Als Tachymeter wurde das TCA 2003 eingesetzt. Die Achsenabweichungen des Tachymeters wurden vor Beginn der Messungen in hängender Position bestimmt. Eine Neukalibrierung des Neigungssensors mit einem PZL erfolgte vor jedem neuen Durchgang. Die zur Berechnung der Exzentrizität e benötigte Lottiefe t zwischen Kippachse des Tachymeters und Zieltafelebene wurde abschließend im IR-Messmodus mit einem Prisma gemessen. Die Ergebnisse der Lotungsmessungen sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Mit \overline{A} wird der Mittelwert der Abweichung der Zielachse aus der Lotrichtung bezeichnet, sA stellt die Standardabweichung einer Einzelmessung dar. Die mittlere horizontale Exzentrizität \bar{e} bezieht sich auf eine Teufe von 147 m. Die Abweichung zwischen dem mit dem Hängetachymeter und dem als Referenz dienenden Schwergewichtslot bestimmten horizontalen Abständen d_1 betrug 1 mm, wobei die Abstände d_1 und d_2 nur mit Millimetergenauigkeit bestimmbar waren.

Tab. 5.3: Ergebnisse der Lotungsmessungen im Bergwerkschacht

	\overline{A} in gon	s _A in mgon	\overline{e} in m
satzweise Richtungsmessung	0,06570	0,26	0,1516
Zenitwinkelmessung	0,06553	0,15	0,1512

5.6 Einsatz des Hängetachymeters in der Industrievermessung

Durch sein bisher gezeigtes hohes Genauigkeitspotential ist es vorstellbar, das Hängetachymeter auch in der Industrievermessung einzusetzen. Der besondere Nutzen des Systems liegt dabei in der uneingeschränkten tachymetrischen Messung von oben. Bisherige Systeme sind auf eine herkömmliche, meist bodennahe, Standpunktwahl angewiesen, von welchen aus das aufzunehmende Objekt oft nur teilweise eingesehen werden kann. Ein an der Decke angebrachtes Hängetachymeter kann hier als zusätzlicher Standpunkt eingesetzt werden, oder mehrere Hängetachymeter können die Aufnahme der kompletten Objektoberseite übernehmen. Durch die Verwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen zur Zielpunktidentifikation können sowohl haftende Zielmarken verwendet werden, als auch eine Signalisierung über Lichtpunkte (Laserpunkte) erfolgen. Das automatische Nachführen des Tachymeterfernrohrs beim Verlassen des Lichtpunktes aus dem Sichtbereich ist zudem möglich. Hierdurch lassen sich gesamte Objektoberflächen automatisch abtasten und erfassen.

Denkbar ist auch die Deckenmontage in Fertigungshallen, in denen aufgrund der Arbeiten bzw. Sichtverhältnisse eine Stationierung am Boden generell nicht möglich ist. Dabei ist es je nach Einsatzgebiet und Genauigkeitsanforderung möglich, die dreidimensionale Objektkoordinate unter Zuhilfenahme der Distanzinformation des internen (reflektorlosen) Entfernungsmessers zu gewinnen, oder aus räumlichen Vorwärtsschnitten mehrerer Standpunkte zu errechnen. Als mögliche Einsatzgebiete können der Maschinen- und Schiffsbau und die Luft- und Raumfahrttechnik genannt werden (Abb.5.9).

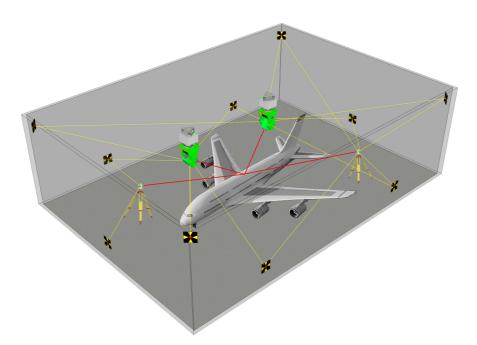


Abb. 5.9: Einsatz des Hängetachymeters in der Industrievermessung

Zum Einsatz des Hängetachymeters in der Industrievermessung muss dieses einigen Voraussetzungen genügen:

So bedingt die Montage an der Decke eine komplette Fernsteuerung des Systems. Dies wird durch die Verwendung der Okularkamera und des Schrittmotors zur Fokussierung ermöglicht. Auch die Steuerung des Tachymeters und des Neigungssensors erfolgt über einen externen Rechner. Eine direkte Kontrolle des Hängetachymeters nach Installation des Systems ist nicht nötig.

Die automatische Kalibrierung der Okularkamera ist mit Hilfe von in unterschiedlichen Entfernungen befestigten Zielmarken möglich. Die Stabilität des Systems wird dabei durch den externen Neigungssensor überwacht und eine Neigungsänderung während der Kalibrierung als Korrektur an die Messwerte angebracht.

Zur Bestimmung von Objektkoordinaten aus einem räumlichen Vorwärtsschnitt müssen die (Hänge-) Tachymeter (zuvor) gegenseitig orientiert, ihre Positionen im Raum bekannt und die Offsetwerte ihrer Neigungssensoren bestimmt sein. Hierzu gibt es zwei mögliche Ansätze: Ist im Raum des zu vermessenden Gegenstandes bereits ein aus vorangegangenen Messungen vorgegebenes Festpunktfeld vorhanden, können die gesuchten Orientierungsdaten aus räumlichen Rückwärtsschnitten erhalten werden. Ebenfalls lassen sich hierdurch die Offsetparameter des Neigungssensors, bezogen auf das vorhandene Festpunktfeld, bestimmen. Das Vorgehen gleicht dem in Kapitel 3.3.3 vorgestellten Verfahren zur Kalibrierung des Neigungssensors, nur dass hier anstelle von dreidimensionalen Koordinaten Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel in die Ausgleichung als Beobachtungen eingehen. Eine ausführliche Darstellung des Rechengangs findet sich bei Schneider (2008).

Des Weiteren können die Orientierungs- und Kalibrierungsparameter gemeinsam in einer Bündelausgleichung bestimmt werden. Hierzu zielen die (Hänge-) Tachymeter eine Anzahl von Objektpunkten an, deren Koordinaten unbekannt sein können. Zur Maßstabsbestimmung muss ein Referenzmaßstab in die Messungen mit einbezogen werden. Die vom Tachymeter ausgehenden Zielstrahlen lassen sich als Strahlenbündel interpretieren, wobei die einzelnen Strahlen durch ihre gemessenen Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel definiert sind. Durch die Bündelausgleichung werden diese Strahlenbündel iterativ so transformiert, dass sich die jeweils zum selben Zielpunkt verlaufenden Strahlen optimal an diesen anpassen, und gleichzeitig die Länge des Referenzmaßstabs eingehalten wird (Löffler u. a. 2002). Als Ergebnis erhält man die gegenseitige Orientierung der Instrumente, deren Standpunktkoordinaten, die Kalibrierparameter der Neigungssensoren und die Koordinaten der angezielten Punkte im lokalen System. Werden die Offsetwerte der Neigungssensoren als Unbekannte in die Bündelausgleichung eingeführt, so müssen wenigstens die Lage und Ausrichtung des Achssystems eines Instruments vorgegeben werden, um einen Datumsdefekt zu vermeiden. Besteht das Messsystem nur aus Hängetachymetern, so sollten wenigstens die Offsetwerte des Neigungssensors eines Hängetachymeters über vorhandene Festpunkte bestimmt werden.

