

# Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Andreas Rietdorf

von der Fakultät VI - Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig  
Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke  
Prof. Dr.-Ing. Olaf Hellwich

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Dezember 2004

Berlin 2005

D 83



## Kurzfassung

Das Aufgaben- und Anwendungsspektrum der geodätischen Mess- und Auswertetechniken umfasst neben den Bereichen Liegenschaftsvermessung, Erdmessung, Photogrammetrie und Fernerkundung auch den Bereich der Ingenieurvermessung. Die Ingenieurvermessung setzt sich mit Fragestellungen auf den Gebieten der Aufnahme, Absteckung und Überwachung von Bauwerken und anderen Objekten auseinander, vgl. [DIN, 1998] und [Möser u. a., 2000]. Die in dieser Arbeit angesprochenen und diskutierten Algorithmen und Lösungsansätze sind hauptsächlich im Aufgabenbereich der Aufnahme, d. h. der vermessungstechnischen Erfassung von geometrischen Größen des Ist-Zustandes eines Objektes [DIN, 1986], anzusiedeln. Zu den auf diesem Gebiet vorhandenen Kernkompetenzen gehören neben den Auswertetechniken auch der Einsatz und die Entwicklung moderner Messverfahren.

Die in den letzten Jahren verstärkt in die geodätische Praxis eingeführten scannenden Messsysteme mit polarem Messprinzip, unter die im weitläufigen Sinne alle tachymetrischen Messgeräte, Laserradar und terrestrische Laserscanner fallen, eignen sich im Gegensatz zu herkömmlichen Aufnahmetechniken für eine sehr schnelle Vermessung von einzelnen Objekten, Strukturen und ganzen Bauwerken. Bei der mitunter nur wenige Minuten andauernden Datenerfassung müssen die aufzunehmenden Objekte, wie bei den photogrammetrischen Aufnahmetechniken, nicht zugänglich sein. Die scannenden Instrumente sind jedoch in der Lage, Datenerfassungsraten von  $> 1000$  diskreten Punkten pro Sekunde zu gewährleisten.

Neben der Einführung in die Technologie scannender polarer Messsysteme beschäftigt sich die Arbeit mit der Entwicklung geeigneter Algorithmen zur Beschleunigung des Mess- und Auswerteprozesses. Dabei werden spezielle Aspekte in den Teilbereichen der strukturierten Geometriedatenerfassung und der Verknüpfungproblematik einzelner Instrumentenstandpunkte im Kontext der Kalibrierung scannender polarer Messsysteme mit tachymetrischem Messprinzip behandelt.

Als ein zeitraubender Faktor bei der Auswertung von Daten scannender Messsysteme sind die Standpunktverknüpfungen anzusehen, die zur Vereinheitlichung der Messdaten verschiedener Instrumentenstandpunkte in einem übergeordneten System herangezogen werden. Bei Nutzung des in dieser Arbeit beschriebenen Verfahrens lässt sich eine Reduktion der benötigten Auswertezeit erreichen. Durch eine automatisierte Extraktion von Ebenen aus den Punktwolken und einer nachfolgenden Zuordnung der Identitäten durch ein automatisches Verfahren unter Nutzung der algebraischen projektiven Geometrie können die so bereitgestellten Ebenen zur standpunktweisen verketteten Systemtransformation von verschiedenen Instrumentenstandpunkten herangezogen werden. Eine zusätzliche Markierung und nachfolgende Vermessung von Passpunkten kann somit entfallen.

Die Entwicklung eines geeigneten Kalibrierverfahrens für scannende polare Messsysteme mit tachymetrischem Messprinzip ist ein zweiter zentraler Punkt dieser Arbeit. Der Bestimmung von systematischen Abweichungen und von Genauigkeitsangaben für die verschiedenen integrierten Sensoren ist ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit gewidmet. Dabei wird durch Erweiterung bestehender Kalibrierverfahren der Weg zu einer Systemkalibrierung eingeschlagen. Aufbauend auf die Algorithmen der Standpunktverknüpfung wird ein Kalibrierverfahren vorgestellt, welches identische Ebenen nutzt und unter Zuhilfenahme der Algorithmen der Ausgleichsrechnung Kalibrierparameter und Abschätzungen zur Genauigkeit der verwendeten Messinstrumente liefert. Die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des Kalibrieransatzes werden anhand von Messwerten zweier verschiedener Laserscanner untersucht und abschließend bewertet.

## Summary

The tasks and application range of geodetic surveying and evaluation techniques cover real estate property surveying, earth measurement, photogrammetry and remote sensing, as well as the field of engineering surveying. Engineering surveys are concerned with questions in the areas of the recording, mapping and monitoring of buildings and other objects. In addition to the data evaluation techniques, the use and development of modern measurement procedures for acquisition are also fundamental in this field.

Unlike conventional photo techniques, the scanning measuring systems based on polar measuring principles introduced to geodetic surveying practice within the past few years are suitable for the very fast measurement of individual objects, structures and whole buildings. The objects to be measured must not be accessible for the few minutes of continuous data acquisition, as they should be in the case of photogrammetric recording techniques. The scanning instruments are able, however, to ensure data acquisition rates of over 1000 discrete points per second.

In addition to the introduction to the technology of scanning polar measuring systems, this work deals with the development of suitable algorithms for the acceleration of the measurement and evaluation process. In the context of the calibration of scanning polar measuring systems with tachymetric measuring principles, special aspects are considered in the sub-field of structured geometry data acquisition, and the difficulties in combining sets of data from individual instrument points of view.

The combination of the readings from different instrument points of view in a standard primary system can be seen as a time-consuming factor in the evaluation of data from scanning measuring systems. Through the use of the procedure described in this work a reduction of the required evaluation time can be reached. By an automated extraction of iso-levels from the point clouds and a subsequent automatic assignment of the identities using projective transformations, the resulting iso-levels can be inspected with respect to the linked system instrument points of view. The additional marking and subsequent measurement of reference points can therefore be avoided.

The development of an appropriate calibration method for scanning polar measuring systems based on tachymetric measuring principles is a second central point of this work. Special attention is given in this work to the regulation of systematic deviations and the precision details of the various integrated sensors. A system calibration method based on an extension of existing calibration procedures is proposed. Building on the point connection algorithms, a calibration method is introduced. This uses iso-levels and the help of the adjustment algorithm to estimate calibration parameters, as well as the precision of the measuring instruments. In conclusion, the efficiency and bounds of the calibration approach are examined and evaluated using measurements from two different laser scanners.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	7
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Scannende polare Messsysteme</b>	<b>11</b>
2.1	Distanzmessung . . . . .	12
2.1.1	Impulslaufzeitverfahren . . . . .	12
2.1.2	Phasendifferenzverfahren . . . . .	12
2.2	Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung . . . . .	14
2.2.1	Winkeldefinitionen . . . . .	14
2.2.2	Räumliche Abtastung mittels tachymetrischem Messprinzip . . . . .	15
2.2.3	Alternative Abtastverfahren . . . . .	17
2.3	Laserscanner . . . . .	18
2.3.1	Messprinzip und Unterscheidungsmerkmale . . . . .	18
2.3.2	Charakteristische Kenngrößen . . . . .	20
2.4	Entwicklung eines low cost – Laserscanners . . . . .	22
2.4.1	Systembeschreibung . . . . .	23
2.4.2	Aufbau . . . . .	23
2.5	Diskussion . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Messdatenverarbeitung und Ableitung strukturierter Geometriedaten</b>	<b>26</b>
3.1	Einführung . . . . .	26
3.2	Triangulierung . . . . .	27
3.2.1	Delaunay-Triangulierung . . . . .	28
3.2.2	Triangulierung polarer Messdaten . . . . .	29
3.3	Segmentierung . . . . .	30
3.3.1	Allgemeines . . . . .	30
3.3.2	Methoden zur automatischen Ebenendetektion . . . . .	32
3.3.3	Optimale Schätzung ebener Regionen . . . . .	35
3.4	Zuordnung von homologen Ebenen . . . . .	39
3.4.1	Manuelle Zuordnung der Ebenen . . . . .	39
3.4.2	Automatisches Verfahren . . . . .	40
3.5	Diskussion . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Standpunktverknüpfungen</b>	<b>47</b>
4.1	Mathematische Grundlagen . . . . .	48
4.1.1	Koordinatentransformation . . . . .	48
4.1.2	Translation . . . . .	48
4.1.3	Rotation . . . . .	48
4.2	Verfahren zur Standpunktverknüpfung . . . . .	51
4.2.1	Orientierung . . . . .	51
4.2.2	Registrierung . . . . .	52
4.3	Verkettete Systemtransformation mittels identischer Ebenen . . . . .	53
4.3.1	Prinzip der verketteten Transformation . . . . .	54
4.3.2	Geometrische Beschreibung . . . . .	54
4.3.3	Näherungswertbestimmung . . . . .	55
4.3.4	Hauptausgleichung . . . . .	57
4.3.5	Testdatensätze . . . . .	61
4.3.6	Vergleich mit anderen Transformationsverfahren . . . . .	64
4.4	Diskussion . . . . .	66

<b>5 Kalibrierstrategie</b>	<b>67</b>
5.1 Ansätze zur Bestimmung von Genauigkeiten und Instrumentenfehlern . . . . .	67
5.1.1 Abhängigkeit vom Auftreffwinkel und Oberflächenbeschaffenheit . . . . .	67
5.1.2 Vergleich mit Referenzstrecken . . . . .	69
5.2 Kalibrierung im Testfeld . . . . .	70
5.2.1 Allgemeines Fehlermodell . . . . .	70
5.2.2 Modellierung der Instrumentenfehler . . . . .	74
5.3 Parameterschätzung . . . . .	77
5.3.1 Modellbildung . . . . .	77
5.3.2 Datumsverfügung . . . . .	79
5.3.3 Genauigkeit und Zuverlässigkeit . . . . .	79
5.3.4 Hypothesentests . . . . .	79
5.3.5 Varianzkomponentenschätzung . . . . .	80
5.4 Simulation von Instrumentenfehlern . . . . .	80
5.5 Testumgebung . . . . .	81
5.6 Ablauf einer Kalibrierung . . . . .	84
5.7 Ergebnisse . . . . .	86
5.8 Erweiterung der Kalibrierstrategie . . . . .	90
5.9 Diskussion . . . . .	93
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>94</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>96</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>105</b>
<b>Danksagung</b>	<b>106</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>107</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die von Menschen geschaffenen und sie umgebenden Bauwerke verschiedenster Art, wie Gebäude, Industrieanlagen u. ä., müssen aus den unterschiedlichsten Gründen im Bestand erfasst und dokumentiert werden. Dabei muss die Vermessung in Abhängigkeit des Verwendungszweckes der späteren Produkte in verschiedenen Abstraktionsgraden vorgenommen werden. Bei Zunahme des Detaillierungsgrades der Bestandserfassung wird die Aufnahme immer kostenintensiver [Bruhnke, 2003]. Über die Bauabnahme im Zuge eines Neubaus und das Aufmaß zu Dokumentationszwecken von historisch sowie kulturell wertvollen Gebäuden im Bereich der Denkmalpflege hinaus, ist mitunter eine teils zeitkritische Dokumentation von Schäden an Bauwerken durch Unfälle oder Katastrophen gefordert.

Zusätzlich zu diesen Aufgabenstellungen steigt der Bedarf an schnellen Nahbereichs-Messverfahren aufgrund der ständig steigenden Anforderungen an Qualitätsüberprüfungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen in allen Bereichen der industriellen Produktion. Die dort eingesetzten Verfahren unterscheiden sich in Abhängigkeit vom Anwendungsspektrum hinsichtlich des Messaufwandes, des Messvolumens und der zu erreichenden Genauigkeitsanforderungen. Stellvertretend seien die Industriebranchen Automobilbau, Flugzeug- und Schiffbau sowie der allgemeine Ingenieurbau genannt. Automatische und berührungslose 3D-Messverfahren sind aus diesen Bereichen der industriellen Fertigung nicht mehr wegzudenken, aber auch in den Bereichen Architektur, Medizin und Forschung steigen die Ansprüche an ein Qualitätsmanagement auf Grundlage geometrischer Informationen zusehends.

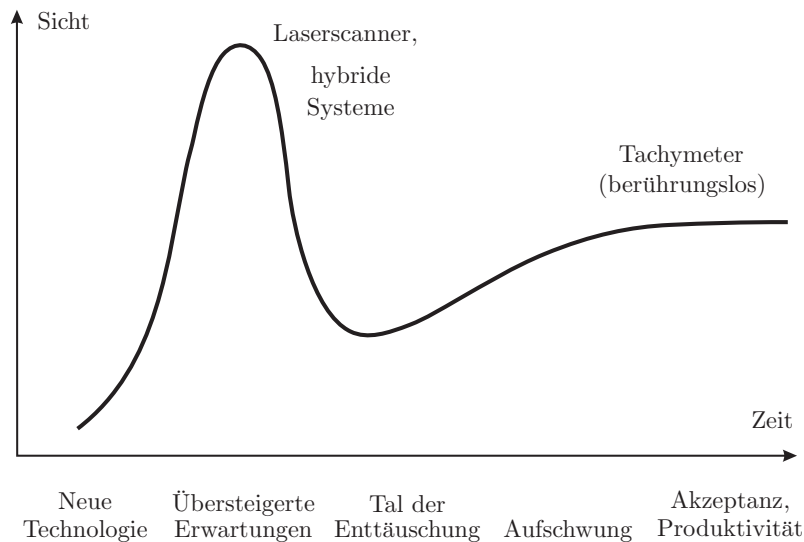
Neben diesen Anwendungen ist in den letzten Jahren verstärkt die Einführung von Gebäude-Management- oder Facility-Management-Systemen diskutiert worden, die bis heute jedoch noch keine breite Akzeptanz in der Wirtschaft gefunden haben [Kahlen, 2001]. Die Erfassung im Rahmen einer Bauaufnahme bzw. die Verarbeitung der Geometriedaten von Gebäuden, Gebäudeteilen oder Anlagen stellt unter dem Aspekt der Einführung eines derartigen Informationssystems einen entscheidenden Beitrag zur Nutzung dieser Systeme dar, da durch das Aufmaß ein Raumbezug zu den Attributen der Gebäudeteile hergestellt wird [Gielsdorf und Gründig, 2002].

Die Bereitstellung und Aufbereitung der Geometriedaten für die oben genannten Anwendungen ist ein klassisches Aufgaben- und Betätigungsfeld für Vermessungsingenieure. Zur Datenerfassung sind seit einigen Jahren neben den photogrammetrischen Verfahren die etablierten Totalstationen und reflektorlos messende Tachymeter am Markt präsent. Diese Instrumente sind durch das Erfassen von diskreten Einzelpunkten gekennzeichnet, zu denen der Beobachter manuell oder computerunterstützt die Auswahl, Anzielung und Messwertregistrierung durchführen muss.

Mit dem Auftauchen der ersten kommerziellen terrestrischen Laserscanner 1998 [Jacobs, 2004] sollte dieses in der geodätischen Praxis bewährte Messkonzept ad acta gelegt und, glaubt man den Herstellern, eine neue Ära der Datenerfassung eingeleitet werden. Unbestreitbar sind sicherlich die vielfältigen Vorteile der scannenden Messinstrumente: Neben der hohen Punktdichte bei der Messung ist diese Technologie durch eine hohe Datenerfassungsrate gekennzeichnet. Die Erfassung erfolgt dabei flächenhaft, die Ergebnisse sind nahezu in Echtzeit in drei Dimensionen verfügbar, und die Punktdichte ist so hoch, dass nicht selten ein photorealistischer Eindruck bei Betrachtung der Messergebnisse entsteht.

Die Ansprüche und die damit verbundenen Wünsche der potentiellen Anwender an diese neuartige Technologie sind seit dem Markteintritt der ersten terrestrischen Laserscanner sehr hoch gesteckt und sind es bis heute geblieben. Dabei wird das Laserscanning manchmal als erneute Revolution auf dem Vermessungssektor betrachtet, ähnlich den Errungenschaften, die GPS in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts gebracht hat. Allerdings liegen für kommerziell verfügbare Instrumente noch keinerlei Informationen und wenig Erfahrungen über Genauigkeiten und Leistungsfähigkeiten vor, die über die Angaben der jeweiligen Hersteller hinausgehen. Aus diesem Grund sind Verfahren zur Überprüfung und Beurteilung der Messwerte zu entwickeln, um herstellerunabhängige Aussagen über die Messgenauigkeiten zu erhalten. Die Beschreibung methodischer Vorgehensweisen und die Entwicklung von Ansätzen zur Kalibrierung und Genauigkeitsuntersuchungen von scannenden Systemen sind deshalb zur Zeit Thema aktueller Forschungsvorhaben und wissenschaftlicher Arbeiten, und dies nicht zuletzt, um die Akzeptanz dieser Technologie zu erhöhen.

Anhand des in Abbildung 1.1 dargestellten GARTNER's Hype Cycle lässt sich die zeitliche Abfolge von der Einführung einer neuen Technologie bis hin zum produktiven Einsatz in fünf Etappen beschreiben: Nach Einführung einer neuen Technologie wird diese zunächst verzögert wahrgenommen, die Erwartungen steigen ins Unermessliche. Darauf folgt die Enttäuschung, die wiederum einen Aufschwung, diesmal langsamer und realistischer, bis zur Akzeptanz und Produktivität nach sich zieht. Die Technologie des terrestrischen Laserscannings befindet sich zur Zeit, nicht zuletzt auf Grund der hohen Investitionskosten, im Bereich der übersteigerten Erwartungen. Dies trifft gleichermaßen auch auf hybride Messsysteme zu, die verschiedenartige Sensoren vereinigen und gegebenenfalls sogar in einem Gehäuse integrieren. Derartige Systeme kombinieren unterschiedliche Messverfahren, beispielsweise das Laserscanning mit der bildgebenden photogrammetrischen Aufnahme. Die berührungslos messende Tachymetrie hingegen hat sich fest in der Praxis etabliert.



**Abb. 1.1:** GARTNER's Hype Cycle [Gartner, Inc., 2003] adaptiert auf scannende polare Messsysteme.

Neben den Überprüfungen zur Messgenauigkeit und Ableitung von Kalibrierparametern ist der Grad der Automatisierung ein zentraler Punkt bei der Datenerfassung sowie den anschließenden Datenaufbereitungen und Modellierungen, da heutzutage die Effizienz eines Vermessungs- oder Auswerteverfahrens hieran gemessen wird. Dies gewinnt bevorzugt an Bedeutung bei der Herstellung und Überprüfung von Produktions-, Industrie- und Konsumgütern, aber auch bei der Geometrieaufnahme im Rahmen von Bauwerkserrichtungen und -überwachungen. Aus diesem Grund müssen die Bestrebungen dahingehend intensiviert werden, die Automatisierung der Prozesse von der Datenerfassung bis zur Modellierung voranzutreiben.

Die vorliegende Arbeit greift die genannten Gedanken wieder auf und soll somit einen Baustein zur Beschleunigung, Vereinfachung und Transparenz der Auswerte- und Kalibrierprozesse bei der Nutzung von scannenden Messsystemen liefern.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

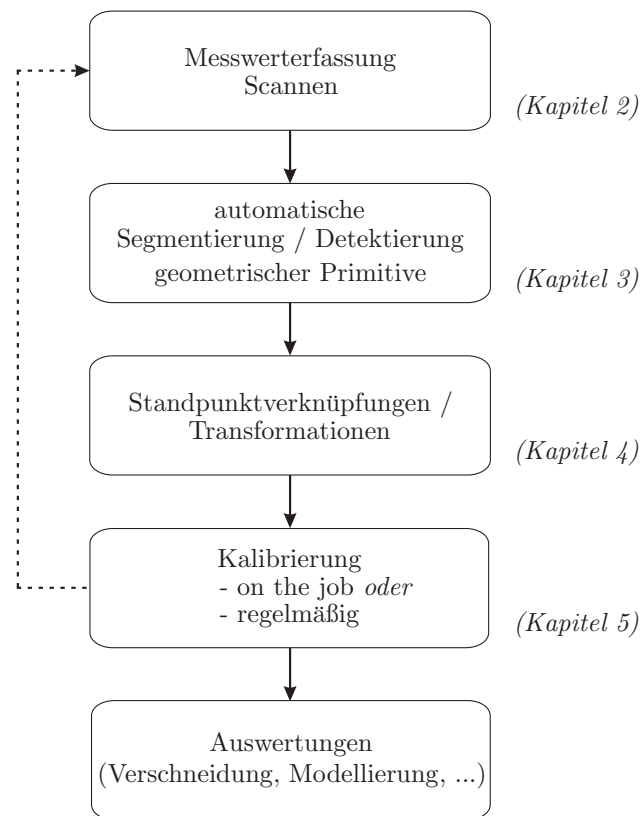
In Abbildung 1.2 wird der prinzipielle Aufbau dieser Arbeit aufgezeigt. Zunächst wird in **Kapitel 2** eine Einführung zu scannenden polaren Messsystemen gegeben. Diese Instrumente sind durch eine Messdatenerfassung gekennzeichnet, die durch die Erfassung zweier Richtungen bzw. Winkel zur Bestimmung der Raumrichtung und einer Raumstrecke gekennzeichnet sind. Dabei können die Messsysteme an der Lotrichtung orientiert sein, aber auch eine unabhängig von der Lotrichtung gewählte Orientierung der Messsysteme ist möglich. Zu diesen Messinstrumenten gehören elektronische Tachymeter, Laserscanner und das Laserradar. Ebenfalls in diesem Kapitel werden die Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Distanz vorgestellt, und es wird ein Überblick über den Stand der Technik der scannenden polaren Messsysteme gegeben.

Die Datenerfassung und die zur Auswertung verwendeten Methoden und Algorithmen unterscheiden sich bei der Anwendung scannender Messverfahren grundsätzlich von denen der konventionellen Messung mittels tachymetrischer Verfahren. Bei der Nutzung von Tachymetern erfolgt die Modellbildung sozusagen im Kopf des Beobachters vor oder während der Messwerterfassung, da nur einige wenige und repräsentative Punkte



ausgewählt und erfasst werden. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz von scannenden, automatisch messenden Systemen zu einer flächenorientierten Arbeitsweise, da das aufzunehmende Objekt mit einem regelmäßigen Raster nicht klassifizierter Punkte überzogen wird. In **Kapitel 3** werden die Grundlagen der Datenaufbereitung und Messdatenverarbeitung für scannende Messverfahren vorgestellt und die automatische Ableitung von strukturierten Geometriedaten am Beispiel von Ebenen gezeigt. Diese automatisch abgeleiteten Ebenen liegen nach dem Modellierungsprozess in einem lokalen Instrumentenkoordinatensystem vor und verfügen über einen eindeutigen Identifikator, der sich aber nur auf das jeweilige lokale Standpunktkoordinatensystem bezieht. Für die Zuordnung identischer Ebenen auf den verschiedenen Instrumentenstandpunkten wird ein automatisches Verfahren basierend auf Methoden der projektiven Geometrie und automatischer Suchstrategien vorgestellt und anhand von Beispieldatensätzen verifiziert.

Durch die automatisierte Zuordnung homologer Ebenen ist die Möglichkeit gegeben, die zur vollständigen Aufnahme und Modellierung benötigten Standpunktverknüpfungen der einzelnen lokalen Instrumentenstandpunkte durchzuführen. Neben der Analyse der zurzeit in der Praxis üblichen Herangehensweise über die Ableitung von Passpunkten aus modellierten Kugelzentrumskoordinaten, Zielmarken oder reflektierenden Zielzeichen wird in **Kapitel 4** ein Verfahren zur Standpunkttransformation vorgestellt, das basierend auf einer verketteten Systemtransformation mittels identischer Ebenen beliebig viele verschiedene lokale Instrumentenstandpunkte bzw. -koordinatensysteme in ein gemeinsames System transformiert.



**Abb. 1.2:** Verarbeitungsschritte im Rahmen der Messwernerfassung, Auswertung und Kalibrierung.

Der Überprüfung und Bewertung von Genauigkeitsangaben für die in der Praxis eingesetzten Sensoren kommt eine große Bedeutung zu. Regelmäßige Geräteuntersuchungen und Instrumentenkalibrierungen sind erforderlich, um die Genauigkeitsforderungen auch für abgeleitete Produkte der scannenden Messverfahren einhalten zu können. In **Kapitel 5** wird eine Kalibrierstrategie für scannende Messverfahren mit tachymetrischem Messprinzip vorgestellt, welche die typischen Instrumentenfehler (verschiedene Achsfehler, Nullpunktkorrektur und zusätzliche Kalibrierparameter) in einer gemeinsamen Systemkalibrierung bestimmt.

Generell muss zwischen zwei Kalibrierstrategien unterschieden werden – einer *on the job* Kalibrierung, bei der die relevanten Instrumentenparameter im Zuge der Auswertung projektbezogen ermittelt werden, und einer eigenständigen Bestimmung von Kalibrierparametern, die idealerweise in *regelmäßigen* Intervallen erfolgen sollte. Das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt dabei auf der Entwicklung einer Kalibrierstrategie zur einmaligen

oder regelmäßigen Bestimmung der Kalibrierparameter in einem geeigneten Testfeld für terrestrische Laserscanner, die nach dem tachymetrischen Messprinzip arbeiten. Andere scannende polare Messsysteme werden hier nicht betrachtet, da auf Grund der unterschiedlichen Arten der Auslenkung des Messstrahls das funktionale Modell der Kalibrierung je nach mechanischem Aufbau verändert werden muss.

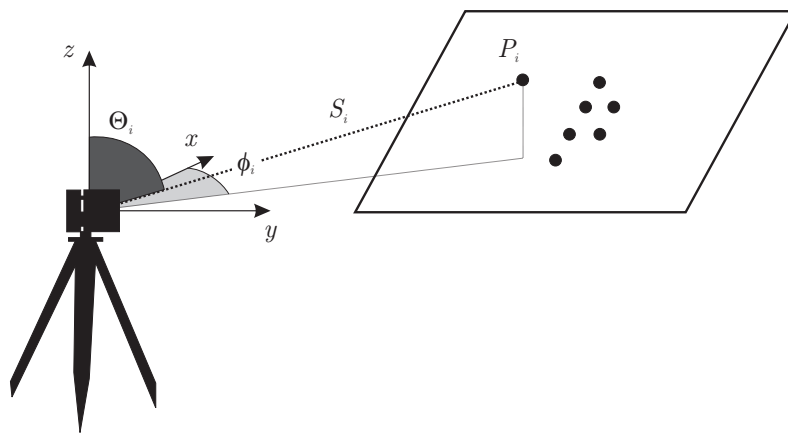
Das **Kapitel 6** schließlich enthält eine Zusammenfassung und Bewertung dieser Arbeit und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und weiterführende Forschungsansätze.

### **Anmerkung**

In dieser Arbeit werden die in der Geodäsie bevorzugt eingesetzten Linkssysteme als Koordinatensysteme verwendet. Die mathematisch definierten Rechtssysteme hingegen lassen sich ebenfalls nutzen, nur muss dann im Vorfeld der Anwendung eine Transformation erfolgen. Werden in dieser Arbeit Rechtssysteme benutzt, wird explizit darauf verwiesen.