Das Hauptentscheidungskriterium für den Einsatz des Hängetachymeters in der Industrievermessung stellt jedoch dessen erreichbare Präzision bei der Bestimmung von Horizontalrichtungen und Vertikalwinkeln dar. Diese kann durch ein Feldverfahren nach ISO 17123-3 ermittelt werden.

Durch den im Folgenden näher beschriebenen Versuchsaufbau sollen die Voraussetzungen des Hängetachymeters zum Einsatz in der Industrievermessung überprüft und der Hängetachymeter in der praktischen Anwendung getestet werden. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit denen des Industriemesssystems Axyz der Firma Leica Geosystems.

Vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen wurde die Präzision des Hängetachymeters bei der Bestimmung von Horizontalrichtungen und Vertikalwinkeln in einem separaten Versuchsaufbau bestimmt. Als Tachymeter wurde ein TCA 2003 zusammen mit der Okularkamera eingesetzt. Das Vorgehen entsprach dabei weitgehend dem in ISO 17123-3 dargestellten ausführlichen Feldverfahren. Im Unterschied zu ISO 17123-3 konnten jedoch im Labor keine Zielweiten über 100 m realisiert werden. Die maximale Zielweite betrug ca. 17 m. Zudem fanden die Messungen nicht bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen, sondern unter Laborbedingungen statt. Die Präzision der Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel wurde dabei für zwei unterschiedliche Zielverfahren bestimmt. Zum einen wurden die Zielpunkte manuell im vergrößerten Bildausschnitt angezielt, zum anderen wurden die Zielstrahlen durch das Bildzuordnungsverfahren LSM ermittelt. Die hierzu benötigten Grauwertmuster wurden vor Beginn der Messungen aufgenommen und gespeichert. Tabelle 5.4 zeigt die Ergebnisse.

Die nach dem angewendeten Verfahren ermittelten Standardabweichungen für eine aus Messungen in beiden Fernrohrlagen gemittelte Horizontalrichtung (s_{HZ}) bzw. eines Vertikalwinkels (s_V) liegen im Bereich der vom Instrumentenhersteller für den eingesetzten Tachymeter (nach ISO 17123-3) angegebenen Genauigkeiten. Die Anzielung mit dem Bildzuordnungsverfahren LSM liefert leicht bessere Ergebnisse als die manuelle Punktanzielung, kann jedoch für die Industrievermessung nur bedingt eingesetzt werden.

Für Industrievermessungen mit dem Industriemesssystem Axyz wurde ein Raum im Messlabor der TU Dresden eingerichtet. Der Raum besitzt eine Größe von $4,5 \times 10 \times 3$ m und ist mit mehreren Messpfeilern und Wandkonsolen zur Aufnahme der Theodolite ausgestattet. Über den gesamten Raum verteilt befinden sich 36 Präzisionszielmarken zur gegenseitigen Orientierung der einzelnen Stationen untereinander (Abb. 5.10). Diese Zielmarken wurden auch zur Überprüfung des Hänge-

Tab. 5.4: Präzision des eingesetzten Hängetachymeters

mgon
15
12

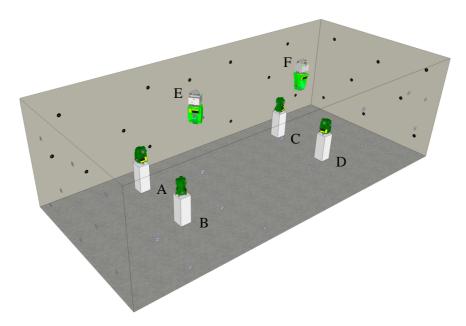


Abb. 5.10: Messlabor für Industrievermessungen

tachymeters verwendet. Zur Koordinatenbestimmung der Zielmarken wurden Messungen von vier Standpunkten (A,...,D) aus mit den Theodoliten T 3000 und TC 2002 der Firma Wild (Heerbrugg) durchgeführt. Die Punkte wurden wie bei allen Messungen in diesem Kapitel in zwei Fernrohrlagen angezielt. Zur Sicherung des Maßstabs wurde ein Referenzmaßstab in unterschiedlicher Ausrichtung über den gesamten Messraum verteilt mehrmals aufgenommen. Die Koordinaten ergaben sich nach einer Bündelausgleichung mit der Software des Industriemesssystems Axyz. Für die Lage ergaben sich im Mittel Standardabweichungen von 0,07 mm und maximal von 0,10 mm, wobei sich die großen Halbachsen der Fehlerellipsen aufgrund von teilweise spitzen Schnittwinkeln in Richtung der Theodolite orientierten. Für die Höhen betrugen die Standardabweichungen im Mittel 0,03 mm und maximal 0,04 mm. Anschließend wurden ausgewählte Zielmarken ebenfalls mit dem Hängetachymeter von zwei Standpunkten (E, F) aus aufgenommen. Zuvor erfolgte jedoch eine im nachfolgenden näher beschriebene vollständige Kalibrierung des Systems:

Ziel der Untersuchung war es, eine automatische Kalibrierroutine ohne Interaktion des Benutzers zu entwickeln. Dies dient der Erprobung einer Selbstkalibrierung des Systems bei fester Installation in Kombination mit koordinatenmäßig bekannten Referenzpunkten. Zur Kalibrierung des CCD-Sensors wurden hierzu fünf kontrastreiche Zielmarken annähernd horizontal in verschiedenen Entfernungen orthogonal zum Hängetachymeter angebracht, deren Entfernungsbereich die Zielweiten der späteren Messungen abdeckte. Zur automatischen Zielung wurden die Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel der Zielmarken vorab bestimmt, die Fokussierung erfolgte über eine Maximierung des Bildkontrasts. Das Vorgehen zur Bestimmung der von der Position der Fokussierlinse (Position des Schrittmotors) abhängigen Kalibrierparameter des CCD-Sensors entsprach dem in Kapitel 4.3 beschriebenen.

Da die Koordinaten der Zielachse auf der Sensorebene (Punkt ZA') durch Messungen in zwei Lagen ermittelt werden, sind diese frei von Zielachsen- und Höhenindexabweichungen. Die verbleibende Kippachsenneigung wurde durch steile Zielungen in zwei Lagen mittels LSM bestimmt. Zur Kalibrierung des Neigungssensors wurden Messungen zu den koordinatenmäßig bekannten Zielmarken durchgeführt. Eine automatische Messung der Zielmarken konnte mit dem in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Verfahren für punktförmige Muster erfolgen, da im Zentrum der verwendeten Zielmarken ein heller Punkt von einem dunklen Kreis umschlossen wird. Deren Näherungswerte müssen notwendigerweise vorab bekannt sein. Über einen überbestimmten räumlichen Rückwärtsschnitt konnten anschließend die Positionen, Orientierungen und die Offsetwerte der Hängetachymeter berechnet werden. Zur Berechnung wurden nach Elimination von groben Fehlern alle gemessenen Zielmarken verwendet (jeweils >25 Messungen). Für die Offsetwerte beider Standpunkte ergaben sich Standardabweichungen von kleiner 0,15 mgon.

Die Dauer der gesamten Systemkalibrierung betrug für einen Standpunkt ca. 30 Minuten. Der größte Zeitanteil entfiel hierbei auf die Fokussierung der Zielpunkte. Um die Zeitdauer für eine Systemkalibrierung zu verkürzen, sollte daher vorrangig der Algorithmus zur Bestimmung des Kontrastmaximums optimiert werden.