## 2 Scannende polare Messsysteme

Eine Vielzahl von geodätischen Mess- und Auswerteverfahren beruhen auf dem Prinzip der polaren Messungselemente. Zu den Messsystemen, die dem polaren Messprinzip zugeordnet sind, gehören die Instrumente, die unter die Oberbegriffe elektronische Tachymeter, terrestrische Laserscanner und Lasertracker sowie Laserradar fallen. Diese Messinstrumente sind durch eine Messung von zwei räumlichen Richtungen und einer Raumstrecke zu einem Objektpunkt gekennzeichnet, vgl. zur Beschreibung und Darstellung auch Abbildung 2.1. Aus diesen Messungselementen sind unter Anwendung einfacher Transformationsvorschriften direkt dreidimensionale kartesische Koordinaten der Objektpunkte ableitbar, die zunächst in einem lokalen, frei orientierten Koordinatensystem vorliegen.



**Abb. 2.1:** Messprinzip eines polaren Messsystems: Zur Bestimmung der Koordinaten  $(x, y, z)_i$  eines Objektpunktes  $P_i$  im lokalen Instrumentenkoordinatensystem werden zwei Raumwinkel  $(\phi, \Theta)_i$  und die Schrägstrecke  $S_i$  benötigt.

Die Messung der Distanz sollte aus praktischen Gründen reflektorlos erfolgen. Wenn im Folgenden der Begriff der reflektorlosen Entfernungsmessung verwendet wird, ist damit die Streckenmessung auf natürliche und künstliche, nicht spiegelnde Oberflächen ohne Zuhilfenahme von Reflexfolien, Reflektoren u. ä. gemeint. [Kern, 2003] wählt in diesem Zusammenhang die Begriffe *signalisierungsfrei* oder auch *berührunglos*, und meint damit, dass aufgrund der starken Bündelung des Laserlichts und der damit verbundenen starken Reflexion an der Objektoberfläche eine besondere Signalisierung des Zielpunktes nicht vorgenommen werden muss. Der Begriff *reflektorlose* Distanzmessung ist jedoch mittlerweile fest im Sprachgebrauch etabliert und soll im Weiteren verwendet werden.

Wird die reflektorlose Distanzmessung nicht nur zu einem Objektpunkt durchgeführt, sondern wird das Messsystem in die Lage versetzt, eine automatisierte sowie flächenhafte und somit bildgebende Abtastung vorzunehmen, wird auch von *Laserscanning* oder *Scanning* gesprochen. Unter dem Begriff *Laserscanner* werden im Weiteren diejenigen Instrumente verstanden, die für eine automationsgestützte berührunglos abtastende Messdatenerfassung von Oberflächen eingesetzt werden können. Ausgenommen davon sind Zeilenscanner und die in unterschiedlichen Disziplinen eingesetzten flugzeug- oder satellitengestützten Laserscanner.

Im folgenden Kapitel werden die Grundprinzipien zur Messung mit polaren Messinstrumenten vorgestellt. Neben der Erläuterung der zur Verfügung stehenden Distanzmessprinzipien wird auf die unterschiedlichen Möglichkeiten der räumlichen Erfassung bzw. räumlichen Auslenkung der Distanzmessung zur Erfassung der benötigten Messungselemente eingegangen. Dabei konzentriert sich die Arbeit auf die Beschreibung von scannenden Messsystemen. Die ebenfalls nach der polaren Messmethode arbeitenden Lasertracker und das Verfahren des Laserradars werden nicht betrachtet.

## 2.1 Distanzmessung

Das Grundprinzip der elektronischen Distanzmessung beruht auf der Aussendung einer sich mit konstanter Geschwindigkeit fortpflanzenden Wellengruppe, die am Zielpunkt reflektiert und am Anfangspunkt wieder empfangen wird. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit bekannt und die Signallaufzeit genau erfassbar, kann die Strecke aus diesen bekannten Größen abgeleitet werden.

Die Grundlage für eine elektronische Entfernungsmesser bildet ein Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung), dessen Licht als Trägerwelle genutzt und auf verschiedene Weise zur Aufprägung eines eindeutigen Signals moduliert wird. Ein Laser ist eine Lichtquelle, die elektromagnetische Strahlung großer Intensität, scharf begrenzter Frequenz und hoher Kohärenz<sup>1</sup> auszusenden vermag.

Zur reflektorlosen Distanzmessung in den polaren Messsystemen Tachymeter und Laserscanner kommen hauptsächlich zwei Verfahren zum Einsatz, um die Laufzeit des aufmodulierten Signals zu bestimmen. In modernen Tachymetern findet sich als Distanzmessprinzip hauptsächlich das Phasendifferenzverfahren. Das zweite Messverfahren beruht auf dem Prinzip des Impulslaufzeitverfahrens und wird aktuell von den meisten Laserscannern als Distanzmessprinzip verwendet.

Die Grundlagen der elektrooptischen Distanzmessung sind z. B. detailliert in [Rüeger, 1996], [Joeckel und Stober, 1999], [Witte und Schmidt, 2000] und [Deumlich und Staiger, 2002] beschrieben. Zum besseren Verständnis der eingesetzten Verfahren sollen hier dennoch die Grundprinzipien der elektrooptischen Distanzmessung kurz angesprochen werden.

### 2.1.1 Impulslaufzeitverfahren

Beim Impulslaufzeitverfahren wird diejenige Zeit gemessen, die der ausgesandte Puls, vgl. Abbildung 2.2, vom Verlassen der Sendediode über die Reflexion am Objekt und zurück zur Empfangsdiode benötigt. Der Zeitpunkt des Aussendens des Impulses und der Empfangszeitpunkt sind zu erfassen, um die Laufzeit

$$\Delta t = \frac{2s}{c} \quad (2.1)$$

zu ermitteln. Mit der mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  entlang des Signalwegs lässt sich die Entfernung  $s$  zwischen Sensor und Objekt ermitteln.

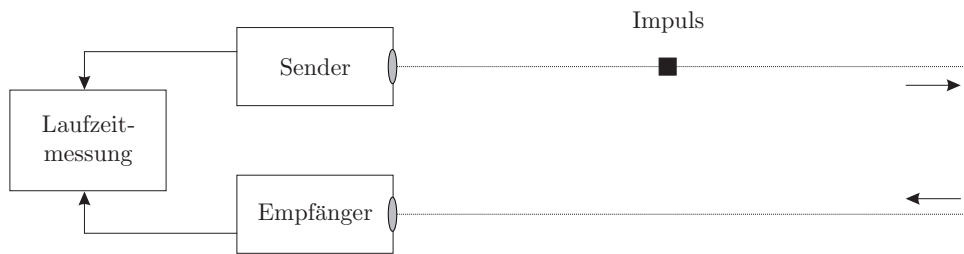


Abb. 2.2: Schematisches Prinzip Impulslaufzeitverfahren.

### 2.1.2 Phasendifferenzverfahren

Beim Phasendifferenz- oder Phasenvergleichsverfahren wird einer kontinuierlich ausgestrahlten Trägerwelle ein sinusförmiges Signal mit der Messfrequenz  $f_m$  aufmoduliert:

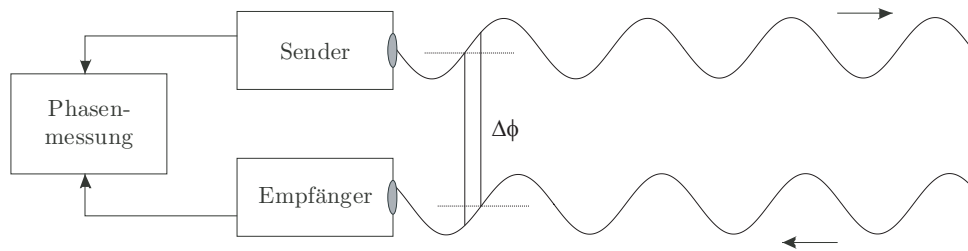
$$y_S = A_S \sin(2\pi f_m t). \quad (2.2)$$

Die Modulation kann dabei durch eine Amplituden-, Phasen- oder Frequenzmodulation erfolgen. Die Wellenlänge  $\lambda_m$  der Modulationswelle

$$\lambda_m = \frac{c_0}{n f_m} \quad (2.3)$$

<sup>1</sup>Als kohärent werden zwei oder mehrere Wellenzüge bezeichnet, wenn zwischen ihnen an einem beliebigen Raumpunkt eine bestimmte zeitlich unveränderliche Phasenbeziehung besteht [Lindner, 1993]

ist abhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  des Laserlichts im dämpfungsfreien Vakuum, dem mittleren Brechungsindex  $n$  entlang der durchlaufenden Raumstrecke und der Frequenz  $f_m$  der Messträgerwelle.



**Abb. 2.3:** Schematisches Prinzip Phasendifferenzverfahren.

In Abhängigkeit von der Länge des durchlaufenden Weges erfährt das modulierte Signal eine Phasenverschiebung  $\Delta\phi$ , die als Unterschied der Phasenlage beim Verlassen des Senders  $y_S$  und der Phasenlage beim Empfang

$$y_E = A_E \sin(2\pi f_m t + 2\pi k + \Delta\phi) \quad (2.4)$$

beschrieben werden kann, wobei  $k$  die Anzahl der zunächst unbekanntes ganzzahligen Vielfachen der modulierten Wellenlänge  $\lambda_m$  bezeichnet. Da die Phasenmessung nur in einem Bereich von 0 bis  $2\pi$  eindeutig ist, ist die Distanz zwischen Entfernungsmesser und Zielpunkt nur eindeutig bestimmbar, wenn sie nicht größer als die halbe Wellenlänge ist. Da des Weiteren die Genauigkeit der Auflösung des Phasenreststückes von der eingesetzten Wellenlänge abhängig ist<sup>2</sup> und um das Problem der Mehrdeutigkeiten lösen zu können, wird der Messvorgang durch die Verwendung mehrerer aufeinander abgestimmter Frequenzen in Einzelmessungen unterteilt. Die Messung mit der kleinsten Wellenlänge wird als Feinmessung bezeichnet, alle Weiteren als Grobmessungen [Kahmen, 1997].

Die geräteinternen elektrischen Schaltungen und Dioden sowie die Ungenauigkeiten in den verwendeten Bauelementen verursachen eine Phasendrift, die wiederum die Phasenverschiebung beeinflusst. Aus diesem Grund wird von den Herstellern neben der Phasendifferenz auf dem externen Messweg auch abwechselnd oder gleichzeitig die Phasendifferenz einer geräteinternen Messstrecke bestimmt. Durch Differenzbildung entfallen die durch die oben genannten Einflüsse bedingten Abweichungen.

Ein weiterer Fehlereinfluss bei der elektronischen Streckenmessung wird durch den Einfluss unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen während der Messungen entlang des Messweges hervorgerufen. Der Brechungsindex der Atmosphäre lässt sich in seiner Wirkung mit einem Maßstabsfehler vergleichen und findet in der 1. Geschwindigkeitskorrektur  $K_n$  Anwendung für die Berechnung eines Korrekturfaktors, der an die gemessene Rohstrecke  $s'$  anzubringen ist:

$$K_n = s' \frac{n_0 - n_L}{n_L} \quad (2.5)$$

Zur Bestimmung des sich auf die tatsächlichen lokalen atmosphärischen Bedingungen stützenden Brechungsindex  $n_L$  wird nach BARRELL und SEARS in der von KOHLRAUSCH vereinfachten Form interpoliert

$$n_L = 1 + 98,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{n_{Gr} - 1}{1 + \alpha \cdot t} \cdot p - \frac{4,1 \cdot 10^{-8}}{1 + \alpha \cdot t} \cdot e, \quad (2.6)$$

wobei die zur präzisen Bestimmung des tatsächlichen Brechungsindex benötigten Parameter Trockentemperatur  $t$ , Luftdruck  $p$ , Ausdehnungskoeffizient der Luft  $\alpha$  und Partialdruck des Wasserdampfes  $e$  sorgfältig zu ermitteln sind. Der ebenfalls erforderliche Gruppenbrechungsindex  $n_{Gr}$  ist für Normalverhältnisse, d. h. trockene Luft bei einer Lufttemperatur von  $0^\circ\text{C}$ , 1013,25 hPa Luftdruck und 0,03%  $\text{CO}_2$ -Gehalt, nach BARRELL und SEARS

$$(n_{Gr} - 1) \cdot 10^{-6} = 287,604 + 3 \cdot \frac{1,6288}{\lambda^2} + 5 \cdot \frac{0,0136}{\lambda^4} \quad (2.7)$$

mit  $\lambda$  als effektiver Wellenlänge im Vakuum zu berechnen. Der für die 1. Geschwindigkeitskorrektur nach Gleichung 2.5 erforderliche Referenzwert  $n_0$  wird vom Hersteller der Instrumente vorgegeben und lässt sich zu

$$n_0 = \frac{c_0}{\lambda_m f_m} \quad (2.8)$$

<sup>2</sup>Mit digitaler Phasenmesstechnik kann die Phasendifferenz  $\Delta\phi$  auf ca. 1/10000 der Wellenlänge  $\lambda_m$  bestimmt werden [Deumlich und Staiger, 2002]

berechnen. Die Korrekturen werden geräteintern an die Rohwerte der Streckenmessung angebracht oder sind vom Benutzer selbst zu berechnen oder geeigneten Diagrammen zu entnehmen und anzubringen.

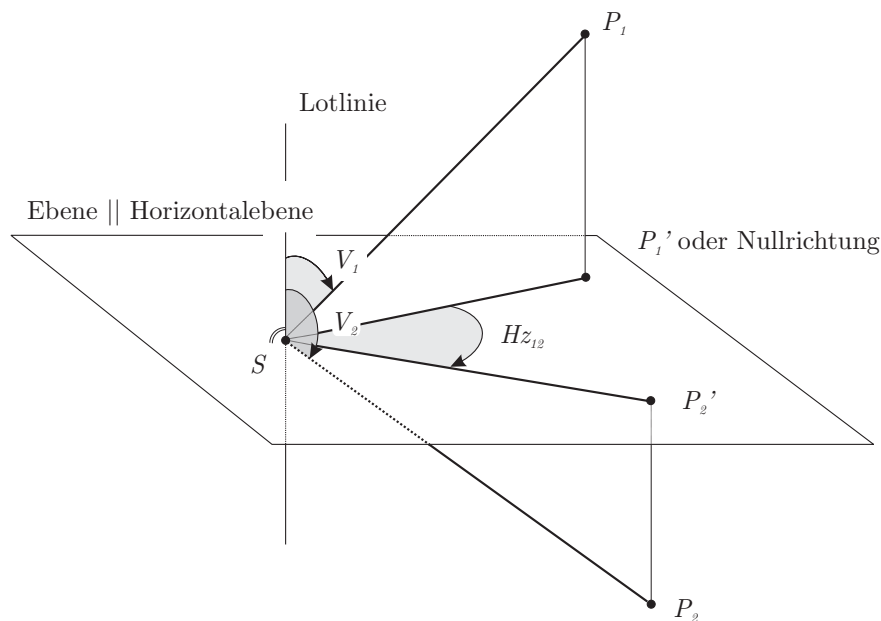
Die Korrekturen der 1. Geschwindigkeitskorrektur sind für Entfernungsmesser unter normalen Messbedingungen im Nahbereich (bis 50 m) beim Einsatz in Laserscannern und Tachymetern selten größer als 10 ppm, und somit unterhalb der Messgenauigkeit, die bei Laserscannern in der Größenordnung von  $> 5$  mm liegen. [Kern, 2003] weist jedoch darauf hin, dass bei der Nutzung von Laserscannern im Nahbereich, z. B. zu Zwecken der Bauaufnahme in Dachstühlen oder Arbeiten in Industriehallen aufgrund der sprunghaft auftretenden großen Temperaturdifferenzen die 1. Geschwindigkeitskorrektur nicht zu vernachlässigen sei.

## 2.2 Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung

Neben einer berührungslosen Distanzmessung sind polare, scannende Messsysteme dadurch gekennzeichnet, dass mit ihnen Zielpunkte in unterschiedlichen Raumrichtungen angemessen werden können. Durch die Kombination der Distanzmessung mit einer räumlichen Auslenkung des Messstrahls in meist festen Schrittweiten erfolgt der Übergang vom eindimensionalen Entfernungssignal zu einer dreidimensionalen räumlichen Erfassung. Dabei müssen die entsprechenden Raumwinkel, mit denen die erfolgte Auslenkung erfasst und registriert wird, näher definiert werden.

### 2.2.1 Winkeldefinitionen

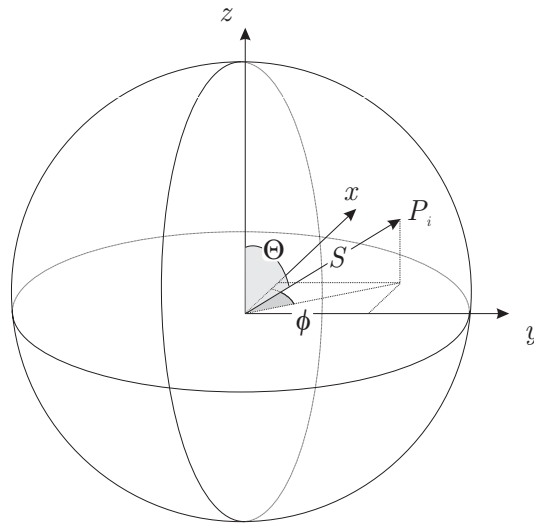
Lassen sich polare Messinstrumente an der Lotrichtung orientieren, werden bei der Messung die Begriffe Horizontalrichtung/Horizontalwinkel und Zenitdistanzen/Vertikalwinkel verwendet, vgl. Abbildung 2.4.



**Abb. 2.4:** Definition der gemessenen Richtungen beim tachymetrischen Messprinzip.

Horizontalwinkel  $H_z$  liegen in einer Horizontalebene. Die Schenkel der Horizontalwinkel sind die Projektionen der Strahlen zum Zielpunkt und zur Nullrichtung oder zu einem zweiten Zielpunkt auf die durch den Standpunkt  $S$  gelegte, zur horizontalen Bezugsfläche parallele Ebene [Deumlich und Staiger, 2002]. Durch Differenzbildung erhält man aus zwei Horizontalrichtungen den zwischen beiden Schenkeln aufgespannten Horizontalwinkel. Vertikalwinkel  $V$  liegen in einer Vertikalebene. Mit dem Strahl zum Zielpunkt und der durch den Standpunkt gehenden Lotlinie ergeben sich Vertikalwinkel.

Andererseits ist eine verallgemeinerte Darstellung in Form von Kugelkoordinaten möglich. Durch diese Form der Darstellung wird eine willkürliche Aufstellung der Instrumente ausgedrückt, die nicht an der Lotrichtung orientiert sein muss. Die Kugelkoordinaten  $\phi$ ,  $\Theta$  und  $S$  [Bronstein und Semendjajew, 1985] gehen aus dem Polarkoordinatensystem der Ebene hervor, vgl. Abbildung 2.5. Aus Konventionsgründen werden im Folgenden trotz dieser Festlegung die Begriffe Horizontalwinkel und Vertikalwinkel verwendet.



**Abb. 2.5:** Definition der gemessenen Richtungen in Kugelkoordinaten.

Die Auslenkung des Messstrahls erfolgt bei scannenden Messsystemen in festen Winkelschrittweiten  $\Delta\phi$  und  $\Delta\Theta$ , wobei in der praktischen Anwendung meist ein gleicher numerischer Wert für beide gewählt wird. Die Zählung der Vertikalwinkel beginnt im Zenit, gleichzeitig erfolgt auf diese Weise die Festlegung der Lage der  $z$ -Achse. Die Ausrichtung der Nullrichtung des Horizontalkreises  $\phi_0$  erfolgt (in der Geodäsie) üblicherweise in einem Linkssystem an der  $x$ -Achse. Aufgrund dieser Festlegung wird eine Drehung, d. h. eine Zählung der Horizontalwinkel im Uhrzeigersinn ermöglicht.

Aus den polaren Messelementen lassen sich unter Nutzung einfacher Transformationsvorschriften für jeden Punkt  $P_i$  kartesische Koordinaten, hier in einem Linkssystem, als abgeleitete Größen

$$P_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = P_S + \begin{bmatrix} S_i \cdot \cos \phi_i \cdot \sin \Theta_i \\ S_i \cdot \sin \phi_i \cdot \sin \Theta_i \\ S_i \cdot \cos \Theta_i \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

berechnen. Der Instrumentenstandpunkt  $P_S = (x_s, y_s, z_s)^T$  bzw. der Nullpunkt des instrumentenbezogenen lokalen Koordinatensystems wird meist zu  $P_S = (0, 0, 0)^T$  gewählt.

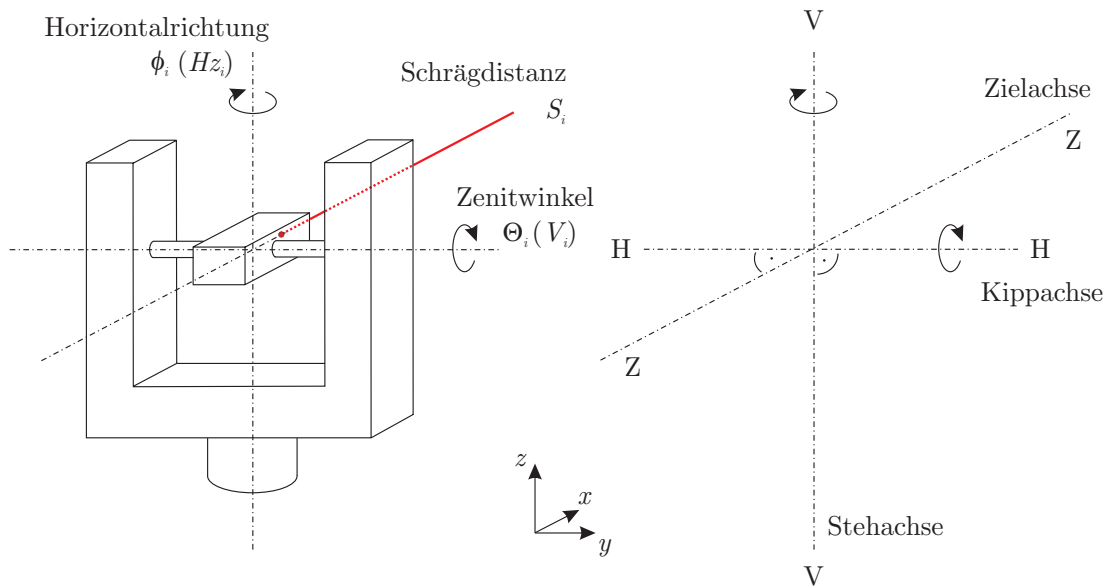
Die auf der anderen Seite weit verbreitete Abbildung der Koordinaten in einem mathematischen Rechtssystem wird insbesondere bei der Verarbeitung der Daten mit scannenden Systemen (Laserscanner) verwendet. Dabei erfolgt die Ausrichtung der Horizontalkreisablesung an der  $y$ -Achse, die Winkel werden jedoch im positiven Uhrzeigersinn gezählt. Die vergleichbar mit der tachymetrischen Ablesung der Vertikalwinkel verlaufende Bestimmung der Zenitwinkel erfolgt hier ebenfalls durch Zählung ab der Nullmarke, die jedoch im Nadir ihre Nullstellung hat. Eine Transformation in das jeweilige andere Koordinatensystem ist ohne weiteres möglich, muss jedoch bei der Auswertung, bei der qualitativen und quantitativen Analyse von Messdaten sowie bei der visuellen Betrachtung von Ergebnissen berücksichtigt werden.

Da nicht zwangsläufig davon auszugehen ist, dass die eingesetzten Instrumente an der Lotrichtung auszurichten sind und an einigen scannenden Messsystemen standardmäßig keine Möglichkeit einer Horizontierung vorhanden ist, werden in diesen Fällen Winkel gemessen, die nicht an der Lotrichtung orientiert sind. Die so gemessenen Winkel sind demzufolge zunächst in einem örtlichen, nicht horizontierten Instrumentensystem beschrieben.

### 2.2.2 Räumliche Abtastung mittels tachymetrischem Messprinzip

Zur Auslenkung der punktuellen Distanzmessung in die unterschiedlichen Raumrichtungen der Zielpunkte sind verschiedene Strahlablenkungseinheiten denkbar, die auf mechanischen Ablenkeinheiten beruhen. Eine Möglichkeit ist die Strahlablenkung in vertikaler Richtung durch einen sich schnell drehenden oder oszillierenden Polygonspiegel im Strahlengang des Laserstrahls in Verbindung mit einer langsamen Drehung um die vertikale Geräteachse, die in vorgegebenen Winkelschrittweiten durch Schritt- oder Servomotoren durchgeführt werden

kann. Diese Form der Ablenkung führt zum *tachymetrischen Messprinzip*, bei dem das instrumenteneigene polare Koordinatensystem durch eine vertikale Drehachse (Stehachse VV), eine horizontale Drehachse (Kippachse HH) sowie durch den Laserstrahl (Zielachse ZZ) realisiert wird, vgl. auch Abbildung 2.6.

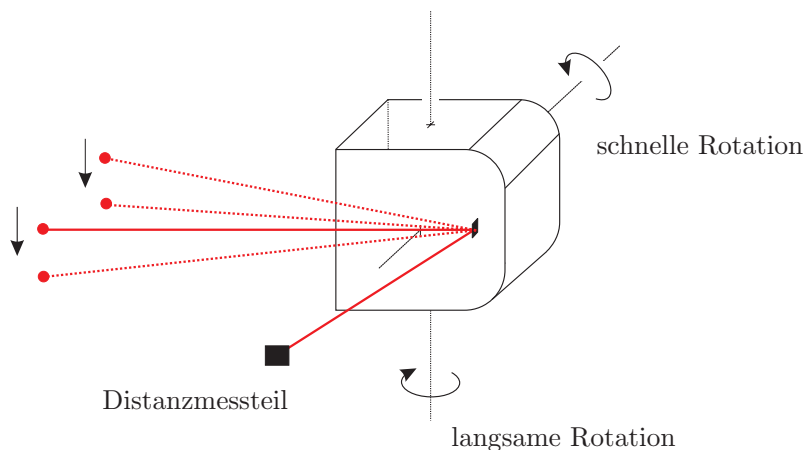


**Abb. 2.6:** Schematischer Aufbau und geometrische Bedingungen in einem Instrument mit tachymetrischem Messprinzip.

Durch die beschriebene Ablenkung erfährt der Laserstrahl zur Distanzmessung eine Auslenkung sowohl über den gesamten horizontalen Messbereich (Horizont) als auch über den gesamten vertikalen Messbereich. Eine Einschränkung des Messbereiches ist nur in vertikaler Richtung hinsichtlich der Aufstellung der Messgeräte gegeben, da Stative, Plattformen u. ä. den Messbereich begrenzen.

Der Abriff der Winkelmessgrößen kann beispielsweise durch inkrementelle Winkelaufnehmer erfolgen. Durch den Einsatz von Encodern auf den Antriebswellen lassen sich die jeweiligen Stellungen  $\Delta\phi_i$  und  $\Delta\Theta_i$  gegenüber einer Nullstellung zum Zeitpunkt  $t_i$  erfassen.