Von den im Raum verteilten Zielmarken konnten 18 Marken unter günstigen Schnittwinkeln von beiden Hängetachymeterstandpunkten erfasst werden. Die Aufnahme dieser Punkte erfolgte im Anschluss an die Systemkalibrierung durch manuelle Punktanzielung im Bild. Da die gegenseitige Orientierung und Position der Hängetachymeter bereits vorlag, wurden die Koordinaten der Zielpunkte über einen räumlichen Vorwärtsschnitt mit der Ausgleichungssoftware Panda (GeoTec 2002) berechnet, und anschließend mit den durch das Industriemesssystems Axyz bestimmten Koordinaten verglichen. Die resultierenden räumlichen Klaffungen lagen nach Elimination von Ausreißern (3 Punkte) im Mittel bei 0,04 mm und maximal bei 0,07 mm.

Alternativ zum aufgezeigten Vorgehen kann die Auswertung der Messungen auch direkt mit der Software des Industriemesssystems Axyz erfolgen, da diese eine Datenschnittstelle zum Import von GSI-Dateien besitzt. Dabei kann die Auswertung auch mit Messungen herkömmlicher Theodolite kombiniert werden. Die Software bietet darüber hinaus die Möglichkeit, bei der gegenseitigen Orientierung mittels Bündelausgleichung anstelle einer Drehung um die Stehachse eine komplette räumliche Drehung des Theodolits in das Ausgleichungsmodell einzuführen. Die Kalibrierung des Neigungssensors des Hängetachymeters kann sich dadurch auf eine Grobhorizontierung beschränken.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Systems mit dem tachymetrische Messungen auch in einem Zenitwinkelbereich zwischen 170 und 230 gon möglich sind. Hierzu wurde das Konzept eines Hängetachymeters entwickelt, welches auf der Kombination eines in hängender Position montierten Tachymeters mit einem externen Neigungssensor basiert. Der Schwerpunkt der Entwicklung lag dabei auf der Verbindung der einzelnen Sensoren (Tachymeter, Neigungssensor, Okularkamera und Fokus) zu einem integrierten System.

In Kapitel 2 wurden die theoretischen Grundlagen der Arbeit zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung des Standes der Technik der vertikalen Punkt- und Richtungsübertragung wurde gegeben. Hierzu wurde unterschieden zwischen mechanischer Lotung, optischer Lotung und der vertikalen Punktübertragung mit Hilfe von Trägheitsmesssystemen. Der besondere Schwerpunkt lag hier auf der optischen Punktübertragung. Die Verfahren zur vertikalen Richtungsübertragung wurden zur besseren Übersicht in einem separaten Abschnitt vorgestellt.

Da bei der vertikalen Punktübertragung die Lotabweichungen direkt in die Genauigkeit der Punktkoordinate eingehen, müssen diese berücksichtigt werden. Um die Punktschweren unterhalb der Erdoberfläche und somit den Verlauf der Lotlinie bzw. die Lotabweichung an jedem Punkt der Lotlinie bestimmen zu können, bedarf es eines zusätzlichen Topographiemodells. Es wurde auf den in der Geodäsie für die Darstellung des Schwerefeldes der Erde gebräuchlichsten Ansatz als Reihenentwicklung nach Kugelfunktionen eingegangen. Verfahren zur Bestimmung des Lotlinienverlaufs auf sowie unter der Erdoberfläche wurden vorgestellt.

Da besonders in vertikalen Schächten schwierige atmosphärische Bedingungen herrschen, wurde die Refraktion in diesen gesondert betrachtet und der hierzu fündige Stand der Forschung aufgezeigt.

Das Kapitel schließt mit der Darstellung der Einflüsse der Instrumentenabweichungen auf die Richtungs- und Winkelbestimmung mit dem Tachymeter. Besonders wurde hier auf das Verhalten bei Messungen nahe dem Zenit, bzw. dem Nadir eingegangen. Die theoretischen Ansätze zur Kombination eines Tachymeters mit einem externen Neigungssensor wurden erarbeitet.

Kapitel 3 befasste sich mit der Entwicklung des Hängetachymeters. Die Konstruktion der Aufhängevorrichtung wurde beschrieben und allgemeine Anforderungen an die eingesetzten Sensoren definiert. Die verwendeten Sensoren wurden näher vorgestellt sowie Alternativen hierzu diskutiert.

Besondere Betrachtung fand die Lagerung der Tachymeterachsen bei hängender Montage. Das Verhalten des Neigungssensors bei Temperaturänderung wurde untersucht.

Die mit dem Tachymeter ermittelten Messwerte werden durch Instrumentenabweichungen beeinflusst und müssen um diese korrigiert werden. Auch sind die Messwerte um die mit dem externen Neigungssensor ermittelte Stehachsenneigung zu korrigieren. Es wurden die am Hängetachymeter verwendeten Koordinatensysteme beschrieben, die einzelnen Mess- und Kalibrierwerte erläutert sowie die in Kapitel 2 hergeleiteten Algorithmen zur Korrektur der Messwerte in das Gesamtsystem eingebunden. Verfahren zur Instrumentenkalibrierung wurden beschrieben und erprobt. Die Achsenabweichungen des Tachymeters müssen in hängender Position bestimmt werden. Es kann nicht generell vorausgesetzt werden, dass diese mit den in aufrechter Position bestimmten Werten übereinstimmen. Zur Kalibrierung des Neigungssensors wurden drei Verfahren entwickelt. Die ermittelte Standardabweichung der Kalibrierwerte des Neigungssensors betrug 0,20 mgon.

Abschließend wurde die Entwicklung einer Software zur Steuerung des Hängetachymeters beschrieben, in welcher die Steuerung und Kalibrierung der Sensoren, die Auswertung und Korrektur der Messwerte, deren Speicherung und Weiterverarbeitung sowie der Datenexport integriert wurden.

Der Kombination des Hängetachymeters mit einem CCD-Sensor ist Kapitel 4 gewidmet. Nach einer Beschreibung des eingesetzten CCD-Sensors wurde die Implementierung in das System dargestellt. Der CCD-Sensor wurde konstruktiv so modifiziert, dass ein Durchschlagen des Tachymeterfernrohrs weiterhin möglich ist.

Zur Realisierung eines Autofokus wurde das Hängetachymeter mit einem Schrittmotor kombiniert, welcher über den Fokussierring des Tachymeters die Fokussierlinse bewegt. Eine Autofokusfunktion wurde auf Grundlage des Bildkontrastes entwickelt. Zur Bestimmung der Position des Kontrastmaximums wurden mehrere Ansätze dargestellt. Um mechanischen Einschränkungen bei der Übertragung einer Drehung des Schrittmotors in eine entsprechende Positionsänderung der Fokussierlinse Rechnung zu tragen, wurde ein Algorithmus speziell für das vorliegende System entwickelt und programmtechnisch umgesetzt.

Die Kalibrierung der Okularkamera basiert auf einer Modellierung des Abbildungsprozesses durch lineare Funktionen. Der Strahlengang im optischen System des Tachymeterfernrohrs wurde dargestellt, ebenso ihn beeinflussende Faktoren wie radialsymmetrische Verzeichnungen, eine Verkippung der Bildebene und eine Exzentrizität des Projektionszentrums vom Tachymeterursprung. Hieraus wurde für eine konstante Objektentfernung die Entwicklung eines Abbildungsmodells mittels einer Affintransformation beschrieben und die Bestimmung der Kalibrierwerte dargestellt. Anschließend wurde der Ansatz auf den allgemeinen Fall beliebiger Objektentfernungen erweitert. Hierbei wurde die Abhängigkeit der Kalibrierwerte von der Position der Fokussierlinse (Position des Schrittmotors) aufgezeigt. Abschließend wurden Hinweise zur Durchführung gegeben.