Der Einsatz eines schnell rotierenden Spiegelpolygons, vgl. Abbildung 2.7, ermöglicht sehr hohe Abtastgeschwindigkeiten bei gleichmäßigen Drehbewegungen. Die maximalen Drehbewegungen des Spiegelpolygons erreichen je nach Hersteller 2000 U/min. und mehr [Staiger und Ettl, 2003].



**Abb. 2.7:** Schematisches Prinzip der rotierenden Bewegung eines Spiegels zur bildgebenden Abtastung in einem scannenden Instrument.

Durch diese sehr schnelle Drehung um die horizontale Polygonspiegelachse in Kombination mit der langsamen Drehung um die Geräteachse kommt es bei der räumlichen Abtastung zu einem verzerrten Abtastmuster.



Diese Abweichungen von einem idealen Aufnahmeraster, die sich durch die unterschiedlichen Drehbewegungen zwangsläufig ergeben, sollten von den Herstellern in einem Kalibrierprozess bestimmt werden und im Messprozess softwaretechnisch korrigiert werden.

Da durch den Einsatz eines Polygonspiegels an den Spiegelfacetten dieses optischen Bauteils eine systematische Veränderung der gemessenen Strecke in Abhängigkeit von der Stellung des Polygonspiegels zu beobachten ist, ist der gesonderten Bestimmung dieses Strahlverlaufes innerhalb des Messgerätes vom Hersteller durch eine Kalibrierung Rechnung zu tragen [Fröhlich, 1996].

Wenn die kontinuierliche Drehung um die horizontale und vertikale Achse durch eine rotierende Bewegung in festen Schrittweiten durch zwei unabhängige Schritt- oder Servomotoren realisiert wird, dann hat dies ebenfalls eine nach dem tachymetrischen Messprinzip aufgebaute Instrumentenkonstruktion zur Folge. Dabei kann die Montage auf einem Drehtisch [Hovenbitzer, 2003] und [Pavelka und Dolansky, 2003] als auch in einem Rahmen erfolgen, der über Richtungsgeber die manuell erfolgte Zielpositionierung richtungsmäßig erfasst [Buchmann, 1996] und [Breithaupt, 2002].

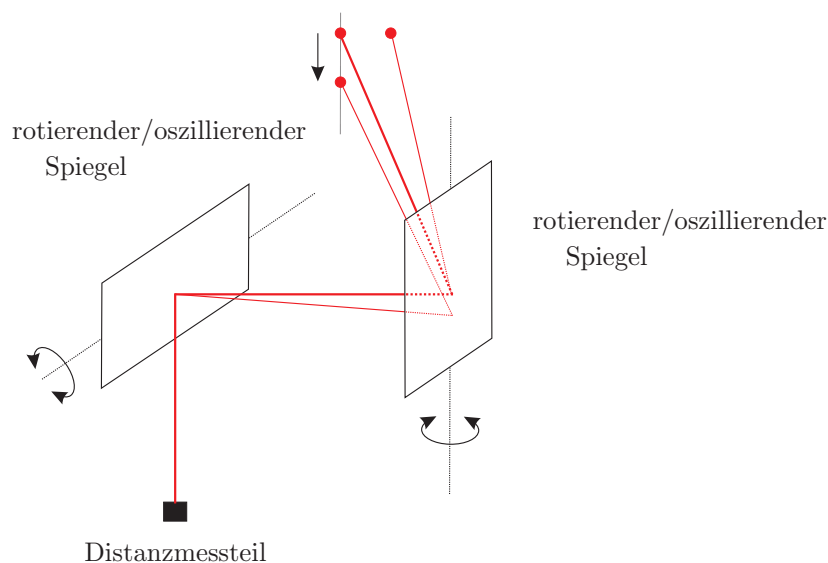
Zur Gruppe dieser Instrumente können auch die elektronischen, programmierbaren und motorisierten Tachymeter oder Totalstationen mit reflektorloser Distanzmessung gerechnet werden, da durch die integrierte oder extern bereitgestellte Software eine dreidimensionale, d. h. räumliche und flächenhafte Erfassung von ausgewählten Punkten möglich wird. Eine zeitlich nahezu aktuelle Aufstellung über die am Markt befindlichen Tachymeter findet sich in [Lemmens, 2002] sowie in [Meisenheimer, 2002] und den entsprechenden Aktualisierungen.

Die Bestimmung der Elemente für Lage und Höhe eines Punktes erfolgt bei unbewegten Objekten nahezu zeitgleich. Die Effekte der nicht vollständigen zeitlichen Synchronisierung der einzelnen Messkomponenten mit ihren systematischen Effekten [Stempfhuber u. a., 2000] spielen bei den typischen Messaufgaben motorisierter Tachymeter bei der flächenhaften Erfassung keine Rolle, da sich die Objekte in Ruhe befinden.

Die oben erwähnten Tachymeter erreichen zur Zeit im Scan-Modus in praktischen Tests Datenerfassungsraten von ca. 15 Messungen in der Minute, d. h. weniger als 1000 Punkte in der Stunde. Trotz dieser vergleichsweise geringen Datenerfassungsrate gegenüber Laserscannern erreichen die motorisierten Tachymeter eine hohe Genauigkeit in der punktuellen Erfassung von Objekten. Durch die Kombination von scannenden Tachymetern mit bildgebenden CCD-Kameras lassen sich einerseits die Tachymeter interaktiv steuern [Juretzko, 2001], andererseits können auf Grundlage der tachymetrisch bestimmten Punkte photogrammetrische Auswertungen, insbesondere Entzerrungen durchgeführt werden [Scherer, 2001a].

### 2.2.3 Alternative Abtastverfahren

Bei den nicht nach dem tachymetrischen Prinzip arbeitenden bildgebenden Systemen kommen wiederum verschiedene Verfahren zum Einsatz.



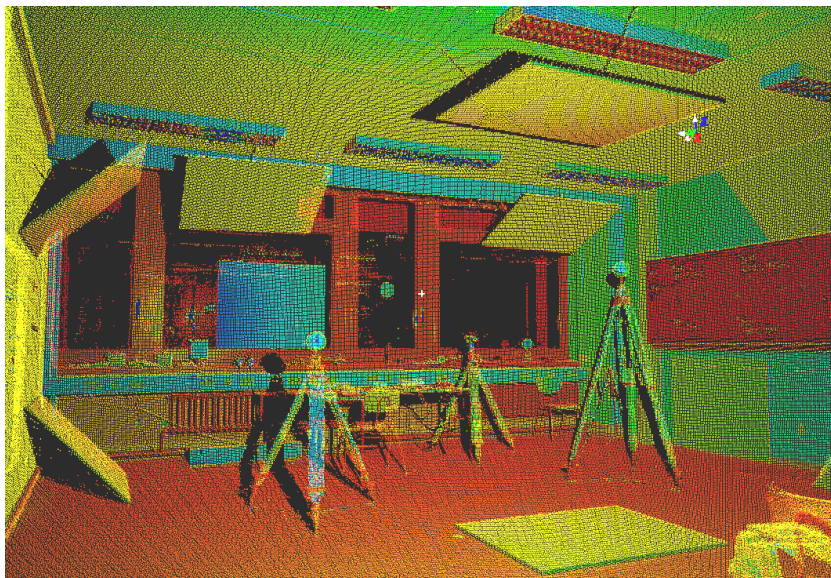
**Abb. 2.8:** Schematisches Prinzip der oszillierenden Bewegung zweier Spiegel zur bildgebenden Abtastung in einem scannenden Instrument.

Eine Möglichkeit der Strahlablenkung kann durch eine oszillierende oder drehende Bewegung von Spiegeln im Strahlengang des Laserstrahls durchgeführt werden. Dieses in Abbildung 2.8 dargestellte Strahlablenkungsprinzip wird vornehmlich in Laserscannern eingesetzt, die eine Abtastung nur in einem begrenzten horizontalen und vertikalen Ausschnitt vornehmen. In diesem Fall handelt es sich um sogenannte Kamerascanner, die in Kapitel 2.3.1 näher erläutert werden und in Abbildung 2.11 dargestellt sind. Die Ausrichtung dieser Sensoren zur Lotrichtung ist im Gegensatz zur tachymetrischen Vorgehensweise nicht unbedingt erforderlich, jedoch wünschenswert [Wunderlich, 2001]. Die Bestimmung der beiden räumlichen Richtungen bzw. bei Festlegung entsprechender Nullrichtungen die Ermittlung von räumlichen Winkeln, erfolgt dann in einem Koordinatensystem, welches beliebig im Raum orientiert sein kann. Die Kombination aus beiden mechanischen Ablenkensystemen ist eine weitere Möglichkeit zur flächenhaften Ablenkung des Messstrahls.

## 2.3 Laserscanner

Unter Laserscanning wird die (meist) dreidimensionale Erfassung einer Objektoberfläche durch eine Abtastung mit einem Laserstrahl verstanden [Deumlich und Staiger, 2002]. Die Abtastung erfolgt dabei zeitlich und örtlich versetzt und ermöglicht durch eine reflektorlose Distanzmessung mit gleichzeitiger Erfassung der beiden räumlichen Drehwinkel über polares Anhängen eine Berechnung dreidimensionaler kartesischer Objektpunktkoordinaten, deren Zusammenfassung und Darstellung als *Punktwolke* bezeichnet wird. Die innere Genauigkeit der Distanzmessung ist abhängig vom verwendeten Distanzmessverfahren und erstreckt sich von Submillimetern bis hin zu wenigen Zentimetern [Schulz und Ingensand, 2004a]. Wird zusätzlich zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten zu jedem Objektpunkt die rückgestrahlte Intensität oder Reflektanz erfasst, wird auch der Begriff *4D-Laserscanner* gebraucht.

Der Vorteil dieser Technologie ist die vergleichsweise schnelle und automatisierte, flächenhafte 3D-Erfassung einer Objektoberfläche mit hoher Punktdichte, siehe auch Abbildung 2.9. Die Aufnahmezeiten für einen vollständigen Scan in höchster Auflösung variieren in Abhängigkeit vom jeweiligen Messprinzip der Laserscanner zwischen wenigen Minuten und einigen Stunden. Nachteilig wirkt sich die zu speichernde Datenmenge bei der Nutzung dieser Technologie aus. Bei der Datenerfassung fallen nicht selten für die Aufnahme auf einem Standpunkt Datenmengen in der Größenordnung von ca. 1 GB an, die gespeichert und verarbeitet werden müssen.



**Abb. 2.9:** Beispiel einer Punktwolke bei der Datenerfassung mit einem scannenden Instrument (intensitätscodiert, Cyclone 4.1 [Cyrus, 2003]).

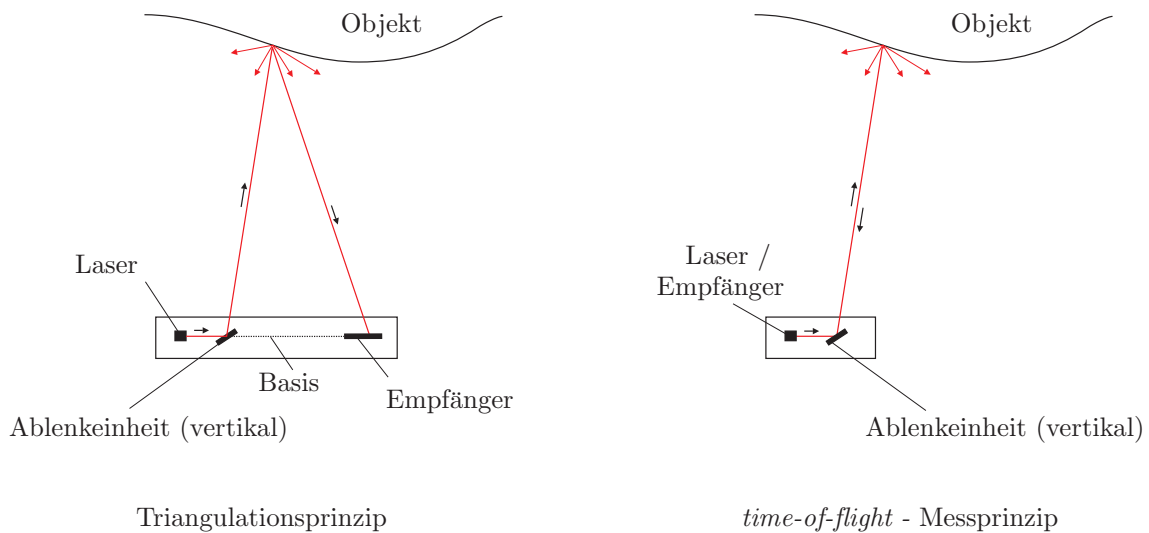
### 2.3.1 Messprinzip und Unterscheidungsmerkmale

Eine generelle Unterscheidung der verschiedenen Laserscannersysteme kann nach zwei verschiedenen Betrachtungsweisen durchgeführt werden. Eine Unterscheidung ist durch die unterschiedlichen Messprinzipien der

Systeme gegeben, zum Anderen lassen sich die Scanner in verschiedene Entfernungsmessbereiche einteilen, aus denen somit auch unterschiedliche Einsatzgebiete und Anwendungen abgeleitet werden können. Wird die Klassifizierung nach dem Entfernungsmessbereich (Einsatzbereich) vorgenommen, lassen sich die Scannersysteme in die folgenden Bereiche einteilen:

- Nahbereich (close range): einige cm bis ca. 2 m Messbereich
- Mittlerer Entfernungsbereich (mid range): 2 m bis ca. 80 m Messbereich
- Weiter Bereich (long range): 80 m bis  $\geq 2$  km Messbereich

Die in dieser Unterteilung vorgenommenen Grenzen des Messbereiches verschwimmen in der Praxis abhängig vom eingesetzten Instrument mit dem jeweiligen sensortypischen Messbereich. Eng an diese Einteilung ist das Konstruktionsprinzip, vgl. Abbildung 2.10, zur Ermittlung der dreidimensionalen Koordinaten bzw. das zur Distanzbestimmung zwischen Sensor und Objekt eingesetzte Messverfahren gebunden. Unterschieden werden muss hier in den Bereich der Triangulationsscanner, die vorwiegend im Nahbereich eingesetzt werden und in die Sensoren, die ihre Streckenmessung nach dem Phasendifferenzverfahren oder nach dem Impulslaufzeitverfahren ausführen. Für letztere ist auch der Begriff *time-of-flight* – Messprinzip gebräuchlich.



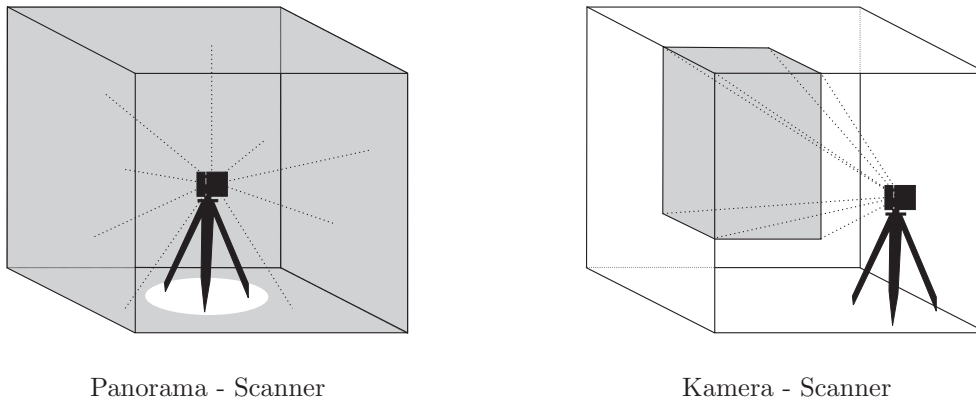
**Abb. 2.10:** Unterscheidung der Laserscanner nach dem Messprinzip.

Bei den Sensoren, die nach dem Triangulationsmessprinzip arbeiten, wird ein kollimierter Laserstrahl auf das Objekt projiziert und nach der Reflexion am Objekt in einer entsprechenden Optik wieder empfangen und auf einer positionsempfindlichen Diode registriert. Da die Basis (definierter Abstand zwischen Sender und Empfänger) und der Abstrahlwinkel der Ablenkeinheit bekannt sind, ist das Dreieck, gebildet aus Ablenke- und Empfangseinheit sowie Objektpunkt vollständig berechenbar. Ändert sich die Entfernung zum Zielpunkt wird auf der positionsempfindlichen Diode eine Ablage des reflektierten Laserpunktes registriert. Über diese Ablage und die hoch genau bestimmte Basis lässt sich die Entfernung berechnen. Die Ablenkeinheit (vertikal) sorgt für eine linienhafte Verteilung der Messpunkte am Objekt und durch eine Rotation um die Instrumentenachse ist eine dreidimensionale Erfassung im Raum möglich. Die Instrumente, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten, zeichnen sich durch eine sehr hohe Auflösung mit einer meist sehr hohen Genauigkeit im Nahbereich aus [Scherer, 2001b].

Eine weitere Unterteilung der Scanner, die polare Messelemente nutzen, ist durch das dem Scanner zur Verfügung stehende Gesichtsfeld (field of view) gegeben, das dem mit einer Aufstellung des Instrumentes maximal zu erfassenden Messbereich entspricht. Nach [Runne u. a., 2001] wird generell eine Unterscheidung in Panorama- und Kamerascanner vorgenommen, vgl. Abbildung 2.11.

Panoramascanner erfassen mit ihrem Gesichtsfeld von horizontal (meist) 360 Grad den gesamten Horizont, d.h. sie in der Lage, ihren Messkopf vollständig um die Geräteachse zu drehen. Das vertikale Gesichtsfeld reicht meist vom Zenit zum Nadir und wird nur durch die zur Aufstellung des Instrumentes benötigten Stative mit ihren Stativbeinen eingegrenzt. Kamerascanner sind in ihrem Gesichtsfeld hingegen in horizontaler und

vertikaler Richtung auf einen Ausschnitt begrenzt. Diese Scanner werden manuell auf das aufzunehmende Objekt ausgerichtet und lassen sich meist unabhängig von der Lotrichtung frei im Raum orientieren. Die Vorteile eines Kamerascanners gegenüber den Vertretern der Panoramascanner liegen z. B. in der Erfassung von Fassaden und skulpturenähnlichen Strukturen begründet, da der Sensor direkt auf das Objekt ausgerichtet werden kann und somit auch nur die wesentlichen Objektbereiche erfasst werden [Kern, 2003]. Demgegenüber steht die unter Umständen resultierende erhöhte Anzahl an Pass- und Verknüpfungspunkten zur Vereinigung mehrerer Aufnahmen von unterschiedlichen Standpunkten.

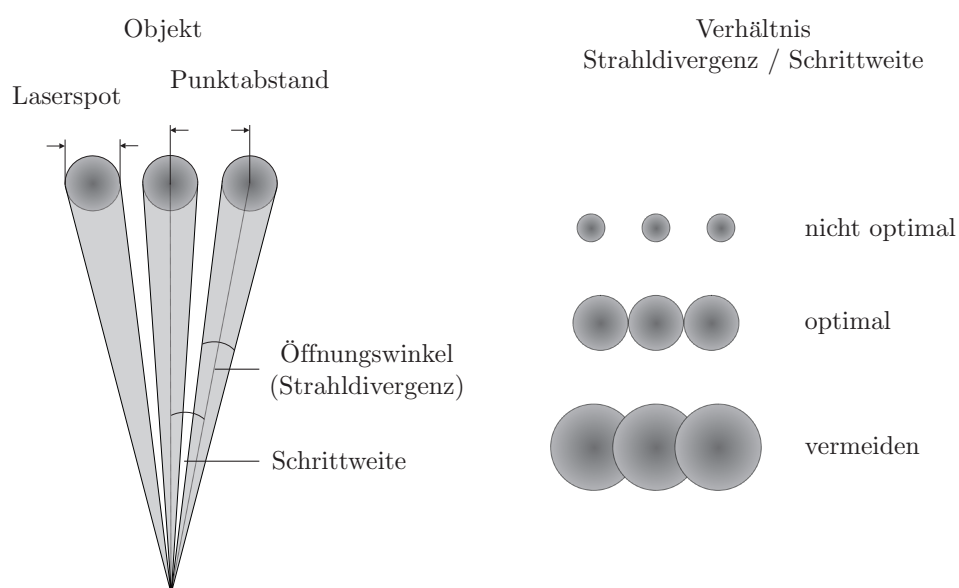


**Abb. 2.11:** Unterscheidung der Laserscanner nach dem Gesichtsfeld [Runne u. a., 2001].

Aus dem beschriebenen mechanischen Aufbau lassen sich typische Anwendungen der beiden verschiedenen Bauarten ableiten. Panoramascanner eignen sich besonders für die Aufnahme von z. B. Innenräumen in der Bauwerkserfassung oder der Datenerfassung in langgestreckten Objekten (Tunnel, Kavernen). Hingegen sind die Kamerascanner für die Messdatenerfassung bei begrenzten Objektausdehnungen prädestiniert, z. B. für die Erfassung von Oberflächengeometrien im Bereich der Denkmalpflege und Archäologie.

### 2.3.2 Charakteristische Kenngrößen

Bei der Messdatenerfassung von Laserscannern ist auf eine sinnvolle Abstimmung der Strahldivergenz zur Winkelschrittweite zu achten, da mit diesen Größen direkt die Objektauflösung verbunden ist.

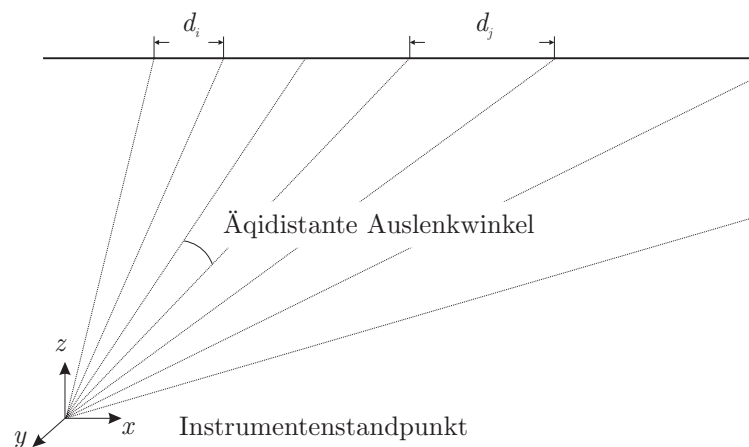


**Abb. 2.12:** Strahldivergenz und Auflösungsvermögen, nach [Schlemmer, 2004].

Die Größe des am Objekt auftreffenden Laserflecks (Laserspot) ist abhängig von der Strahldivergenz, die somit einen direkten Einfluss auf die Güte der Distanzmessung nimmt, siehe Abbildung 2.12. Je kleiner die Strahldivergenz technisch realisiert werden kann, desto zutreffender ist der Informationsgehalt für den einzelnen Objektpunkt, da systematische Verfälschungen in der Distanzmessung auf diese Weise verringert werden. Der Effekt dieser Systematiken tritt speziell an Ecken und Kanten auf und wird verursacht durch die Überlagerung und Mittelung verschiedener Entfernungsmesssignale [Kehne, 1989] und [Runne, 1993].

Die Abtastrate hingegen ist entscheidend für die räumliche Auflösung am Objekt und somit auch für den Grad der Detaillierung des Objektes. Entscheidend für die Auflösung auch kleiner Objektstrukturen ist in diesem Zusammenhang die NYQUIST-Frequenz. Diese Grenzfrequenz legt die theoretisch noch aufdeckbare Signalfrequenz bei einer gewählten Abtastrate fest (Abtasttheorem). In der Praxis der Messtechnik sollte die Abtastfrequenz meist um den Faktor 5 bis 6 größer als die kleinste vorkommende Signalfrequenz sein [Welsch u. a., 2000]. Übertragen auf scannende Messverfahren und die automatische Modellierung und Ableitung von strukturierten Geometrieelementen aus dreidimensionalen Punktwolken sind Objektdetails durch mindestens  $5 \times 5$  Messpunkte zu erfassen [Kern, 2003]. Bei der semi-automatischen oder manuellen Modellierung von Objekten anhand von Vorwissen, das durch den Bearbeiter in den Auswerteprozess einfließt, kann auf die oben formulierte Forderung unter Umständen verzichtet werden. In diesem Fall legt der Nutzer durch Vorgabe von diskreten Punkten fest, welches Objekt aus einem Ausschnitt der Punktwolke mit halbautomatischen Verfahren<sup>3</sup> modelliert werden soll.

Da die Messdatenerfassung mit festen Schrittweiten für die beiden Raumwinkel erfolgt, ergibt sich kein reguläres Abtastmuster am Objekt. Vielmehr ist die Verteilung der Messpunkte abhängig von der Entfernung Objekt-Sensor und der Ausrichtung der Oberfläche gegenüber dem Messinstrument, vgl. Abbildung 2.13. Am Objekt verändert sich der Abstand zwischen zwei Messpunkten ( $d_i$  und  $d_j$ ) je nachdem, wie der Sensor auf das Objekt ausgerichtet ist. Der Effekt verstärkt sich um so mehr, je schiefender der Auftreffwinkel des Zielstrahls auf der Objektfläche ist.



**Abb. 2.13:** Abhängigkeit des Abtastmusters von Entfernung und Ausrichtung des Objektes (Grundriss).

Daraus ergibt sich ein Abtastmuster, welches eine inhomogene räumliche Auflösung besitzt, vgl. dazu auch [Kern, 2003]. Bei einer Innenraumaufnahme, bei der der Sensor typischerweise in der Mitte des Raumes aufgestellt wird, ergibt sich eine Verteilung der Messpunkte wie in Abbildung 2.14 dargestellt. Aufgrund der Abtastung mit äquidistanten Schrittweiten für die Raumwinkel werden z. B. die vertikalen Bereiche (Decken und Fußböden) des Raumes höher aufgelöst als horizontale Wände und andere Objekte, die sich im Gesichtsfeld des Sensors befinden. Dies wiederum hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswertestrategie, speziell bei der Ableitung strukturierter Geometriedaten, auf die in Kapitel 3 detailliert eingegangen wird. Reguläre Abtastmuster lassen sich näherungsweise durch eine iterative Verstellung der Winkelschrittweiten für die beiden Hauptdrehkreise in Abhängigkeit von der vorher gemessenen Entfernung realisieren.

<sup>3</sup>In der kommerziellen Software *Cyclone 4.1* [Cyra, 2003] wird zwischen den beiden Verfahren *fit to cloud* und *region grow* unterschieden. Beim *region grow* wächst durch Vorgabe von Parametern wie max. Abstand der Punkte und Größe des Objektes aus der Punktwolke ein Objekt. Hingegen werden beim *fit to cloud* Verfahren alle selektierten Punkte der Punktwolke zur Modellierung eines vom Nutzer vorgegebenen Objektes herangezogen.