Die zur optischen Zielerkennung eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen gliedern sich in eine manuelle Punktanzielung im Bild, die Messung punktförmiger Muster durch Kantendetektion und Ellipsenanpassung und Bildzuordnungsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Am Ende dieses Kapitels wurden Stabilitätsuntersuchungen des Hängetachymeters in Kombination mit der Okularkamera durchgeführt. Darüber hinaus wurde untersucht, ob es zu mechanischen Veränderungen des CCD-Sensors während der Aufwärmphase des Systems kommt. Die Stabilität des Systems bei konstanten äußeren Bedingungen ist sehr gut. Bei Messungen über 60 Stunden kam es zu Abweichungen von 0,2 mgon. Für Messungen im höchsten Genauigkeitsbereich benötigt das System eine Aufwärmzeit von ca. sechs Stunden.

Die zur Validierung des Systems durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen wurden in Kapitel 5 zusammengestellt. Zugleich dienten diese dazu, neue Anwendungsgebiete des Hängetachymeters aufzuzeigen.

Die Einsatzfähigkeit des Hängetachymeters bei vertikaler Zielung wurde durch die Aufnahme sich auf einer Kreisbahn bewegender Zielpunkte bestimmt. Die Kreisradien konnten bei einer Teufe von 30 m mit einer Standardabweichungen von ca. 0,1 mm ermittelt werden.

Zur Zentrierung des Hängetachymeters über einem Punkt kann ein Nadirlot als optisches Lot verwendet werden. Als Genauigkeit des Zentrierverfahrens kann die ermittelte Standardabweichung einer Einzelaufstellung von 0,5 mm angesehen werden. Bei einem eingeschränkten Genauigkeitsbedarf ist die Kalibrierung des Neigungssensors nur mit den Röhrenlibellen des Nadirlotes möglich.

Um die Stationierung des Hängetachymeters in einem vorhanden Festpunktfeld zu überprüfen, wurden Netzmessungen sowohl im Festpunktfeld der TU Dresden als auch im Überwachungsnetz der Staumauer Schräh im Wägital (Schweiz) durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse der Netzmessungen mit dem Hängetachymeter unterschieden sich nicht von den Genauigkeiten, welche mit dem eingesetzten Tachymeter (TCRM 1102) in aufrechter Position zu erreichen sind. Das Hängetachymeter lässt sich somit zur Netzmessung, auch zusammen mit Tachymetern in aufrechter Position, einsetzen.

Ein Vergleich der mechanischen vertikalen Punktübertragung mittels Schwergewichtslotung und der optischen Punktübertragung mit dem Hängetachymeter erfolgte im Schacht Reiche Zeche in Freiberg. Die Position des sich nicht lotrecht unterhalb des Hängetachymeters befindlichen Zielpunktes wurde sowohl durch satzweise Richtungsmessung als auch durch das Verfahren der Zenitwinkelmessung nach Morlot bestimmt. Die Ergebnisse beider Verfahren können als gleichwertig angesehen werden. Die Abweichung zum als Referenz dienenden Schwergewichtslot betrug 1 mm bei einer Teufe von 147 m.

Abschließend wurde das Hängetachymeter auch erfolgreich in der Industrievermessung eingesetzt. Eine automatische Kalibrierroutine ohne Interaktion des Benutzers wurde entwickeln und erprobt.

Die Ergebnisse einer Punktbestimmung wurden mit denen des Industriemesssystems Axyz verglichen. Die resultierenden räumlichen Klaffungen lagen im Mittel bei 0,04 mm (max. 0,07 mm).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das hier entwickelte Mess- und Auswertekonzept eines Hängetachymeters seine Tauglichkeit unter Beweis gestellt hat. Das Hängetachymeter erlaubt tachymetrische Messungen auch in einem Zenitwinkelbereich zwischen 170 und 230 gon. Durch die Kombination mit einem CCD-Sensor und einer automatisierten Fokussierung konnte eine vollständig entfernte Steuerung des Systems realisiert werden. Die erreichten Genauigkeiten des Systems liegen im Bereich der Genauigkeiten des eingesetzten Tachymeters. Ein zusätzlicher Vorteil des Systems vor allem für kinematische Anwendungen liegt in der Verwendung eines externen Neigungssensors, da dieser nicht von den Bewegungen des Tachymeters beeinflusst wird.

Die Ergebnisse, die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Mess- und Auswertekonzept unter realen Feldbedingungen u.a. bei einer Kanalvermessung erzielt wurden, sind bereits sehr zufriedenstellend. Dennoch sind einige Verbesserungen oder Modifikationen am System vorstellbar. So besitzt die verwendete Okularkamera infolge des begrenzten Öffnungswinkels einen sehr schmalen Arbeitsraum. Eine zusätzliche Übersichtskamera könnte dem Benutzer eine vereinfachte Identifikation der Zielpunkte erlauben. Am flexibelsten würde sich hierfür eine Zoomkamera eignen. Des Weiteren könnte anstelle des modularen Konzeptes ein Tachymeter mit integrierter Kamera und Fokussierung eingesetzt werden. Dies würde auch zu einer wesentlich vereinfachten Kabelführung führen, da sowohl für die Datenverbindung der einzelnen Sensoren als auch deren Stromversorgung ein einziges Kabel verwendet werden könnte. Darüber hinaus ist die Erstellung zusätzlicher Anwendungsprogramme möglich. Denkbar ist die Unterstützung des Benutzers bei der Messung natürlicher Objekte, also nicht kooperativen aber strukturierten Zielen (z.B. Ecken und Kanten) mittels digitaler Bildauswertung. Im Bereich der Industrievermessung sind Applikationen vorstellbar, welche die selbständige Erfassung von Objektpunkten durch zwei oder mehrere Hängetachymeter in einem fest installierten Messsystem ermöglichen. Den größten Zeitaufwand bei der Vorbereitung einer Messung mit dem Hängetachymeter stellt die Kalibrierung des Neigungssensors dar. Eine Zeitersparnis in diesem Bereich ist nur möglich, wenn zur Überwachung der Stehachsenneigung des Tachymeters anstelle des externen Neigungssensors ein interner Neigungssensor verwendet werden würde. Dieser ließe sich durch eine Umschlagsmessung in sehr kurzer Zeit kalibrieren. Derartige Modifikationen am Tachymeter sind jedoch nur von Seiten des Herstellers möglich. Generell sollte es jedoch technisch möglich sein ein Hängetachymeter mit den gleichen Spezifikationen zu bauen wie ein herkömmliches Tachymeter. Das Konzept eines Tachymeters mit integriertem zweiachsigem Neigungssensor, welcher zugleich in aufrechter als auch hängender Position funktionsfähig ist, stellt der aus dieser Arbeit hervorgehende Patentantrag (DE102008060798.3) vor.