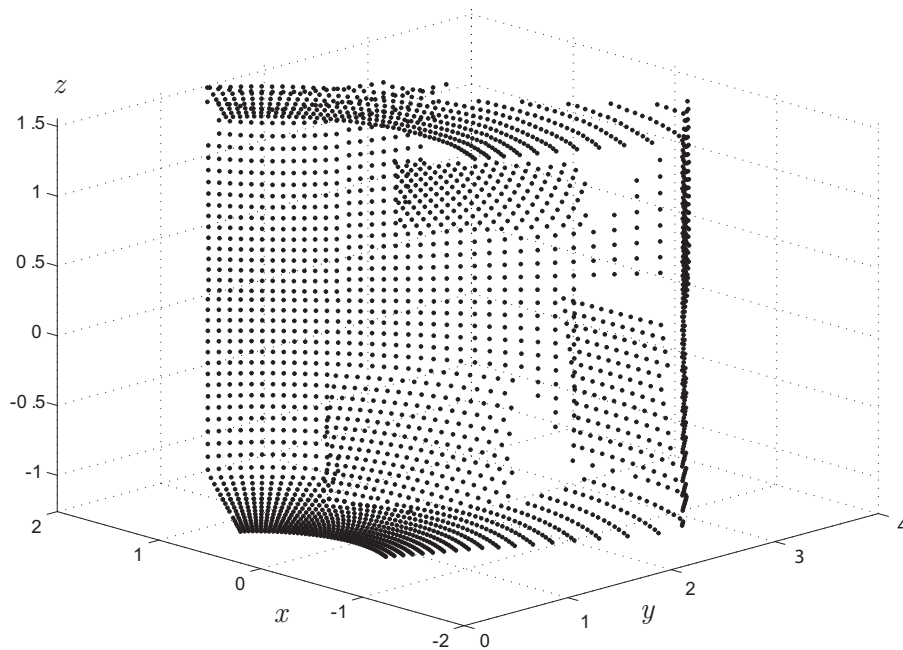


Abb. 2.14: Räumliche Verteilung der Messpunkte bei der Abtastung mit scannenden Messverfahren.

### Anmerkung

Auf dem Markt der terrestrischen Laserscanner für den mittleren und weiten Entfernungsbereich gibt es eine Anzahl verschiedene Hersteller, die z. B. in [Schlüter, 2002] aufgelistet werden. Die Klassifizierung in Tabelle 2.1 soll dazu dienen, die oben getroffenen Aussagen zusammenzufassen.

Eine Aufzählung, Beschreibung sowie Bewertung soll an dieser Stelle aufgrund des schnellen Wandels beim Einsatz dieser Technologie nicht vertiefend vorgenommen werden. Eine Auswahl von kommerziellen Laserscannern, die speziell für das Anwendungsgebiet Bauaufnahme einsetzbar sind, gibt [Kern, 2003] an. Eine ständig aktualisierte und verlinkte Liste der zur Verfügung stehenden terrestrischen Laserscanner mit ihren favorisierten Anwendungsgebieten findet sich z. B. auch bei [i3mainz, 2004].

Klassifizierung von Laserscannern				
Distanzmessprinzip	Entfernungsmessbereich [m]	Genauigkeit der Distanzmessung [mm]	Abtastrate [kHz]	Hersteller (Auswahl)
Impulslaufzeit	2 bis ca. 2000	5 bis > 10	1 bis 10	LEICA, MENSI, RIEGL, CALLIDUS
Phasenvergleich	< 100	< 10	> 500	ZOLLER+FRÖHLICH, IQSUN
Triangulation	< 0,2 bis ca. 10	< 1	ca. 0,1	MENSI, MINOLTA

Tabelle 2.1: Klassifizierung von Laserscannern, nach [Staiger, 2003] und [Schulz und Ingensand, 2004b].

## 2.4 Entwicklung eines low cost – Laserscanners

Auf der Grundlage von einfachen und handelsüblichen Bauelementen wurde ein Prototyp konstruiert, der durch die Erfassung polarer Messelemente gekennzeichnet ist, vgl. Abbildung 2.15, und nach dem tachymetrischen Messprinzip arbeitet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird dieses Messgerät mit POMES – Polares MESS System bezeichnet. Da das Instrument innerhalb fester Winkelinkremente räumlich positionierbar ist, kann das Messsystem prinzipiell als Scanner angesehen werden.

Der mechanische Aufbau ist bekannt, deshalb kann der Prototyp zur Entwicklung und Überprüfung der entwickelten Kalibrierstrategie herangezogen werden. Mit entsprechenden Hardwarekosten von ca. 1500,- € ist der Prototyp ein preiswertes Messsystem und lässt sich wirtschaftlich mit anderen Messverfahren, speziell den Ver-

fahren des einfachen Handaufmaßes kombinieren [Rietdorf u. a., 2003]. Ein weiteres Anwendungsgebiet könnte in sicherheitskritischen Bereichen zu sehen sein, da im Falle eines Unfalls die entstehenden Unkosten durch Hardwareschäden vergleichbar gering wären. Denkbar sind hier z. B. Einsätze bei Untersuchungen von Schalungs- und Bewehrungskonstruktionen oder Standfestigkeitsuntersuchungen im direkten Arbeitsumfeld, beispielsweise im Hoch- und Tunnelbau.



*Abb. 2.15: Prototyp des Messsystems POMEs.*

### 2.4.1 Systembeschreibung

Der Prototyp basiert auf einem System zur lasergestützten Tunnelprofilaufnahme [Krüger u. a., 2000], jedoch wurde eine vollständige Neukonstruktion auf Grundlage von zwei Schrittmotoren durchgeführt. Der im System zur lasergestützten Tunnelprofilaufnahme eingesetzte Handlaserentfernungsmesser LEICA Disto Pro 2a wurde aus Gewichtsersparnis durch ein von LEICA weiterentwickeltes Modell Disto Pro 4a ersetzt, da es ca. 200 Gramm leichter ist. Die Gewichtsreduktion ist zum einen in technischen Weiterentwicklungen und somit in der Verringerung der Dimensionen der verwendeten Bauteile zu suchen, andererseits kommt beim Disto Pro 4a auch eine andere Stromversorgung (kleinere Batterien bzw. Akkus) zum Einsatz. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Streckenmessgenauigkeit des Disto Pro 4a gegenüber seinem Vorgängermodell.

Als Material für den Stützkörper wurde Aluminium gewählt, da es korrosionsarm und sehr leicht ist. Für die Übersetzungen und Lagerung der Achsen wurden handelsübliche Bauelemente genutzt, d. h. die Vertikal- als auch die Kippachse sind in radialen Rillenkugellagern gelagert, die den reibungs- und spielarmen Lauf der zwei Achsen ermöglichen.

### 2.4.2 Aufbau

#### Laserentfernungsmesser

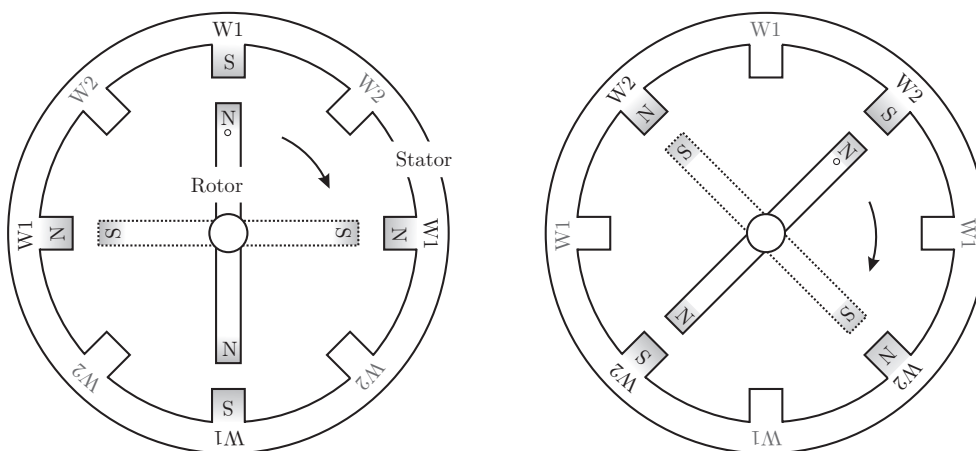
Der nach dem Prinzip des Phasenvergleichs arbeitende Handentfernungsmesser Disto Pro der Firma LEICA erfüllt alle nötigen Anforderungen für die Verwendung im entwickelten POMEs. Die Messungen können bis 100 m Zielweite ohne Reflektor durchgeführt werden und haben laut Herstellerangaben eine Genauigkeit von 1,5 mm.

Die Wellenlänge der abgestrahlten Messwelle beträgt 620 – 690 nm, die zur Amplitudenmodulation genutzten Frequenz  $f_G$  der Grobmessung beträgt 1.042 MHz, dies entspricht einer Wellenlänge  $\lambda_G$  von ca. 140 m. Die zuerst aufmodulierte Feinfrequenz  $f_F$  zur Feinmessung beträgt 50 MHz, daraus ergibt sich eine Wellenlänge  $\lambda_F$  von 6 m.

Der an einem Messobjekt auftreffende Zielstrahl ist durch den Reflexionspunkt der Laserstrahlung gut sichtbar. Aufgrund der Transparenz der seriellen Schnittstelle und der Steuerungsbefehle ist es möglich, eine angepasste Gerätesteuerung zu entwickeln.

## Schrittmotoren

Schrittantriebe sind dadurch gekennzeichnet, dass der Läufer des Schrittmotors in der Lage ist, definierte Schritte mit einem bestimmten Schrittwinkel auszuführen. Schrittmotoren funktionieren nach dem Prinzip von magnetischer Anziehung und Abstoßung. Sie wandeln elektrische Impulse in mechanische Achsrotation um. Der Drehwinkel ist proportional zur Anzahl der Eingangsimpulse und die Drehzahl ist abhängig von der Impulsfrequenz. Der Rotor eines Schrittmotors führt nicht, wie bei einem Gleichstrommotor, eine konstante Drehbewegung aus, sondern vollführt bei jedem elektrischen Impuls einen kleinen Schritt vorwärts.



**Abb. 2.16:** Schematischer Aufbau eines Schrittmotors und Weiterschalten des Rotors, nach [Schörlin, 1995] ( $W$  – Wicklung,  $N$  – Nordpol,  $S$  – Südpol).

Ein Schrittmotor besitzt, je nach Typ, für gewöhnlich mindestens zwei Statorwicklungen und einen dauermagnetischen Rotor [Stöltzing und Kallenbach, 2002]. Werden nun abwechselungsweise die beiden Wicklungen  $W_1$  und  $W_2$  von Strom durchflossen, führt der Rotor eine Drehbewegung aus, siehe auch Abbildung 2.16. Zusätzlich muss über ein Richtungssignal zur Steuerung des Rechts- bzw. Linkslaufes verfügt werden. Diese beiden Eingangssignale werden über eine Ansteuerelektronik verstärkt und an die Motorstränge übergeben. Nachfolgend wandelt der Schrittmotor die elektrische Energie in mechanische Energie um und der Schrittmotor führt entsprechende Winkelschritte in die gewünschte Richtung aus.

Beim Schrittmotor wird nur ein Drehmoment erzeugt. Um die Rotationsbewegung des Motors zu erzeugen, muss der Strom kommutiert werden, d. h. eine Umkehrung der Richtung eines Stromflusses der elektromagnetischen Spule während einer Motordrehung. Bei Hybridschrittmotoren sitzen normalerweise zwei Spulen auf einem Statorpol, so dass der Pol je nach Stromrichtung als magnetischer Nord- oder Südpol fungieren kann. Typischerweise besitzen Schrittmotoren einen Permanentmagneten und/oder einen eisernen Rotor sowie einen Stator. Das zur Drehung des Schrittmotors erforderliche Drehmoment wird über eine Kommutierung erzeugt.

Zur Ansteuerung der Schrittmotoren wird ein Schrittmortreiber benötigt, der in zwei verschiedenen Betriebsmodi gefahren werden kann, die als Halb- und Vollschritt bezeichnet werden. Bei Ansteuerung im Halbschrittbetrieb legt der Rotor des Schrittmotors jeweils den halben Weg zwischen zwei Haltepositionen zurück. Dadurch wird die Auflösung erhöht und die Bewegung über den gesamten Drehzahlbereich gleichmäßiger. Nach Abschalten der Stromzufuhr dreht sich der Motor jeweils bis zur nächsten Halteposition weiter. Bei Ansteuerung im Vollschrittbetrieb wird der Schrittmotor jeweils von einer Halteposition in die nächste Vollschrittposition bewegt. Nach Abschalten der Stromzufuhr hält der Motor aufgrund seines starken Haltemoments seine Position.



Um das Messsystem POMES in der Horizontal- bzw. Vertikalebene zu drehen, wurden je ein Hybrid-Schrittmotor eingesetzt. Ein Vollschritt führt zu einer Winkeländerung der Antriebsachse von 2 gon (200 Schritte pro Umdrehung), ein Halbschritt dementsprechend zu einer minimalen Änderung von 1 gon. Die praktischen Tests zeigten, dass die Motoren im Halbschrittverfahren einen ruhigeren Lauf aufweisen. Die Schrittmotoren bewegen sich weicher und sind weniger anfällig für Resonanzen, wenn sie im Halbschrittbetrieb laufen.

Durch den Einsatz eines Zahnriemengetriebes (Zugmittelgetriebe mit Formpaarung) an beiden Antriebsachsen mit einer Übersetzung von 1:10 können so kleinste Schrittweiten von 0,1 gon realisiert werden. Die innere Genauigkeit der Schrittmotoren wird von den Herstellern mit ca. 5 % angegeben. Dabei ist es vorteilhaft, dass sich die Ungenauigkeiten in der Positionierung bei fortschreitender Bewegung nicht aufsummieren, da die relative Positionsgenauigkeit nahezu konstant bleibt [Büngener, 1995]. Die aus dem angesprochenen Winkelfehler resultierende Lageabweichung beträgt bei einer Zielweite von 20 Metern 3 mm am Objekt.

## Steuerung

Die Steuerung der Drehbewegungen des Prototypen, d. h. die Ansteuerung der Schrittmotoren erfolgt über die parallele Schnittstelle eines Notebooks. Der Laserhandentfernungsmesser verfügt über einen seriellen Anschluss und wird über eine frei programmierbare Befehlssprache angesprochen. Über verschiedene Unterprogramme, die zentral von einem Hauptprogramm aufgerufen werden, gelingt die komplette Steuerung des Messgerätes von einer Abfrage der Seriennummer, Hard- und Software des verwendeten Entfernungsmessgerätes, Ladezustand der eingesetzten Akkus, über die Horizontierung des Lasers bis zur Messung von vertikalen oder horizontalen Profilen. Eine Messung von Einzelpunkten ist ebenfalls möglich. Das „Scannen“ einer Oberfläche, z. B. die Begrenzungsebenen eines Raumes, ist durch Auswahl eines horizontalen bzw. vertikalen Rasters ebenfalls in der Software implementiert.

Die Horizontierung des POMES erfolgt über eine Röhrenlibelle, die eine Genauigkeit von 30" besitzt. Der aufgesetzte Laserentfernungsmesser Disto Pro wird über die Software horizontiert, indem mittels Bewegen der Schrittmotoren die Dosenlibelle auf der Gehäuseoberseite eingespielt wird. Dabei sind die Schrittweiten frei wählbar, die kleinste mögliche Schrittweite beträgt 0,1 gon. Nach Abschluss der Horizontierung werden dem Prototypen jeweils 100 gon für die Horizontal- und Vertikalrichtung vorgegeben und durch eine Auswahl des Messmodus (Einzelpunktbestimmung, Messung von horizontalen und vertikalen Profilen) ist eine schnelle und automatische Messung möglich. Dabei beträgt die durchschnittliche Datenerfassungsrate mit diesem Messinstrument ca. 5.000 Punkte/Std.

## 2.5 Diskussion

In diesem Kapitel wurden die grundlegenden Prinzipien der scannenden polaren Messverfahren unter spezieller Berücksichtigung des tachymetrischen Messprinzips eingeführt. Zu diesem Messverfahren gehören die elektronischen, reflektorlos messenden Tachymeter und einige Vertreter der unter dem Sammelbegriff zusammengefassten Laserscanner, die teilweise unterschiedliche Messprinzipien für die Distanzmessung, aber auch verschiedene Konstruktionsprinzipien zur Auslenkung des Messstrahls nutzen.

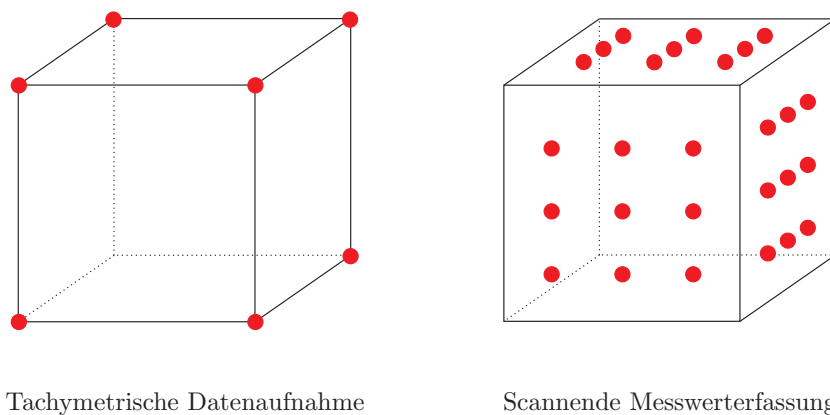
Mit diesen Instrumenten können in Abhängigkeit vom eingesetzten Distanzmess- und Strahlauslenkungsprinzip zum Teil enorm hohe Abtastraten mit bis zu > 500.000 diskreten Messpunkten pro Sekunde erreicht werden, die in verschiedenen Schritten der Auswertung gespeichert und verarbeitet werden müssen. Auf der anderen Seite können aber auch durch die Nutzung von preiswerten Komponenten in Kombination mit handelsüblichen Steuerungs- und Regelungsbauteilen Messsysteme konzipiert werden, die einen Bruchteil der Herstellungskosten aktueller Laserscanner kosten. Die anfallenden Datenmengen beim Einsatz dieser Systeme sind dann geringer und die Anwendungsgebiete sind anderer Natur, jedoch können die Algorithmen der Auswertung, die Bestandteil des nächsten Kapitels sind, übertragen werden.

## 3 Messdatenverarbeitung und Ableitung strukturierter Geometriedaten

### 3.1 Einführung

Die tachymetrische Datengewinnung unterscheidet sich gegenüber der abtastenden Erfassung bei der Laserscanneraufnahme hinsichtlich der Strategien bei der Datenaufnahme und der anschließenden Modellierung. Bei der tachymetrischen Aufnahme erfolgt die Modellbildung vor oder während des Messvorgangs, da der Beobachter direkt vor Ort entscheidet, welche Punkte aufzunehmen sind. Die Auswahl der Messpunkte erfolgt gezielt durch die Auswahl weniger, aber repräsentativer Punkte am Objekt.

Hingegen wird bei scannenden Messverfahren die Objektoberfläche meist mit einem Raster an Messpunkten überzogen, vgl. auch Abbildung 3.1. Die für die idealisierte Geometrie notwendigen diskreten Punkte werden mit einem scannenden Messsystem nicht aufgenommen, vielmehr erfolgt die Modellbildung im Anschluss durch interaktive Modellierung in einem zeitaufwändigen Prozess. Dabei werden aus Teilen der Punktwolke durch halbautomatische Verfahren geometrische Primitive, wie Ebenen, Kugeln und Zylinder abgeleitet. Durch anschließende Verschneidung und Aggregation dieser Regelkörper werden Modelle der aufgenommenen Objekte gebildet. Die für diese Modellierung verwendeten Ansätze der volumen- oder flächenbasierten Modelle sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, siehe dazu beispielsweise [Hoffmann, 1989] und [Foley u. a., 1995].



**Abb. 3.1:** Tachymetrische Datenaufnahme versus scannende Messwerterfassung.

Kommerzielle Laserscanner stellen dem Anwender meist nur kartesische Koordinaten zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung. Nach instrumenteninterner Umwandlung der originären Messdaten eines scannenden Systems in kartesische Koordinaten liegen Punktwolken vor, die jedoch Bestandteil einer unklassifizierten und ungeordneten Menge sind, d. h. es liegen keinerlei semantische Informationen und Hinweise über logische Zuordnungen der Nachbarschaftsverhältnisse vor. Zur geometrischen Beschreibung können daher nur Punktobjekte durch Zuordnung der entsprechenden Koordinatentripel definiert werden.

Das Ziel der an den Aufnahmeprozess sich anschließenden Auswertungen ist zunächst die Gewinnung von strukturierten Geometrieinformationen, d. h. dass reale Objekte durch mathematische Modelle zu abstrahieren sind. Diese strukturierten Geometriedaten sind wiederum Ausgangspunkt für die weitere Bearbeitung im Zuge der Auswertung. Zu diesem Zweck sind verschiedene Algorithmen erforderlich, die aus den Punktwolken definierte Objekte in Form von geometrischen Primitiven abzuleiten in der Lage sind. Dazu ist neben der bereitzustellenden Topologie eine Segmentierung der Punktwolke und eine anschließende Parameterschätzung durchzuführen.

Das einfachste Geometrieelement, welches im Bereich der Einsatzgebiete scannender Messsysteme am meisten vertreten ist und sich verhältnismäßig einfach modellieren lässt, ist das geometrische Element **Ebene**. Am Beispiel des Elementes Ebene wird im Folgenden beschrieben, wie die Ableitung strukturierter Geometriedaten vorgenommen werden kann. Es ist jedoch ohne weiteres möglich, Flächen zweiter und höherer Ordnung zu modellieren, auf die in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen wird.

Hinsichtlich des Segmentierungsprozesses und der damit verbundenen Homogenität ebener Flächen, die intensiv in Kapitel 3.3 besprochen werden, sind die nachfolgenden Ausführungen zu treffen. Jede Ebene hat eine gewisse Rauigkeit, die unter Umständen nicht gleichmäßig ist und in lokal unterschiedlichen Ausprägungen vorhanden sein kann. Als Beispiel für die unterschiedlichen Rauigkeiten kann der einfache Fall von Wänden in Gebäudeinnenräumen herangezogen werden. Mit Struktur- oder Raufasertapete versehene Wände oder Decken haben lokal betrachtet eine größere Rauigkeit als vergleichbare untapezierte Wände. Dabei soll der Fall ausgeschlossen sein, dass durch die aufgebrachte Tapete Löcher oder andere Fehlstellen verdeckt werden und somit nicht in die Betrachtung mit eingehen. Die Erfassung bzw. die Möglichkeiten zur Bestimmung dieser Rauigkeiten sind von der Auflösung und der Genauigkeit der zur Messung verwendeten Instrumente abhängig. Als Parameter zur Bestimmung und Modellierung der Rauigkeit kann der Abstand von einer ausgeglichenen Ebene angesehen werden, wobei an der Bestimmung der ausgeglichenen Ebene, siehe Kapitel 3.3.3, alle auf dieser ebenen Fläche gemessenen Objektpunkte teilnehmen.

Des Weiteren können Ebenen Wölbungen konvexer oder konkaver Natur aufweisen, die so dimensioniert sein können, dass sie nur mit Messverfahren einer um ein Vielfaches höheren Genauigkeit und anschließender Ausgleichung der Messdaten aufzudecken sind. Diese Betrachtungsweise ist jedoch abhängig von der Auflösung und von den gegebenen Genauigkeitsforderungen in Relation zu den weiteren Aufgabenstellungen, zu der die betrachteten Ebenen herangezogen werden sollen.

Jede Ebene kann außerdem in ihrer Ausdehnung Unstetigkeits- und Störstellen aufweisen, die bei Modellierung der Ebenen im Segmentierungsprozess zu finden und zu beseitigen sind. Dies können nicht modellierbare (kleine) Vorsprünge und Vertiefungen oder aber anderweitig verursachte Fehler in der Struktur der idealen ebenen Fläche sein.

Als ideale Ebene wird eine ebene Fläche bezeichnet, die bei Nutzung eines bestimmten Messverfahrens einer gegebenen Genauigkeit unter Vernachlässigung des Messrauschens keine Abweichungen von der Sollgeometrie der Formgleichung einer Ebene aufweist. Diese Idealvorstellung ist in der Praxis natürlich nicht zu realisieren, da die Messinstrumente abhängig von der Genauigkeitsforderung des Nutzers einem Messrauschen unterliegen und die Ebenheit einer Objekt Oberfläche vom Bearbeitungszustand und der Güte des verwendeten Materials abhängig ist. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Genauigkeitsanforderungen an die verwendeten Ebenen eher im *Millimeterbereich* anzusiedeln sind, als im Zentimeterbereich oder gar im Mikrometerbereich. Eine Ebene mit Ausdehnungen von Unstetigkeits- oder Störstellen kleiner als  $\approx 1$  Millimeter wird daher als ideale Ebene behandelt. Eine Betrachtung bis hin zum mikroskopischen Bereich soll hier nicht erfolgen.

## 3.2 Triangulierung

Zum Übergang zwischen den punktförmigen Daten der aufgenommenen Messwerte zu linienhaften und flächenhaften Aussagen bieten sich zur Festlegung der Topologie die Algorithmen der Triangulierung (Dreiecksvermaschung) und der Nachbarschaftsgraphen [Bill, 1999] an. Wie bereits angesprochen, liegen nach einer Datenerfassung mit einem Laserscanner in den allermeisten Fällen nur dreidimensionale kartesische Koordinaten vor. Zur Festlegung der Topologie müsste in diesem Fall eine strenge 3D-Triangulation berechnet werden, da die zu triangulierende Oberfläche durch Punkte  $P_i$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_i = f(u, v) = \begin{pmatrix} f_x(u, v) \\ f_y(u, v) \\ f_z(u, v) \end{pmatrix}_i \quad (3.1)$$

mit  $(u, v) \in B$  und der Funktion  $f$  über den Bereich  $B \subset \mathbb{R}^2$  beschrieben wird. Dies kann aufgrund gleicher Koordinatenwerte für verschiedene Punkte  $P_i$  zu Mehrdeutigkeiten führen. Durch eine Umparametrisierung der kartesischen Koordinaten in polare Messungselemente und der Bestimmung der Topologie auf der Einheitskugel wird die 3D Problematik auf ein 2,5D Problem reduziert. In diesem Fall ist die zu triangulierende Oberfläche eine Menge an Punkten  $P_i = (\phi, \Theta, S)_i^T$  zu

$$S_i = f(\phi, \Theta)_i, \quad r_i = 1 \quad (3.2)$$

mit der Funktion  $f$  über den Bereich  $B \subset \mathbb{R}^2$  beschrieben. Unter der Annahme einer konstruktionsbedingten Zentralperspektive der scannenden Instrumente und bei Vorliegen von nur einem Instrumentenstandpunkt kann in diesem Fall davon ausgegangen werden, dass es für eine Kombination von  $\phi$  und  $\Theta$  - Tupeln keine zwei Distanzinformationen  $S$  gibt. Aus diesem Grund kann zur Ableitung der Topologie auf eine zweidimensionale

Dreiecksvermaschung zurückgegriffen werden. Diese Dreiecksstrukturen repräsentieren geometrisch eine ebene Flächenfunktion, mit denen sich elementare Flächenfunktionen wie z. B. Normalenberechnungen und Flächenschnitte berechnen lassen [Gründig, 1988].