- [Ackermann 1984] ACKERMANN, F.: High Precision Digital Image Correlation. In: *Proceedings of the 39th Photogrammetric Week.* Stuttgart: Institute for Photogrammetry, 1984, S. 231–243
- [Ahn 1997] AHN, S. J.: Kreisförmige Zielmarke. In: 4. ABW Workshop. Esslingen: Technische Akademie, 1997
- [Allied Vision Technologies 2007] ALLIED VISION TECHNOLOGIES: *Documentation FireGrab*, 2007. V2.0.0
- [Allied Vision Technologies 2008] ALLIED VISION TECHNOLOGIES: AVT Guppy Technical Manual, 2008. V6.2.0
- [Bahnes 1990] BAHNES, H. H.:

 Halbleiter-Lasertechnik. Eine experimentelle
 Einführung. Franzis Verlag GmbH, 1990
- [Bayer 1992] BAYER, G.: Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen, Universität Stuttgart, Dissertation, 1992. – DGK-Reihe C398
- [Böckem 2001] BÖCKEM, B.: Development of a Dispersometer for the Implementation into Geodetic High-Accuracy Direction Measurement Systems, ETH Zürich, Dissertation, 2001. – IGP Mitteilung Nr. 73
- [Benčić 1990] BENČIĆ, D.: *Geodetski instrumenti*. Zagreb : Školska knjiga, 1990
- [Bethel 1997] BETHEL, J.: Least Squares Image Matching. 1997. – Purdue University
- [Blase 1970] BLASE, G.: Punktübertragung in Schächten. In: *Festschrift Otto Rellensmann 75 Jahre*, 1970, S. 91–97
- [Blessing 2000] BLESSING, P.: Digitale Autofokus- und Beleuchtungskontrolle in der Endoskopie., ETH Zürich, Dissertation, 2000. Nr. 13614
- [Bradski und Kaehler 2008] BRADSKI, G.; KAEHLER, A.; LOUKIDES, M. (Hrsg.): Learning OpenCV:

 Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly Media, 2008

- [Brandstätter 1989] BRANDSTÄTTER, G.: Das analytische Modell der videogestützten räumlichen Zielerfassung mit panfokalem Fernrohr. In: *Proceedings of first Conference on Optical 3-D Measurement Techniques Congress in Vienna/Austria*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 1989
- [Brückner 1979] Brückner, R.: Zur Szintillation bei terrestrischen geodätischen Messungen, Universität Hannover, Dissertation, 1979
- [Brunner 1979] BRUNNER, F. K.: Vertical Refraction Angle Derived from the Variance of the Angle-of-Arrival Fluctuations. In: TENGSTRÖM, E. (Hrsg.); TELEKI, G. (Hrsg.): Refractional Influences in Astrometry and Geodesy. Reidel Publishing, 1979, S. 227–238
- [Bryś 2002] BRYŚ, H.: Zur Geometrie der
 Deformationen von Gewichtstalsperren-Lamellen. In:
 Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 2 (2002),
 S. 50–56
- [Buchmann 1996] BUCHMANN, P.: Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1996. – DGK Reihe C456
- [Canny 1986] CANNY, J.: A Computational Approach to Edge Detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* PAMI-8 (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [Chrzanowski 1970a] CHRZANOWSKI, A.: New Laser instruments for engineering surveys. In: *Internationaler Kurs Ing.-Mess. hoher Präzision*. Graz, 1970
- [Chrzanowski 1970b] CHRZANOWSKI, A.: New Techniques in Mine Orientation Surveys. In: *The Canadian Surveyer* 1 (1970), S. 23–46
- [Cooper 1982] COOPER, M. A. R.: *Modern Theodolites* and Levels. Granada Publishing, 1982
- [David White 2009] DAVID WHITE: Juli 2009. URL http://www.davidwhite.com

- [Desiderio und Koch 1998] DESIDERIO, A.; KOCH, R.: Der Einfluss der Temperatur auf Kreiselazimute hoher Präzision / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. ETH Zürich, 1998 (281). – Forschungsbericht
- [Deußen 1999] DEUSSEN, D.: Meßverfahren zur Erfassung der Vertikalrefraktion unter Nutzung der atmosphärischen Turbulenz, Universtität Bonn, Dissertation, 1999
- [Deumlich und Staiger 2002] DEUMLICH, F.; STAIGER, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik.* 9. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2002
- [Dicke 1970] DICKE, W.: Untersuchungen über die optische Richtungsübertragung in Schächten, insbesondere in Blindschächten, mit Nivellierinstrument und Objektivprisma, TU Berlin, Dissertation, 1970
- [Donges 2007] DONGES, A.: *Physikalische Grundlagen der Lasertechnik*. Shaker Verlag, 2007
- [Dzierzega und Scherrer 2003] DZIERZEGA, A.;
 SCHERRER, R.: Messen mit elektronischen
 Tachymetern / Leica Geosystems AG. Heerbrugg,
 November 2003. Forschungsbericht
- [Ehlebracht 1964] EHLEBRACHT, H.: Untersuchungen zur optischen Lotung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 1964
- [Eichholz und Schnalle 1978] EICHHOLZ, K.; SCHNALLE, P.: Ein selbstvertikalisierender Lotlaser in schlagwettergeschützter Ausführung. In: Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 4 (1978), Nr. 85, S. 295–302
- [Fabiankowitsch 1990] FABIANKOWITSCH, J.: Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern, TU Wien, Dissertation, 1990
- [Farkas-Jandl 1986] FARKAS-JANDL, T.: Einführung in die Inertialvermessung. Karlsruhe: Herbert Wichmann Verlag, 1986
- [Foppe 2001] FOPPE, K.: Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken / Universität Hannover. 2001 (242).
 Forschungsbericht. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen

- [Freckmann 1932] FRECKMANN, W.: *Untersuchung über die Strahlenbrechung unter Tage*, RWTH Aachen, Dissertation, 1932
- [Förstner und Gülch 1987] FÖRSTNER, W.; GÜLCH, E.: A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners ans Centers of Circular Features. In: Proceedings of the ISPRS Intercommission Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data, 1987, S. 281–305
- [Fuhrland 2005] FUHRLAND, M.: Das Tachymeter-Aufsatzsystem ArgusTAT. In: *Der Vermessungsingenieur* 6 (2005), S. 200–204
- [Fuhrland 2006] FUHRLAND, M.: Bestimmung unterirdischer Punkte mit dem

 Tachymeter-Aufsatzsystem ArgusTAT. In: NIEMEYER,
 I. (Hrsg.); SROKA, A. (Hrsg.); WITTENBURG, R.
 (Hrsg.): 7. Geokinematischer Tag. Essen: Verlag
 Glückauf GmbH, Mai 2006 (Schriftenreihe des
 Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie),
 S. 387–394
- [Geißler 1992] GEISSLER, D.: Entwicklung markscheiderischer Meßverfahren in Kalischächten unter Berücksichtigung von Laserlotungen. In: *Das Markscheidewesen* 99 (1992), Nr. 1, S. 173–176. zugl. Dissertation Bergakademie Freiberg
- [Geitner 1969] GEITNER, J.: Optische Lotung mit dem Schachtlotprisma, TU Berlin, Dissertation, 1969
- [GeoTec 2002] GEOTEC: *PANDA für Windows Version 3.10*, August 2002. Gesellschaft für angewandte geodätische Technologien (Laatzen)
- [Glaus und Ingensand 2002] GLAUS, R.; INGENSAND, H.: Tunnel Surveys for New CERN Particle Accelerators. In: *FIG XXII International Congress*. Washington/USA, April 2002
- [Gottwald 1987] GOTTWALD, R.: Kern E2-SE Ein neues Instrument nicht nur für die Industrievermessung? In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 4 (1987), S. 147–153
- [Gröber u. a. 1955] GRÖBER, H.; ERK, S.; GRIGULL, U.: *Die Grundgesetze der Wärmeübertragung*. 3. Berlin: Springer Verlag, 1955
- [Grün 1985] GRÜN, A.: Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. In:

- South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography 14 (1985), Nr. 3, S. 175–187
- [Grün 1996] GRÜN, A.: Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: ATKINSON (Hrsg.): Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Caithness, UK: Whittles Publishing, 1996, S. 217–255
- [Grün und Huang 2001] GRÜN, A. (Hrsg.); HUANG,T. S. (Hrsg.): Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision. Berlin: Springer Verlag, 2001
- [Götze 1988] GÖTZE, H.-J.: Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics. In: *Geophysics* 53 (1988), S. 1096–1108
- [Guillaume und Bürki 2008] GUILLAUME, S.; BÜRKI, B.: Digital Astro-Geodetic on-line Observation System DAEDALUS. Geodesy and Geodynamics Lab, ETH Zurich: , 2008. – User Manual version 1.0
- [Heger 1992] HEGER, W.: Untersuchungen zum Einsatz inertialer Vermessungssysteme in "strapdown"-Technik bei der Schachtvermessung, Universität Hannover, Dissertation, 1992
- [Heinze 1996] HEINZE, O.: Aufbau eines operablen inertialen Vermessungssystems zur Online-Verarbeitung in der Geodäsie auf Basis eines kommerziellen Strapdown Inertialsystems, TU Darmstadt, Dissertation, 1996. – DGK Reihe C Heft 459
- [Heiskanen und Moritz 1967] HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H.: *Physikal Geodesy*. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1967
- [Hennes 1992] HENNES, M.: Leistungsmerkmale des One-Man-Systems Geodimeter 4000. In: Vermessungstechnische Rundschau (1992), Nr. 4+5, S. 287–295
- [Hennes u. a. 1999] HENNES, M.; DÖNICKE, R.; CHRIST, H.: Zur Bestimmung der temperaturgradienteninduzierten Richtungsverschwenkung beim Tunnelvortrieb. In: *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik* 8 (1999), S. 418–426
- [Hirt 2004] HIRT, C.: Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkamerasystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung, Universität Hannover, Dissertation, 2004

[Holtz 1968] HOLTZ, E.: Entwicklung eines

Laser-Nivelliersystems, RWTH Aachen, Dissertation,
1968

- [Hovenbitzer 2001] HOVENBITZER, M.: Zur

 Automation berührungsloser 3D-Objekterfassung im

 Nahbereich, TU Darmstadt, Dissertation, 2001. –

 DGK-Reihe C556
- [Hovenbitzer und Schlemmer 1997] HOVENBITZER,
 M.; SCHLEMMER, H.: A Line-Scanning
 Theodolite-Based System for 3D Applications in Close
 Range. In: GRÜN (Hrsg.); KAHMEN (Hrsg.):

 Proceedings of 4th Conference on Optical 3-D

 Measurement Techniques. Zürich: Herbert Wichmann
 Verlag, 1997, S. 339–345
- [Hüther 1967] HÜTHER, G.: Zur Genauigkeit und Genauigkeitsbestimmung der Ziellinienstabilisierung beim Präzisions-Zenitlot PZL des VEB Carl Zeiss JENA. In: *Vermessungstechnik* 15 (1967), Nr. 12, S. 451–453
- [Huep 1988] HUEP, W.: Konzeption und Einsatzmöglichkeiten eines automatisierten Theodolitsystems. In: X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, 1988, S. A13/1–A13/13
- [Ingensand 1985] INGENSAND, H.: Ein Beitrag zur Entwicklung und Untersuchung hochgenauer elektronischer Neigungsmesssysteme für kontinuierliche Messungen, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, 1985
- [Ingensand 2009] INGENSAND, H.: 2009. Persönliche Korrespondenz
- [Ingensand u. a. 1998] INGENSAND, H.; RYF, A.; STENGELE, R.: The Gotthard Base Tunnel a challenge for geodesy and geotechnics. In: *Symposium on geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*. Eisenstadt, 1998, S. 222–229
- [Intel Corporation 2001] INTEL CORPORATION: Open Source Computer Vision Library Reference Manual, 2001. – URL http://sourceforge.net/projects/opencylibrary. – Stand: 03/2009
- [Jacob 1973] JACOB, G.: Fehlereinflüsse bei der optischen Lotung. In: Vermessungstechnik 21 (1973), Nr. 6, S. 209–212

- [Jacob 1974] JACOB, G.: Zur Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit optischer Lotverfahren in der Baumeßtechnik mit besonderer Berücksichtigung der Refraktion an senkrechten ebenen Außenwänden. In: Vermessungstechnik 22 (1974), Nr. 8, S. 294–297. – zugl. Dissertation an der TU Dresden
- [Jacobs 1991] JACOBS, E.: Präzisionslotungen und Richtungsübertragungen mittels
 Zenitdistanzmessungen. In: Der Vermessungsingenieur 3 (1991), Nr. 42, S. 111–114
- [Jäger u. a. 2005] JÄGER, R.; MÜLLER, T.; SALER,
 H.; SCHWÄBLE, R.: Klassische und robuste
 Ausgleichungsverfahren Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern.
 Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2005
- [Juretzko 2004] JURETZKO, M.: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2004
- [Kahmen 1997] KAHMEN, H.: *Vermessungskunde*. 19. Berlin: Verlag Walter de Gruyter, 1997
- [Katrycz und Niemeier 2002] KATRYCZ, W.; NIEMEIER, W.: Potenzial und Leistungsfähigkeit von inertialen Meßsystemen in der Geotechnik. In: *Mitteilungen des IGB* TU Braunschweig (Veranst.), 2002, S. 199–208. – Fachseminar: Messen in der Geotechnik
- [Kessler und Fischer 2000] KESSLER, W.; FISCHER, J.: Analytical model of autofocus systems with CCD cameras. In: *Proceedings of SPIE, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial and Digital Photography Applications* Bd. 3965. San Jose, USA, 24-26 January 2000, S. 369–380
- [Klug 1993] Klug, C.: Schachtlotung und Richtungsübertragung nach unter Tage – Erprobung eines neuen Verfahrens, TU Wien, Diplomarbeit, 1993
- [Knoblach und Möser 2007] KNOBLACH, S.; MÖSER, M.: Untersuchungen zum Neigungsmesssystem Zeromatic. In: VDV magazin 57 (2007), Nr. 5, S. 364–366
- [Knorr 1989] KNORR, F.: Untersuchungen zur Einsetzbarkeit von Laserloten im Rahmen eines

- modernen Schachtkontrollmeβverfahrens, Bergakademie Freiberg, Dissertation, 1989
- [Korth 1997] Korth, W.: Bestimmung von Oberflächengeometrie, Punktbewegungen und Geoid in einer Region der Antarktis, TU Dresden, Dissertation, 1997
- [Köppke 1967] KÖPPKE, H.: Untersuchung des Präzisionszenitlotes PZL sowie von Zieleinrichtungen für Lotungsmessungen im FS- und UKW-Turm Berlin. In: Vermessungstechnik 5 (1967), Nr. 15, S. 175–177
- [Kratzsch 1975] KRATZSCH, H.: Vermessungstechnische Automationsverfahren und ihre markscheiderische Anwendung. In: Sonderheft: Deutscher Geodätentag. Köln, 1975, S. 174–186
- [Kratzsch 1962] Kratzsch, H.: Ein neues Verfahren zum Messen der Schiefstellung und Verformung von Schächten. In: *Glückauf* 98 (1962), S. 21–31
- [Kratzsch 1964] KRATZSCH, H.: Ein vereinfachtes Verfahren der optischen Richtungsübertragung. In: Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 71 (1964), S. 45–48
- [Kraus 1997] KRAUS, K.: Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. 6. Bonn : Dümmler Verlag, 1997 (Photogrammetrie)
- [Kraus 2004] KRAUS, K.: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7.Berlin: Walter de Gruyter Verlag, 2004 (Photogrammetrie)
- [Kubišta 1968] Kubišta, M.: Zur Refraktion in Schächten. In: *Vermessungstechnik* 16 (1968), Nr. 4, S. 149–153
- [Lautsch 1974] LAUTSCH, H.: Über den Einsatz eines Leitstrahl-Lasers als Laserlot. In: Schriftenreihe Lagerstättenerfassung und -darstellung, Bodenbewegungen und Bergschäden,
 Ingenieurvermessung RWTH Aachen (Veranst.), 1974,
 S. 203–212. Kolloquium Ingenieurvermessung
- [Lautsch und Thieme 1968] LAUTSCH, H.; THIEME, B.: Helium-Neon-Laser als Lichtquellen für Leitstrahlverfahren zur Richtungsangabe in Streckenvortrieben. In: *Glückauf* 13 (1968), S. 555–561