Eine Triangulation einer Menge  $\mathcal{M}$  zweidimensionaler Punkte  $\{P_i\}$ , für  $i = 1, \dots, n$  ist eine zusammengehörige Menge an Dreiecken, so dass nach [Farin und Hansford, 1998] gilt:

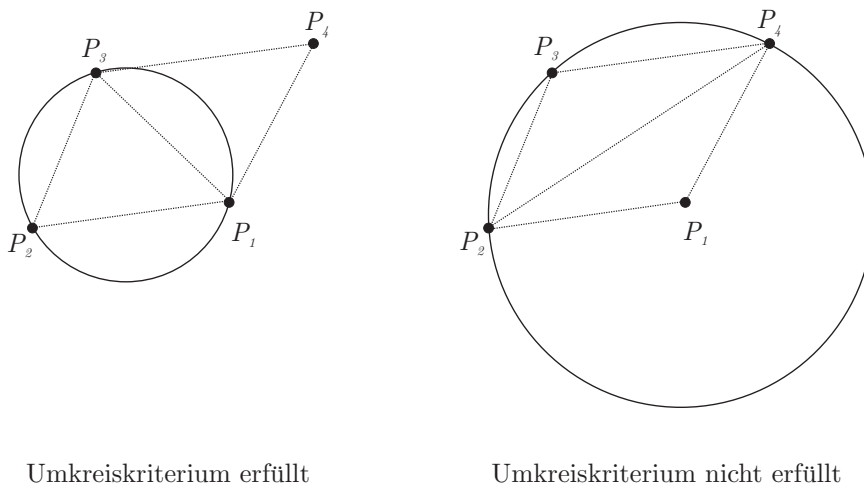
1. Die Eckpunkte der Dreiecke werden gebildet aus den gegebenen Punkten  $P_i$
2. Der Durchschnitt des Inneren zweier Dreiecke ist leer
3. Sind zwei Dreiecke nicht disjunkt, haben sie einen gemeinsamen Eckpunkt oder fallen in einer Kante zusammen
4. Die Vereinigung aller Dreiecke ergibt die konvexe Hülle der Punktmenge, die das umschreibende konvexe Polygon von  $\mathcal{M}$  mit minimaler Fläche darstellt

Auf Grundlage der an die Triangulierung gestellten Anforderungen lassen sich unterschiedliche Vermaschungsmethoden formulieren [Hoschek und Lasser, 1992]:

- Kriterium der kürzeren Diagonale
- Max-Min-Winkelkriterium
- Min-Max-Winkelkriterium
- Minimierung der Summe der Längen aller Dreieckskanten
- Kriterien auf Grundlage von Funktionswerten (Radius, Fläche) oder Attributen (Höhenangaben)

### 3.2.1 Delaunay-Triangulierung

Die Forderung nach Erfüllung des Umkreiskriteriums führt zur DELAUNAY-Triangulierung, siehe Abbildung 3.2, die die Eigenschaft aufweist, dass der Umkreis jedes vermaschten Dreiecks keine anderen Punkte der Triangulation enthält [de Berg u. a., 2002] und sie zusätzlich den minimalen Dreiecksinnenwinkel maximiert (Max-Min-Winkelkriterium). Die Triangulation ist geometrisch eindeutig, wenn in der gesamten Punktmenge nicht mehr als drei Punkte auf einem Kreis liegen. Zur Berechnung von DELAUNAY-Triangulationen sind verschiedene Algorithmen entwickelt worden, die z. B. in [Lenk, 2001] einer eingehenden Untersuchung unterworfen werden.



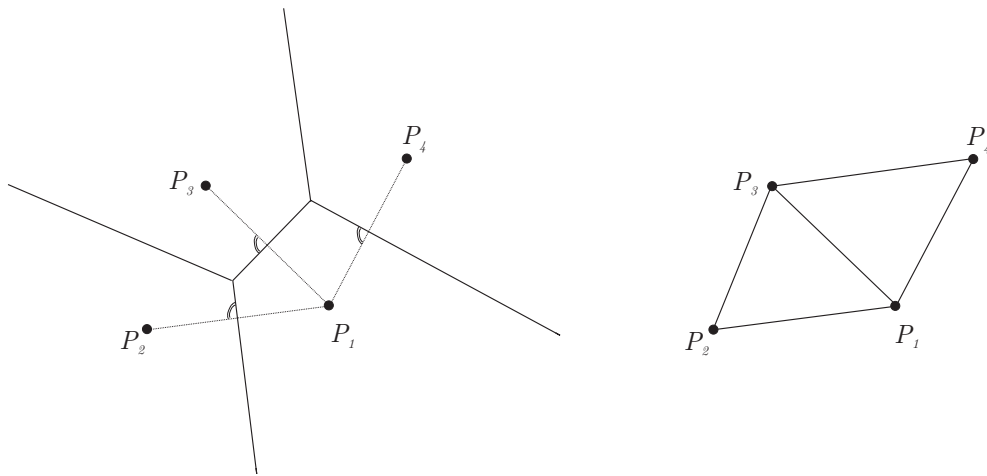
**Abb. 3.2:** Umkreiskriterium der DELAUNAY-Triangulation, nach [Hoschek und Lasser, 1992].

Die DELAUNAY-Triangulierung ist eine Methode, die wohlgeformte Dreiecke produziert, d. h. es wird angestrebt, die Bildung von langen dünnen Dreiecken zu vermeiden. Die resultierenden Dreiecke überlappen sich nicht und vermaschen eine beliebig große Punktmenge flächendeckend und eindeutig. Die DELAUNAY-Triangulierung ist

die zum VORONOI-Diagramm, auch als DIRICHLET-Tessellation (Parkettierung) bezeichnete, duale Struktur, vgl. Abbildung 3.3. Die zu den Punkten  $P_i$  zugehörigen Fliesen  $F_i$  der DIRICHLET-Parkettierung sind definiert durch

$$F_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : a(\mathbf{x}, P_i) \leq a(\mathbf{x}, P_j) \text{ für alle } i \neq j\} \quad (3.3)$$

mit euklidischem Abstand  $a(\mathbf{x}, P_k)$ , d.h.  $F_i$  ist ein Polygon und besteht aus den Punkten  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$ , die von  $P_i$  einen kleineren Abstand haben als zu allen anderen  $P_i$  mit  $i \neq j$ . Ein einzelnes VORONOI-Polygon ist durch die Mittelsenkrechten der Verbindungsgeraden des Punktes  $P_i$  und den jeweils benachbarten Punkten definiert. Wird dies für alle Punkte einer Region angewendet, so wird das gesamte Gebiet in nebeneinander liegende Polygone aufgeteilt, die zusammen das VORONOI-Diagramm ergeben. Das VORONOI-Diagramm eines Ausschnittes einer Punktmenge beschreibt die Nachbarschaftsverhältnisse einer Punktverteilung. Wenn man von einem VORONOI-Diagramm als Basis ausgeht, so erhält man die DELAUNAY-Triangulation der Punkte  $P_i$ , dargestellt in Abbildung 3.3 rechts, als duale Struktur der DIRICHLET-Parkettierung, d.h. Punkte  $P_i$  und  $P_j$  werden miteinander verbunden, falls die Fliesen  $F_i$  und  $F_j$  der zugehörigen DIRICHLET-Parkettierung eine gemeinsame Kante besitzen [Hoschek und Lasser, 1992]. Angewendet auf alle Punkte der Menge erhält man ein Netzwerk bestehend aus Dreiecken, das alle Punkte innerhalb der konvexen Hülle miteinander verbindet.



**Abb. 3.3:** VORONOI-Diagramm (links) und DELAUNAY-Triangulation (rechts), nach [Hoschek und Lasser, 1992].

### 3.2.2 Triangulierung polarer Messdaten

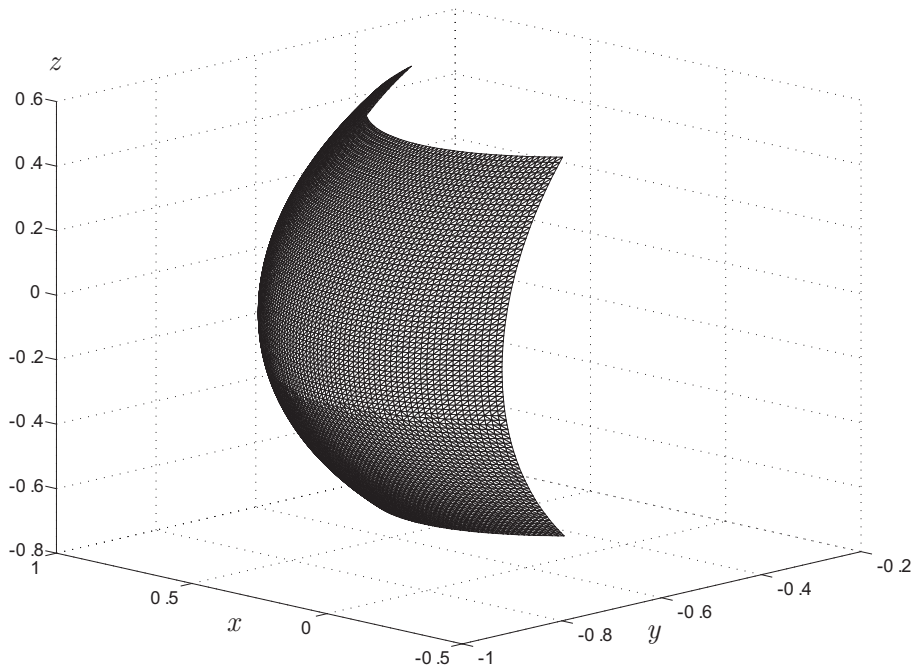
Die originären Messelemente, die mit polaren scannenden Messsystemen aufgenommen werden, sind aus der Stellung der Schrittmotoren oder Winkelencoders abgeleitete unkorrigierte Horizontalrichtungen  $\phi_i$  und Vertikalwinkel  $\Theta_i$  sowie die vom Entfernungsmessteil bestimmte Schrägstrecke  $S_i$ . Liegen hingegen die kartesischen Koordinaten (meist bei der Aufnahme mittels Laserscanner) als Ergebnis einer Datenerfassung vor, lassen sich die polaren Messelemente leicht aus den Koordinaten des Instrumentennullpunktes  $P_S = (x_s, y_s, z_s)^T$  und den Objektpunkten  $P_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  durch

$$\begin{aligned} S_i &= \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} \\ \phi_i &= \arctan \frac{y_i - y_s}{x_i - x_s} \\ \Theta_i &= \arccos \frac{z_i - z_s}{S_i} \end{aligned} \quad (3.4)$$

berechnen. Der Instrumentennullpunkt  $P_S$  ist dabei definiert als der Schnittpunkt der Hauptachsen des polar messenden Instruments, d.h. als Schnittpunkt der Rotationsachsen und der Zielachse des Entfernungsmessers. Wie in Kapitel 5 dargelegt wird, ist die Annahme, die Hauptachsen des Instrumentes würden sich in einem gemeinsamen Punkt schneiden, zu überprüfen und bei Vorliegen von Exzentrizitäten sind geeignete Korrekturmodelle aufzustellen. Sind eventuell auftretende Instrumentenfehler bekannt, werden die Messwerte mit

entsprechenden Korrekturformeln korrigiert. Die Umrechnung nach Gleichung 3.4 erfolgt rein kartesisch, wobei die Konvergenz der Lotlinien und der Einfluss der Refraktion für das Laserscanning (im Nahbereich) vernachlässigbar sind und somit bei der Bestimmung der polaren Messelemente keine Rolle spielen.

Wie bereits beschrieben, werden zur Dreiecksvermaschung nur die polaren Messungselemente, hier Horizontalwinkel  $\phi_i$  sowie die Zenitdistanzen  $\Theta_i$ , herangezogen und die Vermaschung findet auf einer Einheitskugel statt, d. h. es handelt sich dabei um die Projektion in den  $\mathbb{R}^2$  oder Abwicklung der räumlichen Messgrößen  $\phi_i$  und  $\Theta_i$  in die Ebene. Für jeden Messpunkt der Punktwolke  $P_i$  wird deshalb ein einzelner Strahl, gebildet aus dem jeweiligen Beobachtungen  $\phi_i$  und  $\Theta_i$ , mit der Einheitskugel geschnitten. Die Vermaschung auf einer Einheitskugel, dargestellt in Abbildung 3.4 [Matlab, 2002]<sup>1</sup>, dient nur zur Bestimmung der Topologie der beteiligten Punkte, deshalb kann auf die Entfernungsinformation in diesem Schritt der Auswertung verzichtet werden. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch aus, dass aufgrund des Messprinzips polarer geodätischer Instrumente die Auflösung zu den Polen der Einheitskugel hin deutlich zunimmt, d. h. die Verteilung der Messpunkte am Objekt sehr inhomogen ist.



**Abb. 3.4:** Ausschnitt einer DELAUNAY-Triangulierung auf der Einheitskugel, d. h. die Beobachtungen  $H z_i$  und  $V_i$  werden in den  $\mathbb{R}^2$  abgewickelt, die Darstellung erfolgt dennoch räumlich.

Die entstehende Triangulation ist um verschiedene Fehlstellen zu bereinigen. Speziell beim Einsatz des Prototypen POMES können sich in den Punktwolken aufgrund des Messprinzips der Streckenmessung Löcher in der Triangulierung ergeben. Diese Diskontinuitäten entstehen immer dann, wenn zu einem Messpunkt aufgrund ungünstiger Reflexionseigenschaften der Oberfläche durch das Streckenmessteil keine Distanz gemessen werden konnte. Der entsprechende Objektpunkt kann dann nicht für die weiteren Auswerteschritte herangezogen werden. Ebenso kann die Streckenmessung durch äußere Einflüsse verfälscht worden sein, so dass eine falsche Distanz gemessen wurde. Der Grund für derartige Effekte sind z. B. ungünstige Reflexionseigenschaften der Oberflächenstrukturen der angemessenen Objekte oder eine Mehrfachreflexion an Glas oder glasähnlichen Strukturen.

### 3.3 Segmentierung

#### 3.3.1 Allgemeines

Unter Segmentierung wird eine Zerlegung eines Bildes in semantische Einheiten, d. h. in Strukturen, denen eine Bedeutung zugeordnet werden kann, verstanden. Dabei erfolgt die Zerlegung in sich nicht überlappende Regionen und dies derart, dass die einzelnen Regionen homogen sind und die Vereinigung zweier benachbarter

<sup>1</sup>Der in MATLAB implementierte Algorithmus der DELAUNAY-Triangulation basiert auf *qhull* [Barber u. a., 1996].

Regionen keine homogene Region ergibt. Unter Homogenität<sup>2</sup> wird die Unabhängigkeit einer Eigenschaft vom Ort bzw. allgemeiner formuliert, die Gleichheit einer Eigenschaft über die gesamte Ausdehnung eines Systems verstanden. Bei der betrachteten Eigenschaft kann es sich z. B. um ein mathematisches Attribut oder eine physikalische Eigenschaft handeln. Die Zerlegung sollte „*zweckmäßig hinsichtlich der entsprechenden Anwendung sein*“ [Haralick und Shapiro, 1993]. Im Hinblick auf die Auswertung der Daten von polaren Messsystemen ist mit der Segmentierung ein Entscheidungsprozess verbunden, der es erlaubt, eine Trennung von Objekten untereinander bzw. eine Trennung von Objekten, die einer weiteren Verarbeitung zugeführt werden sollen, von Objekten, die nicht „interessant“ sind, zu ermöglichen. Die Vorgehensweise bei der Segmentierung lässt sich vereinfacht folgendermaßen beschreiben:

1. Definition eines Kriteriums oder entsprechender Parameter, die aus der vorgegebenen Menge an Punkten berechnet werden können oder aber bekannt sind
  - a) Finden von Änderungen
    - i. Verfolgung des Verlauf der Parameter über Ort oder Zeit
    - ii. Annahme einer Segmentgrenze, wenn sich die Parameter genügend stark geändert haben
  - b) Finden homogener Bereiche
    - i. Verfolgung des Verlauf der Parameter über Ort oder Zeit
    - ii. Annahme eines homogenen Bereichs, wenn sich die Parameter innerhalb einer (definierten) Grenze ändern
2. Verbesserung bzw. Korrektur der Segmentierung (Eliminierung von störenden Objekten, Schließen von Lücken)

Die Segmentierungsverfahren, die ihren Ursprung in der digitalen Bildverarbeitung haben, können in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Die punktorientierten Verfahren haben die Extraktion von punktförmigen Merkmalen zum Ziel, beispielsweise Ecken. Neben den kantenorientierten Verfahren, die linienhafte Strukturen extrahieren, wird des Weiteren noch in flächenorientierte Verfahren unterschieden [Jähne, 1993]. Im Gegensatz zu punktorientierten Segmentierungsverfahren wird hier versucht, die lokalen Eigenschaften eines Objektes zu ermitteln, um diese dann in der Objektidentifizierung einzusetzen. Unter Flächen sind Regionen zu verstehen, die sich durch eine Homogenität auszeichnen und sich aus diesem Grund mit zwei verschiedenen Ansätzen detektieren lassen [Brenner, 2000]. Entweder wird der Flächenrand auf der Basis von Diskontinuitäten detektiert und nachfolgend die Fläche als Region innerhalb des Randes bestimmt. Oder aber die Fläche wird auf Grundlage ihrer Homogenität über ein regionenbasiertes Verfahren bestimmt. Die Flächenränder lassen sich anschließend über die Trennlinien der detektierten Flächen ableiten.

Die generelle Formulierung einer regionenbasierten Segmentierung für den Fall der Verarbeitung von Punktwolken kann wie folgt beschrieben werden [Haralick und Shapiro, 1993]: Bei der Segmentierung einer Menge von Punkten  $\mathbf{P}_i$ , die eine Gesamtregion  $R$  bilden und in  $f$  disjunkte, nicht leere Teilregionen  $R_f$  zerlegt werden sollen, gilt unter einem zu definierenden Einheitlichkeitskriterium  $E(f_i)$  folgendes:

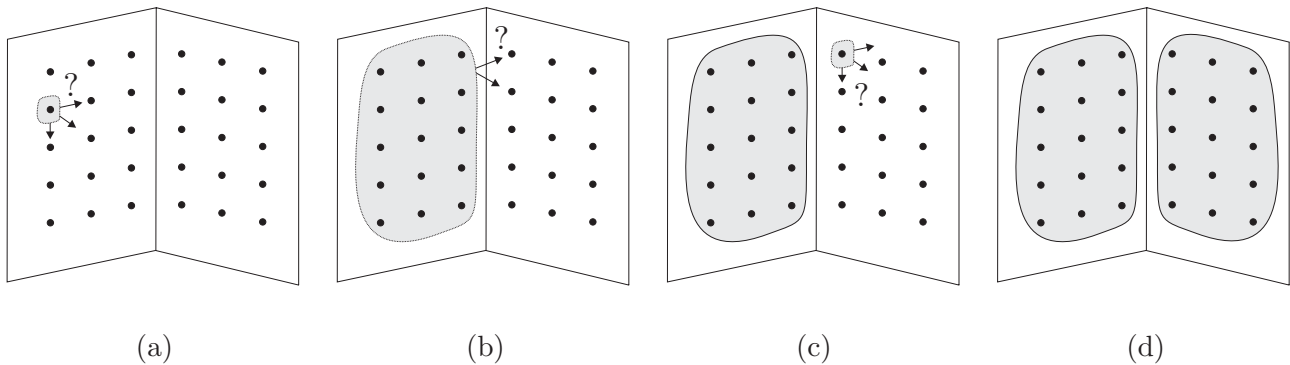
1.  $\cup_{i=1}^f f_i = f$
2. jedes  $f_i$  ist räumlich zusammenhängend
3. Das Einheitlichkeitskriterium  $E(f_i)$  ist erfüllt für jedes  $f_i$
4. Für jede Vereinigungsmenge zweier benachbarter  $f_i, f_j$  ist  $E(f_i \cup f_j)$  nicht erfüllt

Das zu definierende Einheitlichkeitskriterium  $E(f_i)$  ist im Kontext der Auswertung von polaren Messdaten z. B. die Ebenheit von benachbarten Dreiecken der triangulierten Punktwolke, die als Schwellwert definiert wird. Sie wird genutzt, um die Punkte regionenweise zu einem Objekt verschmelzen zu lassen. Die notwendige Initialisierung, d. h. die Vorgabe eines Startpunktes, auch Saatpunkt genannt, kann im vorliegenden Fall willkürlich erfolgen, vgl. Abbildung 3.5 (a). Nach dieser Initialisierung werden die benachbarten Elemente gemäß des vordefinierten Homogenitätskriteriums untersucht, ob sie mit den Merkmalen des Startelementes übereinstimmen (b). Ein Hinzufügen der positiv getesteten Elemente zur Region ist mit einem iterativen Wachstum der Region verbunden. Die Iteration wird abgebrochen, wenn kein benachbartes Element das Kriterium erfüllt oder wenn die Menge aller zu untersuchenden Elemente durchlaufen ist. In der Menge der verbliebenen Elemente findet

---

<sup>2</sup>griechisch: homogenos – von gleicher Art

anschließend eine weitere Initialisierung statt (c). Der beschriebene iterative Prozess beginnt von Neuem und terminiert idealerweise, wenn alle Elemente, die das Homogenitätskriterium erfüllen, entsprechenden Regionen zugeordnet sind (d).



**Abb. 3.5:** Schematische Darstellung zum Vorgehen bei der Segmentierung am Beispiel der Messdatenerfassung zweier ebener Regionen.

Üblicherweise wird nach Auswahl eines Saatpunktes nach jedem Hinzufügen eines benachbarten Elementes eine erneute Parameterschätzung durchgeführt. Dabei ist das Ergebnis der Segmentierung abhängig von der Wahl des Saatpunktes. Eine Verlegung des Saatpunktes führt im Allgemeinen zu veränderten Ergebnissen. Bei dem im nächsten Abschnitt vorgestellten Segmentierungsverfahren hingegen findet eine optimale Parameterschätzung erst nach der Interpretation durch einen Segmentierungsalgorithmus statt.

### 3.3.2 Methoden zur automatischen Ebenendetektion

Nach der Triangulierung der Punktwolke folgt die vollautomatische Erkennung und Modellierung des geometrisch strukturierten Elementes *Ebene*, unter der Voraussetzung, dass in den aufgenommenen Daten ebene Bereiche oder Teilbereiche vorhanden sind. Bei eingehender Betrachtung von Bauwerken, Maschinen, Anlagen oder auch Teilen derselben wird deutlich, dass die Ebene das (zumeist) vorherrschende Geometrieelement darstellt. Bei der automatischen Ebenendetektion wird, aufbauend auf den topologischen Beziehungen aus der Dreiecksvermaschung, anhand verschiedener Berechnungsschritte und dem Einsatz statistischer Testverfahren eine Zuordnung der gemessenen Punkte zu im Raum verteilten Ebenen durchgeführt. Nach einer Entscheidung, ob benachbarte Dreiecke in einer Ebene liegen, müssen gleichartige Bereiche zu einer Region zusammengefasst werden. Das hierzu eingesetzte Verfahren gehört dann zu den so genannten Bereichswachstumsverfahren (region growing).

#### Spatprodukt als Homogenitätskriterium

Ein Kriterium zur Entscheidung, ob Punkte einer Teilmenge der aufgenommenen Punktwolke in einer Ebene liegen, ist die Berechnung und statistische Auswertung des Spatproduktes. Untersucht werden jeweils zwei benachbarte Dreiecke (eine gemeinsame Kante) der gesamten Menge an Dreiecken aus der Triangulierung dahingehend, ob diese zwei Dreiecke innerhalb statistischer Grenzen hinreichend genau eine Ebene definieren. Zu jeder Dreieckskante müssen zwei weitere Kanten gesucht werden, die einen Punkt mit der ersten Kante gemeinsam haben. Somit liegen vier Punkte vor, die ein Parallelepiped aufspannen, vgl. Abbildung 3.6. Sind die drei aus den vier Punkten abgeleiteten Vektoren linear abhängig, ist das zugehörige Volumen Null und die Vektoren, respektive die vier Punkte, liegen in einer Ebene.

Ein anderes Vorgehen wird in [Kern, 2003] vorgeschlagen. In diesem Ansatz der Segmentierung von ebenen Bereichen wird der Winkel betrachtet, den die Normalenvektoren zweier angrenzender Dreiecksflächen bilden. Dieser Winkel ist jedoch von der Größe und Konfiguration der Dreiecke abhängig. Eine korrekte Lösung wird nur erhalten, wenn die Koordinaten der Dreiecke mit ihren stochastischen Informationen in die Berechnung des Schnittwinkels eingehen. Das Verfahren über die Einbeziehung des Spatproduktes mit gleichzeitiger strenger Fehlerfortpflanzung berücksichtigt die Größe und Beschaffenheit (Ausdehnung) der Dreiecke.

Die Testgröße  $h_i$  zur Entscheidung, ob vier Punkte, die zwei benachbarte Dreiecke aufspannen, in einer Ebene liegen, ist der Quotient aus dem Betrag des Spatproduktes und der Standardabweichung dieses Spat-



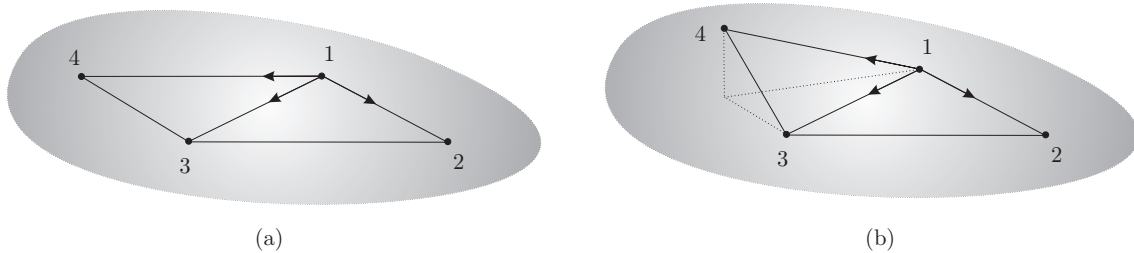
produktes:

$$h_i = \frac{|Spat_i|}{\sigma_{Spat_i}}. \quad (3.5)$$

Das Spatprodukt dreier Vektoren  $\langle \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3 \rangle$  ist eine reelle Zahl und definiert als eine Kombination aus Skalar- und Vektorprodukt. Das Spatprodukt lässt sich aus folgender Determinante berechnen:

$$\langle \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3 \rangle = \det(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3) = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix}. \quad (3.6)$$

Die Vektoren  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$  sind jeweils als die Differenzvektoren, ausgehend von einem Startpunkt  $P_i$  zu den drei anderen beteiligten Punkten  $P_{i+n}$ , mit  $n = 1, \dots, 3$  definiert. Da die in die Berechnung des Spatproduktes eingehenden Punkte  $P_i$  mit ihren dreidimensionalen Koordinaten  $(x, y, z)_i$  bereits fehlerbehaftet sind, muss eine strenge Fehlerfortpflanzung zur Berechnung der Standardabweichung  $\sigma_{Spat_i}$  des Spatproduktes durchgeführt werden, in der die Genauigkeiten der Strecken- und Richtungsmessungen des Messinstrumentes berücksichtigt werden.