- [Leica Geosystems 2000] LEICA GEOSYSTEMS: *Nivel20*. Heerbrugg: , 2000. Gebrauchsanweisung
- [Leica Geosystems 2003a] LEICA GEOSYSTEMS: Leica TPS - System 1000. Heerbrugg: , 2003. – Gebrauchsanweisung
- [Leica Geosystems 2003b] LEICA GEOSYSTEMS:
 Leica TPS1100 Professional Series. Heerbrugg: , 2003.
 Gebrauchsanweisung
- [Leica Geosystems 2004] LEICA GEOSYSTEMS: *Sales Focus*. September 2004
- [Leonhardt und Lützenkirchen 1967] LEONHARDT, J.; LÜTZENKIRCHEN, K.: Laser im Bergbau. In: Glückauf-Forschungshefte 4 (1967), S. 209–220
- [Löffler u. a. 2002] LÖFFLER, F. u. a.; MÖSER, M. (Hrsg.); MÜLLER, G. (Hrsg.); SCHLEMMER, H. (Hrsg.); WERNER, H. (Hrsg.): *Maschinen- und Anlagenbau*. 2. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2002 (Handbuch Ingenieurgeodäsie)
- [Liao 1993] Liao, B.: Ein Beitrag zur Kamerafokussierung bei verschiedenen Anwendungen der Bildverarbeitung. Hamburg, Universität der Bundeswehr, Dissertation, 1993
- [Lipprandt 2008] LIPPRANDT, M.: Ausgewählte Segmentierungsverfahren. Proceedings Hauptseminar SS08. 2008
- [Luhmann 2003] LUHMANN, T.: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 2. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2003
- [Maas 1992] MAAS, H.-G.: Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeβtechnik, ETH Zürich, Dissertation, 1992
- [Maas 1997] MAAS, H.-G.: Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. Habilitationsschrift ETH Zürich. 1997
- [Marti u. a. 2004] MARTI, U.; SCHLATTER, A.; SCHÄTTI, I.: Lokale Schwerefeldstudien am AlpTransit Gotthard-Basistunnel. In: INGENSAND, H. (Hrsg.): XIV. Kurs für Ingenieurvermessung. Zürich, 2004, S. 283–288

- [Marti 1997] MARTI, U.: Geoid der Schweiz 1997 /
 Schweizerische Geodätische Kommission. 1997 (56). –
 Forschungsbericht. Geodätisch-geophysikalische
 Arbeiten in der Schweiz
- [Matthias 1961] MATTHIAS, H.: Umfassende
 Behandlung der Theodolitachsenfehler auf vektorieller
 Grundlage unter spezieller Berücksichtigung der
 Taumelfehler der Kippachse. Zürich: Leemann, 1961
 (Mitteilungen aus dem Geodätischen Institut der ETH
 Zürich 10)
- [Matthias 1991] MATTHIAS, H.: Der Robotertheodolit TOPOMAT - Technik, Anwendung und Auswirkung auf den Beruf. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik (1991), Nr. 8, S. 427–431
- [Mischke 2000] MISCHKE, A.: Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, TU Wien, Dissertation, 2000
- [Moonen 1955] MOONEN, J. G. D.: Die Anwendung des Alignierverfahrens bei Orientierungsmessungen. In: Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 62 (1955), S. 117–127
- [Morlot 1989] MORLOT, J.: Méthode et construction du line fixe transmanche méthodes et instruments topométriques. In: *X,Y,Z-Association Française de Topographie* 40 (1989), Juillet, S. 13–20
- [Möser u. a. 2000] MÖSER, M. u. a.; MÖSER, M. (Hrsg.); MÜLLER, G. (Hrsg.); SCHLEMMER, H. (Hrsg.); WERNER, H. (Hrsg.): *Grundlagen*. 3. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2000 (Handbuch Ingenieurgeodäsie)
- [Neuhierl und Foppe 2004] NEUHIERL, T.; FOPPE, K.: Anwendungen inertialer Messsysteme in der Ingenieurgeodäsie. In: Kinematische Messmethoden – Vermessung in Bewegung. Stuttgart: 58. DVW Seminar, 2004
- [Niederöst und Maas 1996] NIEDERÖST, M.; MAAS, H.-G.: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken. In: Tagungsband der 16. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. Oldenburg, 1996, S. 55–62

- [Niemeier 2002] NIEMEIER, W.:

 Ausgleichungsrechnung. Berlin: Walter de Gruyter Verlag, 2002
- [Niese 2002] NIESE, J.: Entwicklung und Einsatz einer kreiselgestützten Vermessung mit inertialen Sensoren im Spezialtiefbau, Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2002
- [Nischwitz u. a. 2007] NISCHWITZ, A.; FISCHER, M.; HABERÄCKER, P.: Computergrafik und Bildverarbeitung. 2. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2007
- [Nixon und Aquado 2007] NIXON, M.; AQUADO,A. S.: Feature Extraction & Image Processing. 2.Academic Press, 2007
- [Palm 1981] PALM, H. J.: Vereinfachte Strebmessung mit dem Hängetheodolit. In: *Das Markscheidewesen* 88 (1981), Nr. 3, S. 386–388
- [Pedrotti u. a. 2007] PEDROTTI, F. L.; PEDROTTI, L. S.; BAUSCH, W.; SCHMIDT, H.: Optik für Ingenieure: Grundlagen. 4. Berlin: Springer Verlag, 2007
- [Pilgram 1992] PILGRAM, R.: Berücksichtigung der aktuellen Wetterbedingungen bei untertägigen elektronischen Präzisionsdistanzmessungen. In: Das Markscheidewesen 99 (1992), Nr. 3, S. 261–265
- [Rapp 1997] RAPP, R. H.: Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly / geoid undulation difference. In: *Journal of Geodesy* 71 (1997), S. 282–289
- [Roic 1996] ROIC, M.: Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, TU Wien, Dissertation, 1996
- [Ryf u. a. 2000] RYF, A.; HAAG, R.; SCHÄTTI, I.: AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingenieurgeodätische Aspekte. In: SCHNÄDELBACH (Hrsg.); SCHILCHER (Hrsg.): XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München. Stuttgart: Wittwer Verlag, 2000
- [Rymarczyk 1990] RYMARCZYK, H.: Refraktionseinfluss auf Laserlote in Schächten. In: Das Markscheidewesen 97 (1990), S. 391–395

- [Scherer 2001] SCHERER, M.: Berührungslose
 Erfassung geometrischer und bildhafter Bauwerksdaten.
 In: WEFERLING (Hrsg.); HEINE (Hrsg.); WULF
 (Hrsg.): Vom Handaufmass bis High Tech —
 Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung.
 Mainz: Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 88–94. —
 Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen
 Universität Cottbus
- [Schirmer 1994] SCHIRMER, W.: Universaltheodolit und CCD-Kamera ein unpersönliches Messsystem für astronomisch-geodätische Beobachtungen, TU Wien, Dissertation, 1994. DGK-Reihe C427
- [Schmidt 1963] SCHMIDT, G.: Die Vermessung von Schächten nach dem SVP-Verfahren. In: *Mitteilungen aus dem Markscheidewesen* 70 (1963), S. 89–97
- [Schneider 2008] SCHNEIDER, D.: Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten, TU Dresden, Dissertation, 2008
- [Schneider 1937] SCHNEIDER, W.: Die Richtungsübertragung mittels optischer Ebenen – Ein neuer optischer Richtloter von Zeiß. In: *Mitteilungen aus dem Markscheidewesen* 48 (1937), S. 159–196
- [Schobert 1998] SCHOBERT, U.: Marktstudie zu Sensoren für Neigungsmesser zur Objektüberwachung im Rheinischen Braunkohlerevier, TU Darmstadt, Diplomarbeit, 1998
- [Schätti und Ryf 2004] SCHÄTTI, I.; RYF, A.: Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. In: Ingenieurvermessung 2004 -14th International Conference on Engineering Surveying. Zürich, 2004
- [Schubernigg 1990] SCHUBERNIGG, M.:

 Testmessungen und Genauigkeitsuntersuchungen mit dem digitalen Nivellier WILD NA2000, TU Wien,
 Diplomarbeit, 1990
- [Schwarz u. a. 1990] SCHWARZ, K. P.; KNICKMEYER, E. H.; MARTELL, H.: The Use of Strapdown Technology in Surveying. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 97 (1990), Nr. 8–9, S. 309–317

- [Stahlberg 1997] STAHLBERG, C.: Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. In: Zeitschrift für Vermessungswesen 122 (1997), Nr. 5, S. 225–235
- [Stelling und Thiemann 1983] STELLING, W.;
 THIEMANN, K. P.: Punkt- und Richtungsübertragung mit elektrooptischen Detektoren. In: *Das Markscheidewesen* 90 (1983), Nr. 3, S. 266–270
- [Stier 1957] STIER, K.-H.: Ein verbessertes Verfahren zur Schachtvermessung mit Hilfe polarisierten Lichtes. In: Glückauf 93 (1957), S. 644–647
- [Stier 1963] STIER, K.-H.: Verzeichnis des einschlägigen Schrifttums über den Vermessungskreiselkompaß und die Schachtvermessung. In: Mitteilungen aus dem Markscheidewesen 70 (1963), S. 143–151
- [Stier u. a. 1978] STIER, K.-H.; SCHMIDT, G.; RYMARCZYK, H.: Überblick über 25 Jahre markscheiderisch-physikalische Vermessungstechnik. In: *Mitteilungen aus dem Markscheidewesen* 4 (1978), Nr. 85, S. 227–258
- [Straßburg 1956] STRASSBURG, L.: Optische Punktabseigerung und optische Richtungsübertragung in Schächten. In: *Glückauf* (1956), S. 1233–1243
- [Swain und Ballard 1991] SWAIN, M. J.; BALLARD, D. H.: Color Indexing. In: *International Journal of Computer Vision* 7 (1991), 11, Nr. 1, S. 11–32. – URL http://www.cs.rochester.edu/u/dana/Swain1.pdf
- [Torge 1989] TORGE, W.: *Gravimetry*. Berlin New York : Walter de Gruyter Verlag, 1989
- [Torge 2003] TORGE, W.: *Geodäsie*. 2. Berlin : Walter de Gruyter Verlag, 2003
- [Uffenkamp 1995] UFFENKAMP, V.: Konzeption, experimentelle Realisierung und Kalibrierung einer optoelektronischen Schwenk-Neige-Kamera mit langer Brennweite, TU München, Dissertation, 1995
- [Wagner 2003] WAGNER, C.: Mehrgewichtslotung im Schacht Sedrun – Einsatz beim Projekt Gotthard-Basistunnel. In: DEUTSCHER MARKSCHEIDER-VEREIN E.V. (Hrsg.): Wissenschaftliche Schriftenreihe im Markscheidewesen

- Heft 19 Technische Universität Clausthal (Veranst.),
 2003
- [Wagner 1964] WAGNER, E.: Erfahrungen bei der Verwendung des Hängetheodolits Theo 6.1 für markscheiderische Arbeiten in den Entwässerungsstrecken des Braunkohlentagebaues. In: Vermessungstechnik 12 (1964), Nr. 3, S. 81–84
- [Walser 2004] WALSER, B. H.: Development and calibration of an image assisted total station, ETH Zürich, Dissertation, 2004. – Diss. ETH No. 15773
- [Wenzel 1985] WENZEL, H.-G.: Hochauflösende Kugelfunktionsmodelle für das Gravitationspotential der Erde / Uni Hannover. 1985 (137). – Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen
- [Werner 1970] WERNER, H.: Der Einfluß von Stauspiegelschwankungen auf mechanische Lotmessungen in Staumauern. In: Vermessungstechnik 18 (1970), Nr. 10, S. 370–372
- [Werner 1973] WERNER, H.: Alignements- und Lotungsvermessungen in der Bauwerksüberwachung ihre besondere Stellung und Weiterentwicklung. In: Vermessungstechnik 21 (1973), Nr. 6, S. 172–174
- [Wester-Ebbinghaus 1988a] WESTER-EBBINGHAUS,W.: Analytics in non-topographic Photogrammetry. In: *ISPRSCongress* Bd. 27. Kyoto, 1988, S. 380–390
- [Wester-Ebbinghaus 1988b] WESTER-EBBINGHAUS, W.: High Resolution Object Recording by Video-Theodolite. In: *ISPRS-Congress* Bd. 27. Kyoto, 1988, S. 219–223
- [Westfeld 2005] WESTFELD, P.: Entwicklung von Verfahren zur räumlichen und zeitlich aufgelösten 2D-Bewegungsanalyse in der Glaziologie, TU Dresden, Diplomarbeit, 2005
- [Wild] WILD: Zenit- und Nadirlot. Heerbrugg: . Gebrauchsanweisung
- [Wild 1989] WILD: *Videotheodolit TM3000V*. Heerbrugg: , 1989. Gebrauchsanweisung
- [Willson und Shafer 2001] WILLSON, R. G.; SHAFER, S. A.: Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision. Kap. Modeling and Calibration of Variable-Parameter Camera Systems, S. 137–162. Berlin: Springer Verlag, 2001

[Witte und Schmidt 2006] WITTE, B.; SCHMIDT, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 5. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2006

- [Wunderlich 1995] WUNDERLICH, T.: Schräglotung mit dem Theodolit. In: *Neue Technologien in der Geodäsie* TU Istanbul (Veranst.), Oktober 1995. Türkisch-Österreichische Geodätische Tage
- [Wunderlich 1996] WUNDERLICH, T.: Theorie und Anwendung der Schräglotung. In: *Vermessung und Raumordnung* Bd. XX. Bonn, 1996
- [Wunderlich und Neuhierl 2005] WUNDERLICH, T.; NEUHIERL, T.: Erfahrungen mit einem hochwertigen Inertialmeßsystem im ingenieurgeodätischen Einsatz. In: *Internationale Geodätische Woche*. Obergurgl (Österreich), 2005
- [Zaki 1963] ZAKI, M.: Untersuchungen über die systematischen Fehler an der Schachtlotung bei Staumauern, ETH Zürich, Dissertation, 1963. Prom. Nr. 3435
- [Zingg 1965] ZINGG, W.: Verformungsmessungen in der Felsunterlage der Staumauer Albigna (Schweiz). In: *Bauzeitung* 42 (1965)