**Abb. 3.6:** Illustration zum Spatprodukt dreier Vektoren  $\langle \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3 \rangle$ : Ist das Spatprodukt dreier, aus den Koordinaten der vier beteiligten Punkte abgeleiteten Vektoren, die zwei benachbarte Dreiecke aufspannen, Null, liegen diese vier Punkte in einer Ebene (a). Ist das Spatprodukt hingegen ungleich Null, muss diese These hinsichtlich statistischer Annahmen verworfen werden (b).

Die Varianz des Spatproduktes berechnet sich zu

$$\sigma_{Spat_i}^2 = \mathbf{F}_3 \mathbf{F}_2 \mathbf{F}_1 \mathbf{C}_{ll} \mathbf{F}_1^T \mathbf{F}_2^T \mathbf{F}_3^T \quad (3.7)$$

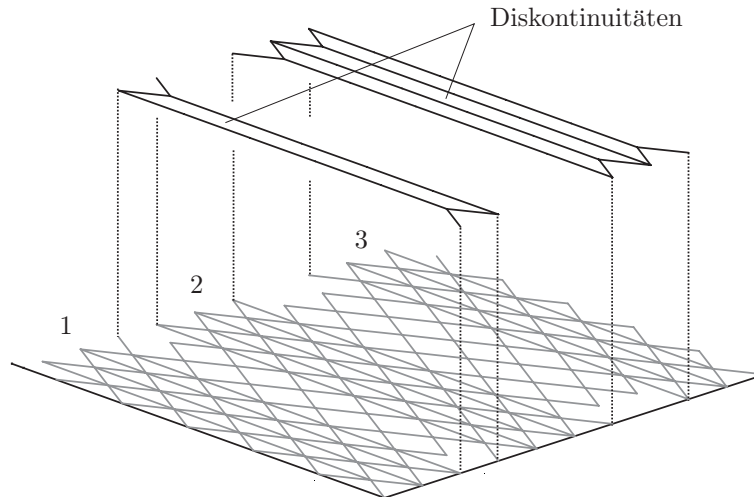
mit  $\mathbf{F}_i$ , für  $i = 1, \dots, 3$  als die benötigten Funktionalmatrizen, die den oben beschriebenen mathematischen Zusammenhang von den Messwerten über die Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten bis zur Berechnung des Spatproduktes widerspiegeln. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen  $\mathbf{C}_{ll}$ , ist abseits der Hauptdiagonalen mit Null besetzt, da unterstellt wird, dass keine Korrelationen zwischen den Beobachtungen vorliegen.

Die Testgröße  $h_i$  folgt der standardisierten Normalverteilung. Nach Festlegung der Nullhypothese sowie der Alternativhypothese

$$H_0 : |Spat_i| = 0 \quad H_A : |Spat_i| \neq 0 \quad (3.8)$$

und Wahl einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  bzw. Festlegung der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $1 - \alpha$  wird die Prüfgröße mit einer Wahrscheinlichkeitsbeziehung den Regeln der mathematischen Statistik folgend, gegen einen Schrankenwert getestet. Ist die Testgröße  $h_i$  größer als der Schrankenwert, kann mit der entsprechenden Sicherheitswahrscheinlichkeit, im Allgemeinen wird 95% angesetzt, davon ausgegangen werden, dass die vier betrachteten Punkte keine gemeinsame Ebene aufspannen. Bleibt die Testgröße unter dem Schrankenwert, so liegen die vier Punkte bzw. zwei angrenzende Dreiecke mit der besagten Sicherheitswahrscheinlichkeit in einer Ebene.

In Abbildung 3.7 ist dieses Vorgehen für eine Testdatensatz, der aus drei ebenen Teilbereichen besteht, dargestellt. Über die Steuerung bzw. Anpassung des Quotienten aus Spatprodukt und der Standardabweichung des Spatproduktes ist direkt ein Aussage über die Rauigkeit und eventuelle Wölbung der untersuchten Ebene möglich. Durch empirische Untersuchungen in Abhängigkeit vom Messrauschen wäre es so beispielsweise für den Prototypen POMES möglich, für verschiedene Oberflächenmaterialien unterschiedliche Parameter zu bestimmen, die jeweils die Rauigkeit einer zu untersuchenden Ebene beschreiben. Durch eine Darstellung gemäß einer „Ampeldarstellung“ lassen sich in Abhängigkeit vom Schrankenwert dynamische Veränderung der detektierten Bereiche ermöglichen.



**Abb. 3.7:** Visualisierung der untersuchten Dreieckskanten: Die Kanten zweier benachbarter Dreiecke, die keine Ebene bilden, sind zur besseren Interpretation höhenversetzt. Die Darstellung lässt sich zu einer Farbdarstellung („Ampeldarstellung“) erweitern, um in Abhängigkeit vom Schrankenwert eine dynamische Veränderung der detektierten Bereiche zu ermöglichen. Deutlich sichtbar heben sich in diesem Beispiel die drei zusammenhängenden Bereiche ab.

### Suchalgorithmus

Die Aufgabe der Regionensuche besteht darin, aus den oben beschriebenen Kanten, für die ermittelt wurde, dass sie mit den zwei Nachbarpunkten eine Ebene bilden, geschlossene Bereiche zu lokalisieren. Abzufangen ist der Fall, dass durch den Algorithmus Segmente detektiert werden, die keiner realen Fläche entsprechen. Dies ist immer am Übergang zwischen zwei real existierenden Ebenen der Fall, beispielsweise an der Schnittkante zwischen zwei orthogonal zueinander ausgerichteten Ebenen (Wand – Wand, Wand – Decke, ...), vgl. Abbildung 3.8.

Bei Anwendung der Ebenenerkennung mit Hilfe des Spatproduktes werden nur die Spatprodukte ungleich Null, bei denen die beiden Punkte der betrachteten Kante auf ein und derselben Ebene liegen. Von den anderen beiden benachbarten Punkten liegt dann ein Punkt in der nächsten Ebene. Für den Fall, dass die beiden Punkte der betrachteten Kante in zwei verschiedenen Ebenen liegen, wird das Spatprodukt trotzdem Null. Deshalb werden alle Kanten, die an die Kanten angrenzen, für die das Spatprodukt ungleich Null ist, aus der weiteren Verarbeitung entfernt.

Die Kanten aus zwei benachbarten ebenen Dreiecken müssen nachfolgend zu einer oder mehreren ebenen und geschlossenen Regionen zusammengefasst werden. Nach Bestimmung einer Startkante  $K_S$  läuft eine Schleife über alle anderen Kanten  $K_i$ , für die das Spatprodukt ebenfalls gleich Null ist. Drei Fälle lassen sich in der Bewertung der jeweilig zu untersuchenden Kanten unterscheiden [Lange, 2003]:

- Verbindung von Kanten innerhalb einer Region: In diesem Fall ist ein Punkt der Kante bereits Bestandteil einer anderen Kante.
- Zusammenfassung von Regionen: Werden hingegen beide Punkte der zu untersuchenden Kante in zwei verschiedenen Regionen gefunden, müssen die Regionen zusammengefasst werden, da die Kante beiden Regionen angehört.
- Neubildung von Regionen: Eine neue Region wird lokalisiert, wenn beide Punkte einer Kante zu keiner bereits untersuchten Kante zugehörig sind.

Nach Durchlaufen der gesamten Schleife liegen geschlossene Regionen vor, die jeweils eine Ebene repräsentieren. Die einzelnen Regionen bzw. die in den Regionen enthaltenen Punkte mit ihren dreidimensionalen Koordinaten werden nachfolgend an die Ebenenausgleichung weitergereicht. Die Ebenenausgleichung ist mit einer Grobfehlersuche implementiert, um etwaige Ausreißer im Beobachtungsmaterial zu lokalisieren. Im folgenden Abschnitt wird zunächst die mathematische Beschreibung einer Ebene eingeführt, anschließend wird auf das Prinzip der ausgeglichenen Ebene näher eingegangen.

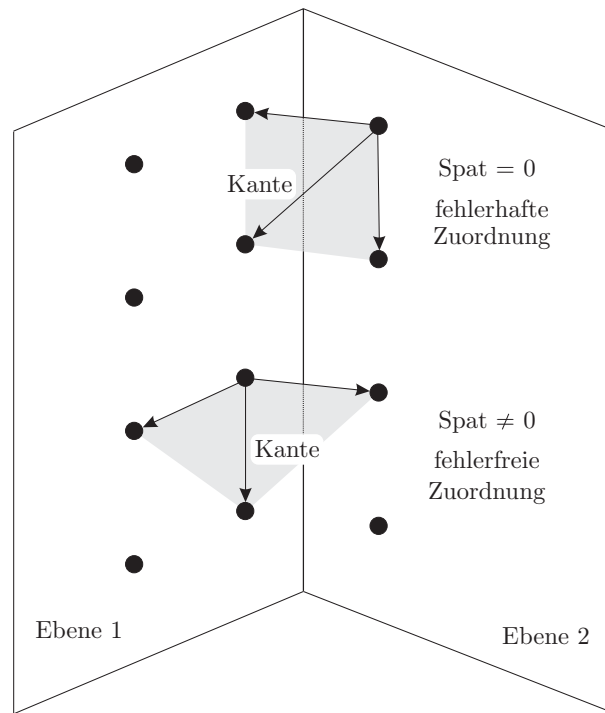


Abb. 3.8: Fehlerfreie und fehlerhafte Zuordnung einer Kante.

### 3.3.3 Optimale Schätzung ebener Regionen

Nach der Segmentierung liegen für die gesamte Punktwolke ebene Regionen mit den jeweils zugehörigen Punkten vor. Auf Grundlage dieser Information werden durch eine abschließende Schätzung die beschreibenden Parameter für jede Ebene abgeleitet. Die Parameterschätzung kann dabei auf verschiedenen Wegen durchgeführt werden, die nachfolgend beschrieben werden. Zuerst wird jedoch ein Überblick über die Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung einer Ebene gegeben.

#### Mathematische Beschreibung Ebenen

Zur Beschreibung von Ebenen im Raum existieren verschiedene Formen der Darstellung. So ist eine Ebene  $E$  eindeutig festgelegt durch

- drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen oder
- einen Punkt sowie zwei linear unabhängige Vektoren oder
- einen Punkt sowie einen Normalenvektor.

Aufbauend auf diese Eigenschaften gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, eine Ebene mathematisch darzustellen [Merzinger und Wirth, 1995]. Zum einen die Parameterdarstellung

$$E : \mathbf{x} = \mathbf{a} + r \cdot \mathbf{b} + s \cdot \mathbf{c}, \quad r, s \in \mathbb{R}. \quad (3.9)$$

Diese Darstellung kennzeichnet eine im Endpunkt von  $\mathbf{a}$  von den beiden linear unabhängigen Vektoren  $\mathbf{b}$  und  $\mathbf{c}$  aufgespannte Ebene. Neben der Parameterdarstellung durch drei Punkte oder der Beschreibung durch einen Punkt und zwei linear unabhängige Vektoren kommt der Koordinatendarstellung der Ebene eine zentrale Bedeutung zu. In der Koordinatendarstellung kann folgende Gleichung formuliert werden:

$$E : \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} - d = 0. \quad (3.10)$$

Nach Umformung in die HESSEsche Normalform (HNF) der Ebene, d. h. der Normalenvektor  $\mathbf{n}$  ist ein Einheitsvektor, kann der Abstand eines beliebigen Punktes zu dieser Ebene bestimmt werden. Der Abstand  $v_i$  eines

Punktes  $P_i$  von einer Ebene im Raum ist die Länge des Lotes von  $P_i$  auf die Ebene. Ist  $E : \mathbf{n} \cdot \mathbf{x} = d$  die HESSESche Normalform der Ebene und  $P_i$  Endpunkt des Vektors  $\mathbf{p}_i$ , so ist

$$v_i = |\mathbf{n} \cdot \mathbf{p} - d|, \quad \text{mit } |\mathbf{n}| = 1 \quad (3.11)$$

der Abstand des Punktes  $P_i$  zur Ebene  $E$ , mit  $d$  als Abstand der Ebene zum Koordinatenursprung. Zur Beschreibung einer Ebene im dreidimensionalen Raum werden, wie oben gezeigt, mindestens drei Punkte benötigt, die nicht auf einer Geraden liegen dürfen. Sind mehr als die drei zur eindeutigen Bestimmung notwendigen Messpunkte  $n$  vorhanden, kann mit der Methode der kleinsten Quadrate eine ausgleichende Ebene berechnet werden.

### Spektralzerlegung

Der hier beschriebene Ansatz der so genannten orthogonalen Regression geht auf [Linkwitz, 1976] zurück, wurde von [Drixler, 1993] weiter ausgeführt und entspricht einer spektralen Zerlegung einer reellwertigen symmetrischen Matrix  $\mathbf{A}$ . Zur Lösung dieses Ausgleichungsproblems, bei der die Summe der Quadrate der orthogonalen Abstände zu den gegebenen Punkten minimal wird, sind keine Näherungswerte nötig und der Ansatz ermöglicht eine direkte Bestimmung der Ebenenparameter ohne Iteration, bietet jedoch keine Möglichkeit, grobe Fehler im Datenmaterial zu lokalisieren.

Die ausgeglichene Ebene ist neben dem orthogonalen Abstand zum Koordinatenursprung durch den Schwerpunkt

$$\mathbf{S}^T = (x_s, y_s, z_s), \quad (3.12)$$

$$\text{mit } x_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad y_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad z_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (3.13)$$

aller beteiligten Messpunkte  $P_i = [x_i, y_i, z_i]$  und den Normalenvektor

$$\mathbf{n}^T = (n_x, n_y, n_z) \quad (3.14)$$

der Ebene gekennzeichnet. Ist die Ebene durch die HESSESche Normalform nach Gleichung 3.10 beschrieben, können die Abstände  $v_i$  aller Messpunkte zur ausgleichenden Ebene (Abbildung 3.9) im Sinne einer vermittelnden Ausgleichung als Verbesserungsgleichungen

$$v_i = n_x x_i + n_y y_i + n_z z_i - d \quad (3.15)$$

interpretiert werden. Um den Abstandsparameter  $d$  zu eliminieren, werden Koordinaten bezogen auf den Schwerpunkt eingeführt. Die Modalmatrix  $\mathbf{A}$  enthält für alle beteiligten Punkte die schwerpunktbezogenen Koordinaten

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_i - x_s & y_i - y_s & z_i - z_s \\ x_{i+1} - x_s & y_{i+1} - y_s & z_{i+1} - z_s \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_s & y_n - y_s & z_n - z_s \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

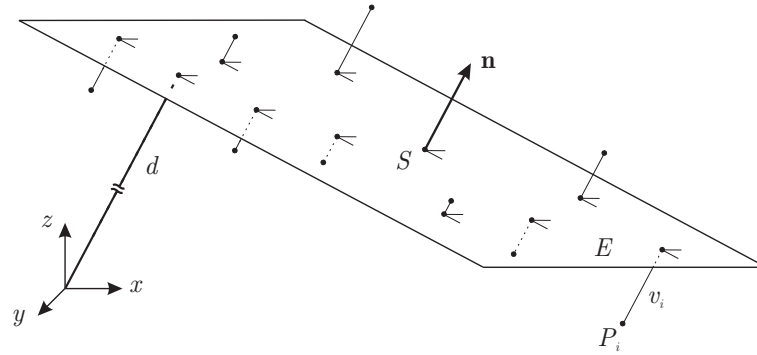
Die spektrale Zerlegung der symmetrischen Normalgleichungsmatrix

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A} \quad (3.17)$$

führt zu den Eigenwerten  $\lambda_{min}$ ,  $\lambda_{mid}$  und  $\lambda_{max}$  sowie zu den zugehörigen Eigenvektoren  $\mathbf{u}_{min}$ ,  $\mathbf{u}_{mid}$  und  $\mathbf{u}_{max}$  [Anderson u. a., 1999], [Matlab, 2002]. Der gesuchte Normalenvektor der Ebene ist parallel zum minimalen Eigenvektor  $\mathbf{u}_{min}$ , die Eigenvektoren  $\mathbf{u}_{mid}$  und  $\mathbf{u}_{max}$  dieser Hauptachsentransformation spannen die bestangepasste Ebene durch alle Messpunkte auf [Heckel u. a., 2001].

### Ebenenausgleichung

Die oben beschriebene Art der Bestimmung des Normalenvektors der ausgleichenden Ebene eignet sich zur Bestimmung von Näherungsparametern für eine vermittelnde Ausgleichung mit Bedingungen zwischen den unbekannt Parametern zur Grobfehlersuche und Verifizierung der Kovarianzen zwischen den Komponenten des Normalenvektors und des Abstandsparameters. Die Näherungsparameter sind jedoch nicht zwingend notwendig, da es sich bei der strengen Ebenenausgleichung um ein bilineares Ausgleichungsproblem handelt. Sind die



**Abb. 3.9:** Ausgeglichebene durch Punkte  $P_i$ .

Näherungswerte bei solch einem Ausgleichungsansatz nicht hinreichend genug bestimmbar, werden nur entsprechend mehr Iterationen zur Lösung des Gleichungssystems benötigt. Auch bei diesem funktionalen Modell der Ausgleichung wird die Summe der Quadrate der orthogonalen Abstände der ausgeglichenen Ebene zu den vorgegebenen Punkten minimiert. Abweichend zu den in [Kampmann und Renner, 2004] beschriebenen Verfahren zur Ausgleichung einer Ebene wird hier ein modifiziertes Verfahren vorgeschlagen, das die gleichen numerischen Ergebnisse wie die oben dargelegte Spektralzerlegung liefert.

Räumliche Koordinaten zur Ebenenausgleichung			
Pkt.-Nr.	x	y	z
1	-10,0	-15,0	-20,0
2	-1,0	-0,5	-2,0
3	1,0	1,5	1,0
4	10,0	15,0	20,0

**Tabelle 3.1:** Räumliche Koordinaten zur Bestimmung einer ausgeglichenen Ebene, aus [Kampmann und Renner, 2004].

Unter der Annahme, dass die orthogonalen Abstände  $l_i$  im Punkt  $P_i$  zu Null beobachtet werden, lässt sich aus Gleichung 3.10 folgende Verbesserungsgleichung ableiten:

$$l_i + v_i = n_x x_i + n_y y_i + n_z z_i - d. \quad (3.18)$$

Die Designmatrix  $\mathbf{A}$  ergibt sich zu:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i & -1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & z_{i+1} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & -1 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Um die Überparametrisierung des Gleichungssystems aufzuheben, muss die Normierung des Normalenvektors  $\mathbf{n}$  als Bedingung eingeführt werden:

$$|\mathbf{n}| = 1 \quad \Leftrightarrow \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1 = 0. \quad (3.20)$$

Es wird das Ausgleichungsmodell

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ -\mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

entwickelt, in dem die Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$  mit der Matrix  $\mathbf{C}$ , welche die partiellen Ableitungen der Bedingungsgleichungen enthält, gerändert wird. Es ergibt sich die Lösung zu:

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{C} \mathbf{k}). \quad (3.22)$$

Mit den in Tabelle 3.1 aus [Kampmann und Renner, 2004] eingeführten Koordinaten von 4 räumlichen Punkten ergeben sich die in Tabelle 3.2 aufgeführten Ergebnisse. Daraus wird ersichtlich, dass beide Ansätze für dieses Beispiel numerisch gleichwertige Ergebnisse liefern.

Gegenüberstellung Spektralzerlegung und Ausgleichung mit Bedingung		
Parameter	Spektralzerlegung	AGL mit Bedingung
$n_x$	-0,9261	-0,9261
$n_y$	0,1682	0,1682
$n_z$	0,3378	0,3378
Abstand $d$ [m]	-0,042	-0,042
$\hat{\sigma}_0^2$	0,134	0,134
Korrelationen	$0,697 \leq  \rho  \leq 0,996$	$0,697 \leq  \rho  \leq 0,996$

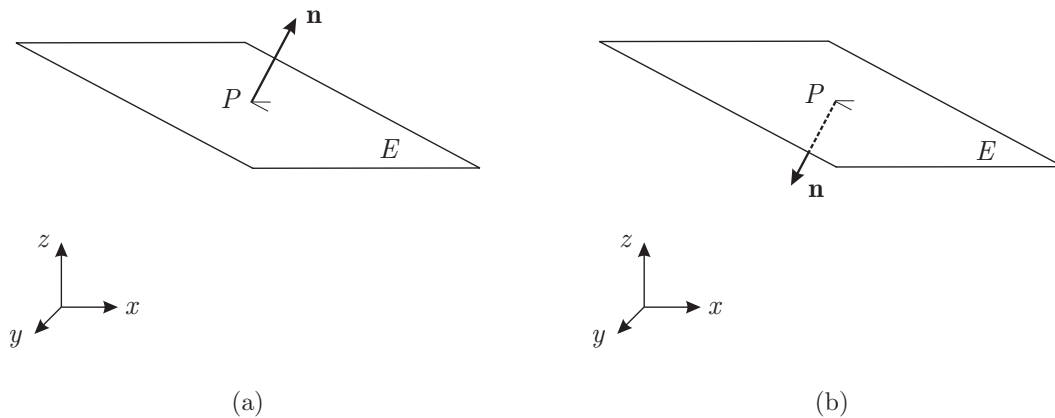
**Tabelle 3.2:** Vergleich der Ergebnisse aus der Spektralzerlegung mit den Ergebnisse aus der Ausgleichung mit Bedingungen.

Aus dem vermittelnden Ausgleichungsansatz mit Bedingungen zwischen den Unbekannten lassen sich nun die Genauigkeiten und die Korrelationen als obere Dreiecksmatrix der vollbesetzten  $4 \times 4$  Kovarianzmatrix extrahieren, die sich als Produkt aus der Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  und dem Varianzfaktor  $\hat{\sigma}_0^2$  zusammensetzt. Die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  ergibt sich nach [Höpcke, 1980] zu

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{N}^{-1} - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{N}^{-1}. \quad (3.23)$$

Da die Korrelationen zwischen den Parametern in den weiteren Auswerteschritten Verwendung finden sollen, muss beachtet werden, dass die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  unter dem Zwang der Bedingungsgleichung für den Normalenvektor entstanden sind und aus diesem Grund singularär ist. Zur Aufhebung der Singularität muss die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  mit den entsprechenden Zeilen der Bedingungsmatrix  $\mathbf{C}^T$  gerändert werden.

Die so berechneten Normalenvektoren stehen senkrecht auf der Ebene, sind in ihrer Richtung aber zufällig orientiert. Deshalb ist es notwendig, sie nach einer gewählten Konvention in eine einheitliche Richtung zu überführen.



**Abb. 3.10:** Illustration zum Ebenenparameter Abstand  $d$  nach HESSEScher Normalform (a) positiv und (b) negativ definiert.

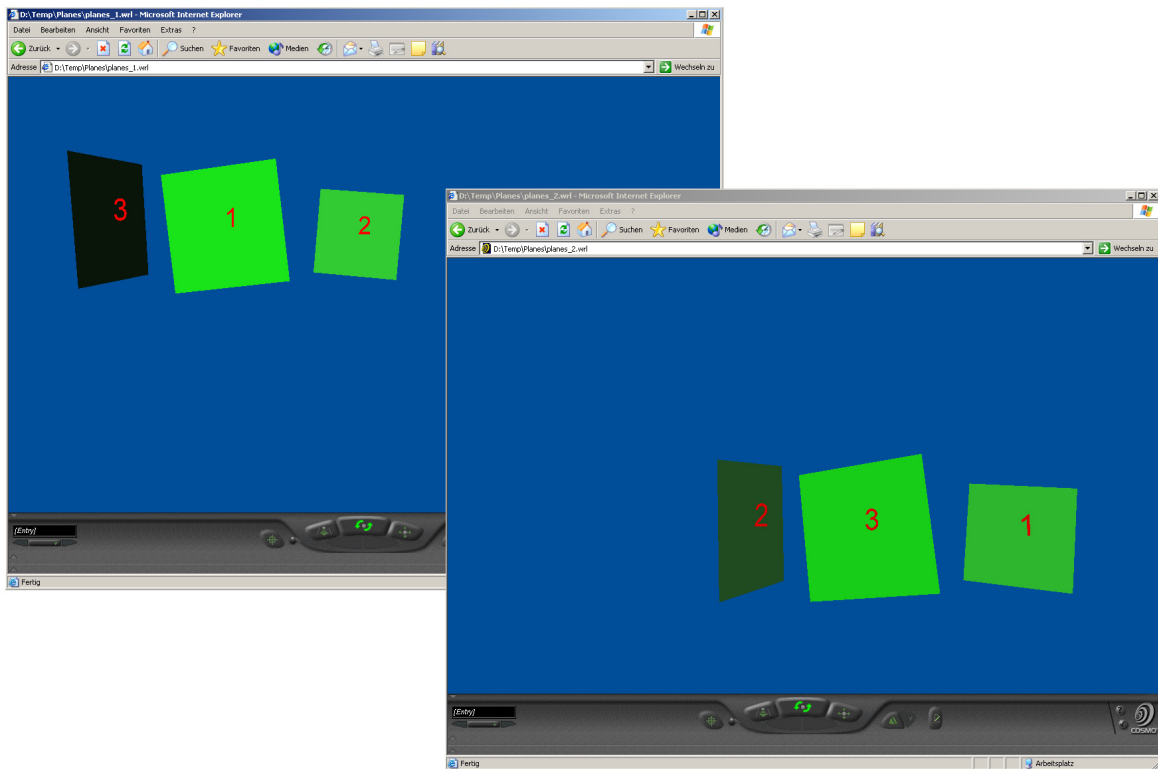
Die mathematische Konvention der HESSESchen Normalform einer Ebene nach Gleichung 3.10 sagt aus, dass der Abstand  $d$  immer positiv sein soll. Geometrisch gesehen bedeutet dies, dass der Normalenvektor immer vom Betrachter im Instrumentenstandpunkt zur Ebene zeigt. Aus Gründen der Kompatibilität zu den entwickelten Algorithmen wird nachfolgend festgelegt, dass der Abstand  $d$  immer negativ definiert ist. Dies entspricht geometrisch gesehen der Anschauung, dass der Normalenvektor immer zum Ursprung, d. h. auf das Instrument oder den Betrachter zeigt, vergleiche auch Abbildung 3.10.

### 3.4 Zuordnung von homologen Ebenen

Aus den vorangegangenen Betrachtungen liegen nunmehr die beschreibenden Parameter (Normalenvektoren  $\mathbf{n}$  und Abstand zum Ursprung  $d$ ) der aus der Punktwolke extrahierten Ebenen vor. Sollen in einem weiteren Schritt der Auswertung die Punktwolken verschiedener Instrumentenstandpunkte in ein einheitliches Bezugssystem überführt werden, kann diese Transformation mittels identischer Ebenen vorgenommen werden (vgl. Kapitel 4.3). Zur Durchführung dieser Transformation werden jedoch korrespondierende Flächen in den zu verknüpfenden Punktwolken benötigt. Der Anwender steht also vor dem Problem, korrespondierende Ebenen in den aufgenommenen Szenarien zu finden. Der Nutzer muss sowohl eine Zuordnung identischer Ebenen auf unterschiedlichen Aufnahmestandpunkten durchführen, aber auch bei Änderung der Orientierung des Messinstrumentes auf einem Standpunkt müssen die Identitäten jeweils zwischen zwei Aufnahmen festgestellt werden. Schwierigkeiten ergeben sich bei näherer Betrachtung in der Gestalt, dass die Korrespondenzen sich meist nicht auf die gleichen Ausschnitte der Oberfläche einer ausgewählten Fläche beziehen und deshalb die Zuordnung nicht leicht zu treffen ist [Runne u. a., 2001].

#### 3.4.1 Manuelle Zuordnung der Ebenen

Eine Möglichkeit besteht darin, eine visuelle Kontrolle der extrahierten Ebenen auf Grundlage gängiger 3D-Grafik-Formate in einem Viewer vorzunehmen und anschließend die manuelle Zuordnung der Korrespondenzen zu treffen. [Kern, 2003] nimmt die Zuordnung der identischen Ebenen manuell vor, benötigt dafür in seinem Beispiel jedoch eine vergleichsweise lange Zeit.



**Abb. 3.11:** Visualisierung der extrahierten Ebenen für zwei verschiedene Standpunkte mit dem VRML-Plugin Cosmoplayer (SGI) in einem Internetbrowser (MICROSOFT Internet Explorer). Die Darstellung bezieht sich wiederum auf den Datensatz aus Abbildung 3.7. Die in der Kantendarstellung bereits sichtbaren Bereiche sind hier zu drei Ebenen extrahiert worden, der Ebenenidentifikator ist der entsprechende Ebene zugeordnet.

Die Visualisierung kann z. B. mittels eines VRML-Plugins in einem Internetbrowser geschehen. In Abbildung 3.11 sind die dargestellten Ebenen jeweils durch zwei Dreiecke mit ihren in der VRML-Welt gegebenen 3D-Koordinaten erzeugt worden. Zusätzlich ist als attributive Erweiterung der aus der Regionensuche zugewiesenen Ebenenidentifikator an die betreffenden Ebenen „geklebt“. So wird gewährleistet, dass der aus der

Ebenenerkennung gewonnene Identifikator der richtigen Ebene zugeordnet wird. Weiterführende Angaben zur Erstellung von VRML-Anwendungen finden sich u. a. in [Matsuba und Roehl, 1996], [Schlüter, 1998] sowie [Pomaska, 2002].

### 3.4.2 Automatisches Verfahren

Um das Korrespondenzproblem (Zuordnungsproblem oder matching) bei der automatischen Zuordnung identischer Ebenen zu lösen, können lediglich die beschreibenden Parameter der Ebenen herangezogen werden. Für die Merkmalszuordnung eignen sich die standpunktweise jeweils in den Koordinatenursprung verschobenen Normalenvektoren  $\mathbf{n}_i$  und  $\mathbf{n}_j$ , mit  $\mathbf{n}_i \in \mathcal{M}_i$  für  $i = 1, \dots, n$  sowie  $\mathbf{n}_j \in \mathcal{M}_j$  für  $j = 1, \dots, m$ . Diese spannen im jeweiligen Ursprung ein Normalenvektorbüschel auf, vgl. Abbildung 3.12, wobei die Reihenfolge der Normalenvektoren unerheblich ist. Einschränkend muss angemerkt werden, dass die entworfene Strategie nur für unsymmetrische Verteilungen der Strahlenbüschel erfolgreich ist. Bei einer symmetrischen Anordnung der Normalenvektoren ist aufgrund der Mehrdeutigkeiten keine eindeutige Zuordnung möglich. Desweiteren ist dieser Ansatz auf das Vorhandensein weniger Normalenvektoren ausgelegt. In praktischen Experimenten sind aus den Punktwolken durchschnittlich zwischen 10 und 20 Ebenen extrahiert worden und es lagen nie mehr als ca. 50 Normalenvektoren, respektive Ebenen vor. Auf Grundlage dieser maximalen Anzahl vorliegender Ebenenparameter läuft der Algorithmus in nahezu Echtzeit ab, ebenso treten keine Speicherprobleme auf.

Da die Normalenvektoren mit  $|\mathbf{n}_i| = |\mathbf{n}_j| = 1$  bereits normiert sind, muss ein Schnitt mit dem Einheitskreis  $r = 1$  nicht mehr erfolgen. Der Schnittpunkt  $P_i$  bzw.  $P_j$  ergibt sich direkt aus den Normalenvektoren in den jeweiligen Verteilungen. Eine Zuordnung findet nur zwischen zwei Normalenvektorbüscheln statt. Sind Zuordnungen von identischen Ebenen für mehr als zwei Standpunkte zu treffen, so ist die Verknüpfung verschiedener Standpunkte in mehreren Durchläufen erforderlich. Die Definition eines eindeutigen Merkmals  $\nu$  in der Menge  $\mathcal{M}_i$ , das in der zweiten Menge  $\mathcal{M}_j$  an Normalenvektoren wieder gefunden werden soll, erfolgt über die Längen der Differenzvektoren aller in der jeweiligen Verteilung befindlichen Normalenvektoren.

Das Ergebnis dieses ersten Schritts ist eine Liste mit  $(n - 1)$  Vektordifferenzbeträgen  $|d_i|$  der Menge  $\mathcal{M}_i$  sowie eine Liste mit  $(m - 1)$  Vektordifferenzbeträgen  $|d_j|$  der Menge  $\mathcal{M}_j$ , in der für jeden Punkt  $P_i$  und  $P_j$  die Längen der Differenzvektoren zu allen anderen Punkten aus der gleichen Verteilung, d. h. vom gleichen Standpunkt aufgenommene Ebenen, enthalten sind. Die Ähnlichkeit von zwei Differenzvektoren ist durch

$$d_{min_{ij}} = \begin{cases} m_{ij} = \min(|d_i| - |d_j|) & \text{falls } m_{ij} < 0,05 \\ 2,0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.24)$$

definiert, wobei 0 die maximale Übereinstimmung kennzeichnet. Von der kürzeren Liste ausgehend ( $n \leq m$ ) wird für jeden Differenzvektor  $d_i$  der ähnlichste Kandidat  $d_j$  mit der kleinsten Längendifferenz gesucht und dabei ein maximaler Unterschied von fünf Prozent toleriert. Der empirisch gefundene Schwellwert wurde dabei aus unterschiedlichen Testdatensätzen abgeleitet.

Schließlich werden zwei Normalenvektoren einander zugeordnet, wenn die Listen mit den Vektordifferenzbeträgen möglichst gut übereinstimmen. Dazu kann das folgende Gütekriterium formuliert werden:

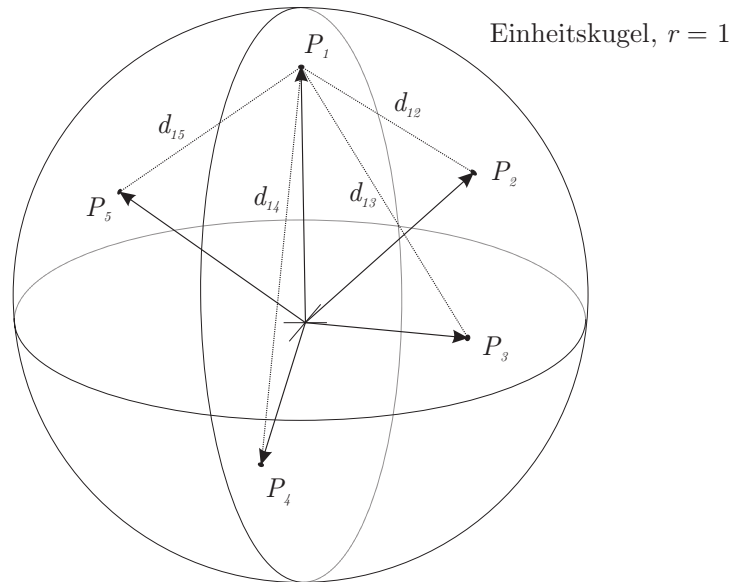
$$\varepsilon = \sum_{i,j=1}^n d_{min_{ij}}. \quad (3.25)$$

Der Algorithmus funktioniert bei den verwendeten Testdatensätzen<sup>3</sup> besonders gut, wenn die gleiche Anzahl an Ebenen verwendet werden und die Zuordnungen eindeutig sind. Allerdings reduziert sich die Erfolgsquote, wenn in den eingehenden Vektorbüscheln unterschiedlich viele Normalenvektoren vorhanden sind. Hier erfolgte die Zuordnung mitunter falsch, d. h. in den untersuchten Datensätzen wurden teilweise Normalenvektoren aus der ersten Menge einem nicht korrespondierenden Normalenvektor der anderen Menge zugeordnet. Experimentelle Untersuchungen mit den beschriebenen Datensätzen haben ergeben, dass der Anteil dieser Ausreißer zwischen 5 und 10% liegt.

Diese Erfolgsquote würde in den beschriebenen Datensätzen ausreichen, eine Zuordnung und somit eine Orientierung der beiden Normalenvektorbüschel vorzunehmen. Die Datensätze in diesem Beispiel sind jedoch sehr homogen, frei von groben Fehlern und die Parameterschätzung für die Ebenen erfolgte aus ca. 150 Punkten. Unter realistischen Bedingungen kann aber der Fall eintreten, dass aufgrund von Abschattungen und

<sup>3</sup>Die Testdatensätze bestehen aus  $3 \times 15$  Ebenen und  $1 \times 14$  Ebenen, die im Rahmen der in Kapitel 5.5 entwickelten Kalibrierstrategie verwendet werden.





**Abb. 3.12:** Beispiel eines Büschels mit  $n = 5$  Normalenvektoren. Dargestellt sind die Schnittpunkte  $P_i$  der Normalenvektoren mit der Einheitskugel und die Differenzvektoren  $d_{1i}$  zwischen den Normalenvektoren ausgehend von Punkt  $P_1$ .

Teilverdeckungen in den Originaldaten oder aufgrund der Entfernung zum Objekt die Parameterbestimmung homologer Ebenen mit einer geringeren Anzahl von Beobachtungen durchgeführt werden muss. Desweiteren können im Datenmaterial trotz Fehlereliminierung noch grobe Fehler enthalten sein oder Effekte – beispielsweise aufgrund einer ungenügenden Bestimmung systematisch wirkender Fehleranteile – verfälschen das Ergebnis zusätzlich. Aus diesem Grund könnte die oben beschriebene Methode als genäherte Zuordnungshypothese für eine nachgeschaltete Optimierung betrachtet werden.

Aufgrund der Struktur der Normalenvektoren ist eine Transformation in homogene Koordinaten sehr einfach möglich, da sich Normalenvektoren im euklidischen Raum nur durch eine Skalierung von homogenen Koordinaten in der projektiven Ebene unterscheiden und Vorteile bei der weiteren Berechnung bieten. Aus diesem Grund werden zunächst die Grundlagen der projektiven Geometrie und homogene Koordinaten eingeführt.

### Homogene Koordinaten

Durch den Einsatz von homogenen Koordinaten werden Darstellungen von räumlichen Beziehungen vereinfacht und sie ermöglichen eine einheitliche Behandlung der einzelnen Transformationsschritte Skalierung, Rotation und Translation durch Matrizenoperationen. Homogene Koordinaten werden als Erweiterung der  $k$ -dimensionalen euklidischen Koordinaten um einen homogenen Anteil verstanden [Faugeras und Luong, 2001]. Die homogenen Koordinaten werden aus den euklidischen Koordinaten durch Hinzufügen einer zusätzlichen Komponente und einem Skalierungsfaktor abgeleitet, der in seiner Wahl frei ist unter der Einschränkung  $\lambda \neq 0$ . Für den projektiven Raum  $\mathbb{P}^k$  gilt

$$(x_1, \dots, x_k, 1)_{\text{hom}}^T = \lambda (x'_1, \dots, x'_k, 1)_{\text{hom}}^T, \text{ für alle } \lambda \neq 0, \quad (3.26)$$

d. h.  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k, 1)_{\text{hom}}^T$  und  $\mathbf{x}' = (x'_1, \dots, x'_k, 1)_{\text{hom}}^T$  repräsentieren das gleiche Objekt. Im  $\mathbb{R}^k$  werden homogene Koordinaten korrespondierend zu den euklidischen Koordinaten definiert:

$$(x_1, \dots, x_k)_{\text{eukl}}^T \rightarrow (x_1, \dots, x_k, 1)_{\text{hom}}^T. \quad (3.27)$$

Die Transformation von homogenen Koordinaten zurück in euklidische Koordinaten lässt sich durchführen, indem alle Elemente des Vektors durch die letzte Komponente geteilt werden:

$$(x_1, \dots, x_k, x_{k+1})_{\text{hom}}^T \rightarrow \left( \frac{x_1}{x_{k+1}}, \dots, \frac{x_k}{x_{k+1}} \right)_{\text{eukl}}^T, \text{ für } x_{k+1} \neq 0. \quad (3.28)$$

Die homogene Repräsentation eines euklidischen Bildpunktes  $(x, y)^T$  in der projektiven Ebene  $\mathbb{P}^2$  ist nach dem oben eingeführten  $k$ -dimensionalen Fall durch den 3-Vektor

$$\mathbf{x} = \lambda (x, y, 1)^T = (u, v, w)^T \quad (3.29)$$

gegeben, indem nicht alle Elemente 0 sein dürfen. Das Element  $w$  wird als homogener Anteil bezeichnet. Die Berechnung der euklidischen Koordinaten aus den homogenen Koordinaten ist folgendermaßen definiert:

$$x = \frac{u}{w} \quad \text{und} \quad y = \frac{v}{w} \quad \text{für} \quad w \neq 0. \quad (3.30)$$

Analog lässt sich ein euklidischer Objektpunkt  $(x, y, z)^T$  in homogenen Koordinaten durch

$$\mathbf{x} = \lambda (x, y, z, 1)^T = (u, v, w, t)^T \quad (3.31)$$

darstellen. Die Rücktransformation aus dem projektiven Raum  $\mathbb{P}^3$  lässt sich mit

$$x = \frac{u}{t}, \quad y = \frac{v}{t} \quad \text{und} \quad z = \frac{w}{t} \quad \text{für} \quad t \neq 0 \quad (3.32)$$

realisieren.

Durch die Einführung von homogenen Koordinaten ist es nunmehr möglich, das wesentliche Konzept der projektiven Geometrie zu nutzen, Abbildungen zwischen verschiedenen geometrischen Objekten zu definieren. Die allgemeine lineare Transformation homogener Koordinaten in der projektiven Ebene  $\mathbb{P}^2$  lässt sich durch

$$\mathbf{x}' = \mathbf{M}\mathbf{x} \quad (3.33)$$

formulieren, mit  $\mathbf{M}$  als Abbildungs- oder Transformationsmatrix. Der Aufbau und die Besetzung der Elemente der Abbildungsmatrix  $\mathbf{M}$  ist abhängig von der Art der Transformation, für die die Matrix  $\mathbf{M}$  benutzt wird. Eine Translation um die Koordinatenwerte  $t_x$  und  $t_y$  erfolgt mit der Abbildungsmatrix

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

Eine Skalierung oder Spiegelung der Koordinaten mit den Faktoren  $s_x$  und  $s_y$  wird durch die Abbildungsmatrix

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

herbeigeführt und eine Rotation um den Winkel  $\alpha$  erfolgt mit der Abbildung

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

Eine Verkettung mehrerer Transformationen erfolgt unter Berücksichtigung der Reihenfolge durch eine Linksmultiplikation mit den einzelnen Abbildungsmatrizen

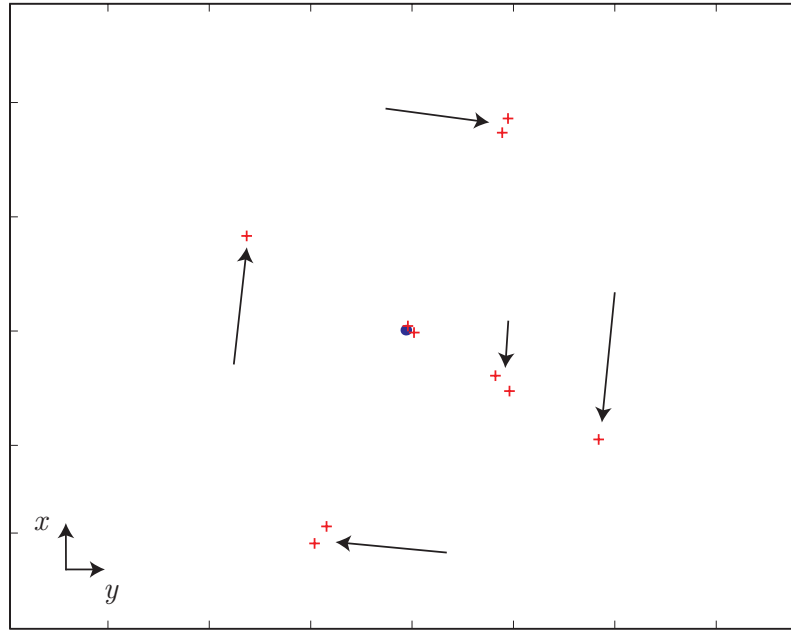
$$\mathbf{x}' = \mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{M}_3\mathbf{M}_2\mathbf{M}_1\mathbf{x}. \quad (3.37)$$

Eine Rücktransformation ist möglich durch

$$\mathbf{x} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{x}' = \mathbf{M}_1^{-1}\mathbf{M}_2^{-1}\mathbf{M}_3^{-1}\mathbf{x}'. \quad (3.38)$$

Eine Verallgemeinerung der genannten Formeln auf den dreidimensionalen Fall ist durch einfaches Einführen einer vierten Komponente möglich. Die Formeln gelten dann auch im  $\mathbb{P}^3$ .

Projektive Transformationen lassen sich unter Anwendung der *Direkten Linearen Transformation* (DLT) lösen. Der Ansatz der DLT ermöglicht die Transformation zwischen zwei Koordinatensystemen (z. B. Bild- und Objektkoordinatensystem) in einem linearen Gleichungssystem [Abdel-Aziz und Karara, 1971]. Die DLT benötigt keine initialen Startwerte für die Schätzung der Parameter und wird häufig bei der Kalibrierung von Kameras oder der Näherungswertbestimmung im Zuge einer Bündeltriangulation verwendet [Luhmann, 2003].



**Abb. 3.13:** Darstellung der Normalenvektoren in der projektiven Ebene  $\mathbb{P}^2$  (Ausschnitt) - es erscheint offensichtlich, dass es sich bei der gesuchten Transformation um eine Rotation handelt. Auf die Angabe der Skalierung wird verzichtet, da nur die Bedingung  $\lambda \neq 0$  gilt.

### Homographie

Eine Homographie bezeichnet eine allgemeine projektive Transformation, die linear in homogenen Koordinaten und zudem invertierbar ist [Forsyth und Ponce, 2003]. Im projektiven Raum  $\mathbb{P}^k$  lässt sich eine Homographie durch eine  $(k+1) \times (k+1)$  homogene Matrix  $\mathbf{H}$  darstellen, die bis auf einen Skalierungsfaktor vollständig definiert ist, so dass  $\mathbf{x}' = \mathbf{H}\mathbf{x}$  gilt. Aus dem  $k$ -dimensionalen Fall lässt sich die Homographie in der projektiven Ebene  $\mathbb{P}^2$  und im projektiven Raum  $\mathbb{P}^3$  ohne weiteres ableiten. Zur Berechnung einer Homographie wird die in [Hartley und Zisserman, 2001] beschriebene Vorgehensweise benutzt. Die  $3 \times 3$ -Homographiematrix  $\mathbf{H}$  soll für  $n \geq 4$  homologe Bildpunkte  $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}'_i$  bestimmt werden, so dass  $\mathbf{x}'_i = \mathbf{H}\mathbf{x}_i$  gilt. Um eine eindeutige Lösung zu erhalten, dürfen die Punkte jedoch nicht kollinear sein. Die Bildpunkte werden in einem ersten Schritt in homogene Koordinaten transformiert, vgl. auch Abbildung 3.13, und anschließend normiert. Die Normierung  $\mathbf{x}_i \rightarrow \hat{\mathbf{x}}_i$ , die zu numerisch stabileren Ergebnissen führt [Rodehorst, 2004], erfolgt durch eine Schwerpunktreduktion und Skalierung dahingehend, dass der durchschnittliche Abstand vom Koordinatenursprung  $\sqrt{2}$  beträgt. Die Normierung muss unabhängig auch für das zweite Bildpaar  $\mathbf{x}'_i \rightarrow \hat{\mathbf{x}}'_i$  berechnet werden. Für jedes normierte Bildpunktpaar  $\hat{\mathbf{x}}_i \leftrightarrow \hat{\mathbf{x}}'_i$  werden die beiden Zeilen der Teilmatrix

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \hat{w}'_i \hat{\mathbf{x}}_i^T & \mathbf{0} & -\hat{x}'_i \hat{\mathbf{x}}_i^T \\ \mathbf{0} & \hat{w}'_i \hat{\mathbf{x}}_i^T & -\hat{y}'_i \hat{\mathbf{x}}_i^T \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

aufgestellt und in einer gemeinsamen  $2n \times 9$  großen Designmatrix  $\mathbf{A}$  zusammengefügt. Das lineare homogene Gleichungssystem

$$\mathbf{A} \mathbf{h} = \mathbf{0} \quad \text{mit } \mathbf{h} = (h_1, \dots, h_9)^T \quad (3.40)$$

lässt sich für  $n \geq 4$  Korrespondenzen durch eine spektrale Zerlegung der Designmatrix  $\mathbf{A}$  und die anschließende Bestimmung des Eigenvektors, der dem kleinsten Eigenwert entspricht, lösen. Der Lösungsvektor  $\mathbf{h}$  enthält die Elemente der Matrix

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix}, \quad (3.41)$$

bei der, um für die ursprünglichen Koordinaten eingesetzt werden zu können, die Normierung  $\hat{\mathbf{H}} \rightarrow \mathbf{H}$  wieder rückgängig gemacht werden muss.

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel der Zuordnung von homologen Ebenen wird die Homographie mit der eindeutigen, d. h. minimalen Anzahl an Beobachtungen ( $n = 4$ ) eingesetzt, siehe auch Abbildung 3.14. Da

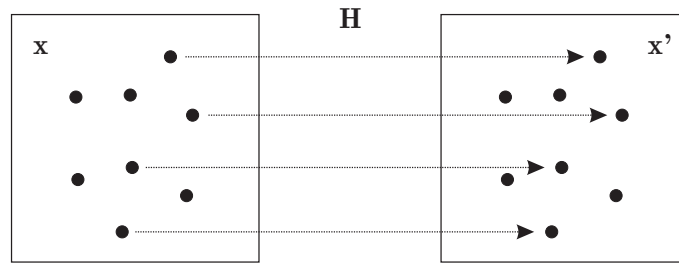


Abb. 3.14: Darstellung der Homographie in der projektiven Ebene  $\mathbb{P}^2$ .

jedoch in den allermeisten Fällen mehr als 4 Ebenen, respektive Normalenvektoren vorliegen, gibt es mehr Möglichkeiten an Zuordnungen als die zur Lösung der Homographie benötigte Minimalanzahl. Um dem Verfahren die nötige Robustheit zu verleihen, trotz mehrerer Zuordnungsfehler die Identitäten der Ebenen bereitzustellen, eignen sich, in Verbindung mit der Berechnung der Homographie, automatische Suchstrategien. Dabei muss die Identifizierung und Eliminierung von so genannten *Hebelpunkten*, d. h. von Beobachtungsgrößen, die deutlich von der geometrischen Anordnung der anderen Beobachtungen entfernt liegen und einen erheblichen Einfluss auf die Parameterschätzung haben [Niemeier, 2002], möglich sein.

## RANSAC

Bei der Lösung von Korrespondenzproblemen hat sich der Einsatz der RANSAC-Methode (RANdom SAMpling Consensus) bewährt. [Fischler und Bolles, 1981] zeigen in einem einfachen Beispiel, dass ein grober Fehler im Beobachtungsmaterial die Parameterschätzung derart verfälscht, dass eine korrekte Lösung nicht gefunden werden kann, wenn die Eliminierung von groben Fehlern allein auf der Basis von Verbesserungen stattfindet. Aus diesem Grund wird im genannten Ansatz die initiale Parameterschätzung nicht mit allen Beobachtungen durchgeführt, sondern nur mit der kleinstmöglichen Anzahl an Beobachtungen, die eine Schätzung der unbekannt Parameter zulässt. In einem zweiten Schritt wird die Anzahl der Beobachtungen ermittelt, die diese Lösung bestätigen. Die Auswahl der Initialisierungsparameter und die Berechnung der gesuchten Parameter erfolgen nach einem Zufallsprinzip und werden mehrmals wiederholt. Als die korrekte Lösung wird diejenige Lösung akzeptiert, die die größtmögliche Anzahl verträglicher Beobachtungen enthält. Das beschriebene Vorgehen ist jedoch sehr rechenintensiv, da die maximale Anzahl der zu berechnenden Kombinationen für  $n$  Beobachtungen und  $u$  unbekannt Parameter sich durch

$$\binom{n}{u} = \frac{n!}{(n-u)! u!} \quad (3.42)$$

ergibt, d. h. nur beim Durchlaufen aller Möglichkeiten ist auch die korrekte Lösung in der Lösungsmenge enthalten. Eine Optimierung des Verfahrens führt zum als GASAC bezeichneten Algorithmus.

## GASAC

GASAC (Genetic Algorithm SAMpling Consensus) [Rodehorst, 2004] ist eine Modifizierung des RANSAC-Algorithmus in der Art, dass nach einer willkürlichen Initialisierungsauswahl und Schätzung der Parameter mehrere Minimallösungen berechnet und bewertet werden. Durch den Einsatz von genetischen Operatoren lassen sich bereits als gut detektierte Lösungen heranziehen, um aus diesen noch bessere Lösungen zu generieren. Zu den eingesetzten genetischen Operatoren gehören Überkreuzungen (cross-over), d. h. eine veränderte Kombination von erfolgreichen Beobachtungen, und Mutationen, bei denen durch zufälliges Hinzufügen von neuen Beobachtungen die Gefahr des Verharrens in einem suboptimalen Minimum verhindert wird. Das zufällige Probieren des RANSAC-Algorithmus wird mit diesem Vorgehen durch ein weitestgehend systematisches Probieren verbessert. [Rodehorst, 2004] zeigt, dass bei gleichem Ausgangsmaterial mit der GASAC-Methode schnellere und effizientere Schätzungen berechnet werden.

## Numerisches Beispiel

Um die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Verfahrens zu veranschaulichen, wird ein numerisches Beispiel anhand zweier Datensätze vorgestellt. Die Datensätze enthalten die Normalenvektoren der extrahierten Ebenen von zwei Instrumentenstandpunkten und bestehen aus 14 bzw. 8 Normalenvektoren.

→ Koordinaten der Normalenvektoren:

Datensatz A (n = 8):

Nr.	x	y	z
01	0.637219	0.265086	-0.723658
02	0.928176	0.372040	0.008711
03	0.250540	-0.624884	-0.739425
04	0.378366	-0.925645	0.004540
05	-0.645287	-0.259852	-0.718388
06	-0.374459	0.927243	0.001188
07	-0.166914	0.448232	-0.878196
08	-0.000505	-0.030368	-0.999539

Datensatz B (m = 14):

Nr.	x	y	z
01	0.305102	0.618729	-0.723938
02	0.327211	0.643650	0.691844
03	0.455403	0.890255	0.007328
04	0.947520	0.275417	-0.162333
05	0.601416	-0.307266	-0.737486
06	0.639334	-0.329550	0.694729
07	0.892513	-0.450994	0.005040
08	-0.332289	-0.641962	0.690991
09	-0.318505	-0.621475	-0.715768
10	-0.454026	-0.890980	0.003977
11	-0.374111	0.177445	-0.910250
12	-0.421463	0.230289	-0.877118
13	0.000271	-0.002596	0.999997
14	0.020395	-0.022319	-0.999543

→ Listen der Differenzvektoren (Beträge, nach Länge sortiert):

Datensatz A:

01:	1.420	1.410	1.386	0.970	0.839	0.795	0.755
02:	1.845	1.429	1.419	1.416	1.411	1.409	0.795
03:	1.830	1.419	1.160	0.970	0.968	0.813	0.696
04:	2.000	1.722	1.420	1.419	1.409	1.398	0.813
05:	1.845	1.419	1.414	1.386	0.968	0.869	0.740
06:	2.000	1.830	1.435	1.416	1.414	1.410	1.023
07:	1.722	1.411	1.160	1.023	0.869	0.839	0.521
08:	1.435	1.429	1.398	0.755	0.740	0.696	0.521

Datensatz B:

01:	1.999	1.858	1.840	1.739	1.422	1.416	1.388	0.972	0.920	0.838	0.831	0.794	0.754
02:	2.000	1.854	1.843	1.810	1.787	1.739	1.445	1.416	1.411	1.118	1.022	0.787	0.739
03:	2.000	1.854	1.846	1.428	1.427	1.418	1.412	1.411	1.411	1.410	0.806	0.794	0.739
04:	1.831	1.791	1.647	1.545	1.525	1.522	1.284	1.118	1.093	0.920	0.889	0.806	0.747
05:	1.864	1.739	1.739	1.433	1.418	1.416	1.164	1.103	0.972	0.972	0.889	0.810	0.698
06:	1.977	1.965	1.830	1.739	1.730	1.433	1.412	1.410	1.093	1.022	1.021	0.780	0.745
07:	1.723	1.684	1.422	1.420	1.417	1.417	1.411	1.411	1.410	1.398	0.810	0.747	0.745
08:	1.999	1.854	1.835	1.799	1.797	1.791	1.739	1.445	1.417	1.407	1.021	0.784	0.741
09:	2.000	1.852	1.846	1.730	1.647	1.420	1.407	1.388	0.972	0.873	0.824	0.780	0.745
10:	2.000	1.854	1.840	1.831	1.426	1.417	1.416	1.410	1.410	1.410	1.408	0.780	0.741
11:	1.965	1.955	1.810	1.799	1.684	1.522	1.428	1.408	1.103	0.831	0.824	0.451	0.078
12:	1.977	1.938	1.797	1.787	1.723	1.545	1.426	1.410	1.164	0.873	0.838	0.523	0.078
13:	2.000	1.955	1.938	1.864	1.858	1.852	1.525	1.411	1.410	1.410	0.787	0.784	0.780
14:	2.000	1.843	1.835	1.830	1.427	1.410	1.398	1.284	0.754	0.745	0.698	0.523	0.451

→ Zuordnungshypothesen:

A 01:	1.420	1.410	1.386	0.970	0.839	0.795	0.755	
B 01:	1.422	1.416	1.388	0.972	0.838	0.794	0.754	
dmin:	0.002	2.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	= 2.010 (richtig)
A 02:	1.845	1.429	1.419	1.416	1.411	1.409	0.795	
B 03:	1.846	1.428	1.418	1.418	1.411	1.410	0.794	
dmin:	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001	= 0.006 (richtig)
A 03:	1.830	1.419	1.160	0.970	0.968	0.813	0.696	
B 05:	1.864	1.418	1.164	0.972	0.972	0.810	0.698	
dmin:	2.000	0.001	0.004	0.002	0.004	0.003	0.002	= 2.016 (richtig)
A 04:	2.000	1.722	1.420	1.419	1.409	1.398	0.813	
B 07:	1.723	1.723	1.420	1.420	1.410	1.398	0.810	
dmin:	2.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	= 2.004 (richtig)
A 05:	1.845	1.419	1.414	1.386	0.968	0.869	0.740	
B 09:	1.846	1.420	1.420	1.388	0.972	0.873	0.745	
dmin:	0.001	0.001	2.000	0.002	0.005	0.004	0.005	= 2.017 (richtig)
A 06:	2.000	1.830	1.435	1.416	1.414	1.410	1.023	
B 06:	1.977	1.830	1.433	1.412	1.412	1.410	1.022	
dmin:	2.000	0.000	0.002	0.004	0.002	0.000	0.001	= 2.009 (falsch)

```
A 07: 1.722 1.411 1.160 1.023 0.869 0.839 0.521
B 12: 1.723 1.410 1.164 1.164 0.873 0.838 0.523
dmin: 0.001 0.002 0.004 2.000 0.004 0.001 0.002 = 2.014 (richtig)
```

```
A 08: 1.435 1.429 1.398 0.755 0.740 0.696 0.521
B 14: 1.427 1.427 1.398 0.754 0.745 0.698 0.523
dmin: 2.000 0.002 0.000 0.001 0.005 0.002 0.002 = 2.013 (richtig)
```

→ Berechnung der projektiven Transformation in der Ebene:

Homographie aus allen Zuordnungen:

```
      | 1.54234 -1.28541 0.35100 |
H = | 1.39346 1.54552 0.14501 |
      | 0.01055 -0.00056 1.00000 |
```

Geometrischer Fehler:  $d(x', H x)^2 + d(x, H^{-1} x')^2$ :  
 Min: 0.000022 Max: 4.140988 Sum: 10.877793 Ave: 1.359724  
 (mit d als euklidischer Abstand in der projektiven Ebene)

Robuste Homographie mit GASAC:

```
      | 0.75523 -0.65818 0.00076 |
H = | 0.65716 0.75720 -0.00028 |
      | 0.00002 -0.00001 1.00000 |
```

Geometrischer Fehler:  $d(x', H x)^2 + d(x, H^{-1} x')^2$ :  
 Min: 0.000000 Max: 0.000014 Sum: 0.000040 Ave: 0.000006  
 (mit d als euklidischer Abstand in der projektiven Ebene)

### 3.5 Diskussion

In diesem Kapitel wurde der automatisierte Ablauf bei der Auswertung von Datensätzen scannender Messinstrumente gezeigt. Aufgrund der Datenmengen bei der Messdatenerfassung mit scannenden Systemen kommt diesem Schritt der Parametrisierung ein hoher Stellenwert zu. Die automatische Ableitung von geometrischen Primitiven aus Punktwolken als erste Schritt der Auswertung wurde am Beispiel von Ebenen erfolgreich umgesetzt und die beschreibenden Parameter des strukturierten Geometrieelements werden für anschließende Bearbeitungen aufbereitet.

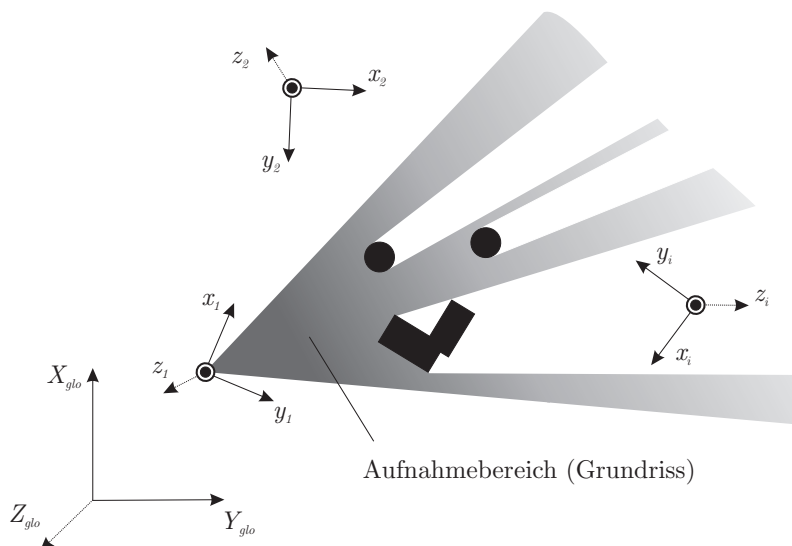
Des Weiteren wurde ein Verfahrensvorschlag unterbreitet, die bisher manuell vorgenommene Zuordnung von identischen Ebenen auf unterschiedlichen Instrumentenstandpunkten in einem automatischen Prozess ablaufen zu lassen. Dabei wurde ein robustes Verfahren entwickelt, das unempfindlich gegen Ausreißer im Datenmaterial ist und mit den vorliegenden Daten sehr gute Ergebnisse liefert. Sollten die Zuordnungsprobleme an Komplexität gewinnen, können die Suchstrategien mit verschiedenen Ansätzen aus dem Bereich der *Künstliche Intelligenz* optimiert werden [Russell und Norvig, 2003]. Die sehr aufwändig zu implementierenden Verfahren, wie Suchbäume und Graphenmatching in Kombination mit heuristischen Verfahren sind jedoch zur Zeit sicherlich überdimensioniert zur Lösung des einfachen Zuordnungsproblems homologer Ebenen. Das vorgestellte Verfahren liefert für die typischen Datensätze hinreichend gute Ergebnisse. Aufgrund der Automatisierung des Arbeitsablaufes in diesem Teil der Auswertung scannender Messverfahren kann der zeitliche Aufwand verringert werden und eventuelle Fehler bei der manuellen Zuordnung durch den menschlichen Bearbeiter lassen sich auf ein Minimum reduzieren.

Trotz alledem empfiehlt sich die visuelle Kontrolle der extrahierten geometrischen Primitiven, besonders unter der Maßgabe, dass diese attributierten Objekte in einem weiteren Auswerteschritt benötigt werden. Die Nutzung der in diesem Kapitel bereitgestellten Informationen über die Identitäten von Ebenen lassen sich im weiteren Bearbeitungsablauf dazu verwenden, die benötigten Transformationen auch zwischen mehr als zwei verschiedenen Aufnahmestandpunkten durchzuführen.

## 4 Standpunktverknüpfungen

Die originären Messelemente Horizontalrichtung  $\phi$ , Zenitdistanz  $\Theta$  und die Schrägstrecke  $S$  eines polar messenden Instrumentes, aber auch die abgeleiteten Größen (meist dreidimensionale kartesische Koordinaten) liegen in lokalen Koordinatensystemen vor, dessen Nullpunkte jeweils im Instrumentenzentrum der verwendeten polaren Messsysteme liegen. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, ist der Nullpunkt im Schnittpunkt der drei Hauptachsen des Instrumentes definiert. Diese Festlegung trifft generell für alle polaren Messinstrumente zu bzw. ist durch geeignete Kalibrieranordnungen zu überprüfen. Bei Nichteinhaltung dieser Bedingung sind die Messwerte, in Abhängigkeit von der Größenordnung der Instrumentenfehler und vom angestrebten Genauigkeitsniveau für die Auswertungen der Messdaten, um die Kalibrierwerte rechnerisch zu korrigieren.

Zur Auswertung der aufgenommenen Daten ist es erforderlich, die lokalen Standpunktsysteme zu vereinheitlichen, was im Folgenden als Standpunktverknüpfung<sup>1</sup> bezeichnet werden soll. Das Zusammenführen verschiedener Instrumentenstandpunkte (Aufnahmestandpunkte) wird nötig, wenn von einem Standpunkt nicht die gesamte Szenerie erfasst werden konnte, die bei der Modellierung auch komplexerer Objektstrukturen von Interesse ist. Der Grund für diesen Informationsverlust können Hindernisse, Objektverschneidungen aber auch Schattenwurf oder Verdeckungen durch andere Objekte oder Objektteile sein. Deshalb werden komplexe Objekte analog zum Vorgehen bei der photogrammetrischen Aufnahme eines Rundum-Verbandes von mehreren Standpunkten aus aufgenommen.



**Abb. 4.1:** Informationsverluste durch Abschattungen und Hinterschneidungen bei der Datenaufnahme im jeweiligen lokalen Instrumentenkoordinatensystem (Grundriss).

Um die erforderlichen Standpunktverknüpfungen durchführen zu können, sind die relativen Beziehungen der lokalen Systeme zueinander zu bestimmen. Die Transformation, abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung, kann in ein einheitliches lokales Koordinatensystem, aber auch in ein Weltkoordinatensystem<sup>2</sup> erfolgen. Die Festlegung eines lokalen Anwendungskoordinatensystems obliegt dem Nutzer, der z. B. definiert, dass alle lokalen Instrumentenstandpunkte auf einen frei wählbaren, jedoch gemeinsamen Instrumentenstandpunkt bezogen werden. Eine nachträgliche Transformation des einheitlichen lokalen Anwenderkoordinatensystems in ein übergeordnetes Koordinatensystem ist dann leicht möglich.

In diesem Kapitel werden zunächst die mathematischen Grundlagen von Transformationen eingeführt, auf deren Prinzip die herkömmlichen Transformationsvorschriften beruhen. Neben der Vorstellung der in der Praxis

<sup>1</sup>In der englischsprachigen Literatur wird der Begriff *registration* verwendet.

<sup>2</sup>Wird auf Koordinaten transformiert, die in einem Koordinatensystem vorliegen, das über räumliche Referenzinformationen verfügt, spricht man auch von Georeferenzierung.

weit verbreiteten Verfahren zur Überführung von lokalen Koordinatensystemen in ein globales Koordinatensystem wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches sich identischer Ebenen bedient und in der Lage ist, beliebig viele lokale Koordinatensysteme simultan in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu transformieren.

## 4.1 Mathematische Grundlagen

### 4.1.1 Koordinatentransformation

Unter einer Koordinatentransformation versteht man die Abbildung zweier ebener (2D) bzw. räumlicher (3D) Koordinatensysteme aufeinander. Der am weitesten verbreitete Ansatz zur Transformation im dreidimensionalen Raum ist die räumliche Ähnlichkeitstransformation, auch 3D-HELMERT-Transformation genannt. Bei dieser formtreuen Abbildung eines dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystems in ein entsprechendes Zielsystem können beide Systeme beliebig im Raum verschoben sowie gegeneinander gedreht sein und sich durch einen Skalierungsfaktor unterscheiden. Folgende Transformationsvorschrift kommt zur Anwendung [Luhmann, 2003]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_S + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}. \quad (4.1)$$

Umgeformt in Matrixschreibweise ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (4.2)$$

In Gleichung 4.1 werden die globalen Koordinaten (Zielsystem) durch  $\mathbf{X}$  beschrieben,  $\mathbf{x}$  kennzeichnet die lokalen Koordinaten (Ausgangssystem),  $\mathbf{R}$  ist die (meist orthonormale) Rotationsmatrix,  $m$  der optionale Skalierungsfaktor und  $\mathbf{X}_S$  der Translationsvektor. Die räumliche Ähnlichkeitstransformation wird somit durch sieben Parameter beschrieben. Um das System eindeutig lösen zu können, sind somit sieben Beobachtungen notwendig, die unter Nutzung von identischen Punkten aus den Koordinaten von mindestens drei räumlich verteilten Passpunkten entnommen werden. Die Berechnung der Transformationsparameter erfolgt durch eine Ausgleichung im linearisierten GAUSS-MARKOV-Modell, wobei hinreichend genaue Näherungsparameter bestimmt werden müssen. Wie später noch gezeigt wird, gelingt dies auf elegante Weise durch die Einführung von Quaternionen.

### 4.1.2 Translation

Die Translation ist die am einfachsten ersichtliche Art unter den Transformationen. Ein Punkt im Raum wird von einer Position zu einer anderen bewegt. Ist  $P \in \mathbb{R}^3$  beschrieben durch  $\mathbf{p}^T = [p_x, p_y, p_z]$ , mit  $x, y, z \in \mathbb{R}$  und ein Translationsvektor  $\mathbf{t}$  gegeben durch  $\mathbf{t}^T = [t_x, t_y, t_z]$ , so wird die neue Position  $P'$  durch eine einfache Addition bestimmt:  $P' = \mathbf{p} + \mathbf{t}$ . Diese Definition ist eindeutig, d. h. es existiert nur ein Translationsvektor, der  $P$  in  $P'$  transformiert.

### 4.1.3 Rotation

Unter einer Rotation versteht man allgemein die Drehbewegung eines Objektes um die Achsen eines Koordinatensystems, wobei die Rotationen um genau eine der Achsen im Allgemeinen als elementare Drehbewegungen bezeichnet werden. Rotationen in 3D sind wesentlich komplexer als Translationen und setzen sich aus mehreren hintereinander geschalteten Elementardrehungen zusammen. Dies entspricht der Verknüpfung mehrerer Abbildungen und wird durch eine Multiplikation der jeweiligen Drehmatrizen erreicht.

#### Rotation mit Euler-Winkeln

Rotationen mittels EULER-Winkeln sind durch eine Rotation um jede der drei Koordinatenachsen gekennzeichnet. Um diesen Rotationen Eindeutigkeit zu verleihen, ist es notwendig, die Reihenfolge der Rotationen festzulegen. Eine Rotation in der Reihenfolge um die  $x$ -Achse mit dem Winkel  $\alpha$ , um die  $y$ -Achse mit dem Winkel  $\beta$ , gefolgt von einer Rotation um die  $z$ -Achse mit dem Winkel  $\gamma$  lässt sich in Matrixschreibweise



folgendermaßen anschreiben [Weisstein, 1999]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) &= \mathbf{R}_z(\gamma) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\alpha) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Bei der Nutzung von EULER-Winkeln treten mehrere Probleme auf. Neben dem so genannten „Gimbal-Lock“<sup>3</sup> treten Mehrdeutigkeiten<sup>4</sup> auf und die Reihenfolge der Einzelrotationen ist nicht beliebig. Desweiteren sind die in der Matrix  $\mathbf{R}$  enthaltenen Informationen redundant, d. h. es werden 9 Elemente zur Beschreibung von 3 Freiheitsgraden benötigt und die Orthogonalität muss durch 6 Bedingungen überprüft werden [Kraus, 1994].

### Rotation mit Quaternionen

Quaternionenrotationen stellen eine alternative Form für Rotationsoperatoren dar und unterscheiden sich wesentlich von den bekannten Rotationen mittels Rotationsmatrizen [Kuipers, 2002]. Quaternionen stellen eine Erweiterung der komplexen Zahlen dar und werden als komplexe Zahl mit einem Realteil  $q_0$  und drei Imaginärteilen  $q_x$ ,  $q_y$  und  $q_z$  zu

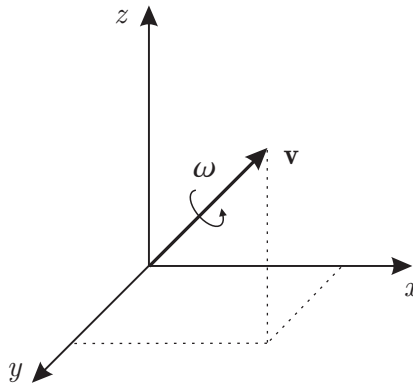
$$\mathbf{q} = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z \tag{4.4}$$

oder als ein vierdimensionaler Vektor mit den Komponenten  $q_0$ ,  $q_x$ ,  $q_y$  und  $q_z$  definiert. Üblich ist auch die Schreibweise

$$\mathbf{q} = \left[ q_0, \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} \right] = [s, \mathbf{v}], \quad \text{für } s \in \mathbb{R}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^3 \tag{4.5}$$

mit einem Skalarteil  $s$  und dem dreidimensionalen Vektor  $\mathbf{v}$ . Quaternionen werden im weiteren Verlauf der Arbeit analog zu Vektoren bezeichnet, eine Abgrenzung zu Vektoren ergibt sich aus dem Kontext.

Die geometrische Verdeutlichung eines Rotationsquaternions ist durch Abbildung 4.2 gegeben. Die Rechenregeln für Quaternionen sind sehr ähnlich zu denen der komplexen Zahlen. Besonderheiten ergeben sich hinsichtlich der Kommutativität und der Verrechnung der Imaginärteile untereinander. Für weitergehende Informationen siehe [Dam u. a., 1998] und [Mikhail u. a., 2001]. An dieser Stelle sollen nur die Regeln aufgeführt werden, die im Rahmen dieser Arbeit benötigt werden.



**Abb. 4.2:** Geometrische Anschauung Quaternion.

Das innere Produkt und die Norm von Quaternionen sind definiert als

$$\begin{aligned}
 \mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{q}_2 &= s_1 s_2 + \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2 \quad \text{und} \\
 \|\mathbf{q}\| &= \sqrt{\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}} = \sqrt{q_0^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}.
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

<sup>3</sup>Verlust eines Freiheitsgrades der Matrix  $\mathbf{R}$  durch gegenseitige Beeinflussung der EULER-Winkel.

<sup>4</sup>Verschiedene Rotationen beschreiben dieselbe Orientierung.

Die Multiplikation von Quaternionen ist beschrieben durch:

$$\mathbf{q}_1 \mathbf{q}_2 = [s_1 s_2 - \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2, [\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2 + s_1 \mathbf{v}_2 + s_2 \mathbf{v}_1]]^T. \quad (4.7)$$

Die Konjugierte  $\mathbf{q}^*$  eines Quaternionen  $\mathbf{q}$  ist folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{q}^* = [s, -\mathbf{v}]^* = [s, -\mathbf{v}]. \quad (4.8)$$

Die Inverse eines Quaternionen berechnet sich zu:

$$\mathbf{q}^{-1} = \frac{\mathbf{q}^*}{\|\mathbf{q}\|^2}. \quad (4.9)$$

Daraus wird ersichtlich, dass die Inverse des Einheitsquaternionen gleich der Konjugierten des Quaternionen ist.

Die Rotation eines beliebigen Vektors  $\mathbf{x} = (x, y, z)^T$  um eine Achse  $\mathbf{v}$  mit dem Winkel  $\omega$ , wie in Abbildung 4.2 dargestellt, kann mit Hilfe eines Einheitsquaternionen

$$\mathbf{q} = \left[ \cos\left(\frac{\omega}{2}\right), \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \mathbf{v} \right] \quad (4.10)$$

beschrieben werden durch eine zweimalige nicht-kommutative Quaternionenmultiplikation

$$\mathbf{x}' = \mathbf{q} \mathbf{x} \mathbf{q}^{-1} = \mathbf{q} \begin{bmatrix} 0 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \mathbf{q}^{-1} = \left( \overline{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q} \right) \mathbf{x}, \quad (4.11)$$

wobei der Vektor  $\mathbf{x}$  um die skalare Komponente zu einem Quaternion erweitert wird und  $\overline{\mathbf{Q}}$  sowie  $\mathbf{Q}$  die zu  $\mathbf{q}$  korrespondierenden  $4 \times 4$  Matrizen darstellen. Mit

$$\overline{\mathbf{Q}}^T \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \cdot \mathbf{q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_0^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2(q_x q_y - q_z q_0) & 2(q_x q_z + q_y q_0) \\ 0 & 2(q_x q_y + q_z q_0) & q_0^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2(q_y q_z - q_x q_0) \\ 0 & 2(q_x q_z - q_y q_0) & 2(q_y q_z + q_x q_0) & q_0^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

lässt sich nach [Horn, 1987] aus den Gleichungen (4.11) und (4.12) die korrespondierende orthonormale Rotationsmatrix eines Einheitsquaternionen ableiten. Unter der Annahme, dass  $\mathbf{q}$  Einheitsquaternion sei, ist auch die  $3 \times 3$  Submatrix  $\mathbf{R}_{(\mathbf{q})}$  orthonormal und ergibt sich folgendermaßen:

$$\mathbf{R}_{(\mathbf{q})} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2(q_x q_y - q_z q_0) & 2(q_x q_z + q_y q_0) \\ 2(q_x q_y + q_z q_0) & q_0^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2(q_y q_z - q_x q_0) \\ 2(q_x q_z - q_y q_0) & 2(q_y q_z + q_x q_0) & q_0^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

Auch der inverse Weg der Ableitung der Komponenten des Einheitsquaternionen aus der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{(\mathbf{q})}$  ist auf dem Weg des Komponentenvergleichs der Elemente der Rotationsmatrix möglich [Horn, 1987].

Die Verwendung von Quaternionen für die Beschreibung von Rotationen bietet gegenüber herkömmlichen Rotationsmatrizen entscheidende Vorteile. Ein Vorzug ist die Verminderung der Anzahl der nichtlinearen Bedingungsgleichungen. Bei der Rotation mit Quaternionen wird, im Gegensatz zu den sechs Bedingungsgleichungen der Rotationsmatrix mittels EULER-Winkeln, nur die Bedingung gefordert, dass das Quaternion ein Einheitsquaternion sein muss. So kann eine Rotation durch nur 4 Parameter beschrieben werden. Es verbleibt lediglich ein Freiheitsgrad, der durch die Normierung des Quaternionen beseitigt wird. Die resultierenden Bedingungsgleichungen sind bilinear, daher lassen sich die ausgeglichenen Parameter ohne Kenntnis von Näherungswerten berechnen. Erfahrungsgemäß genügt es, als Startwert ein Einheitsquaternion der folgenden Struktur vorzugeben:

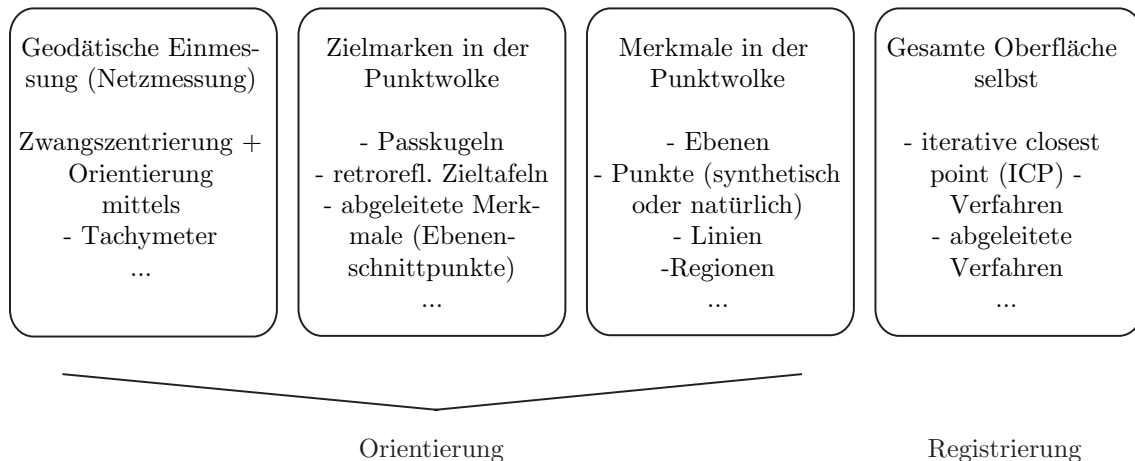
$$\mathbf{q}_0 = \left[ q_0, \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} \right] = \left[ 0, 5, \begin{pmatrix} 0, 5 \\ 0, 5 \\ 0, 5 \end{pmatrix} \right]. \quad (4.14)$$

Ein weiterer Vorteil ist die effizientere Konkatenation (Verkettung) bei der Quaternionenrepräsentation, was beim Einsatz eines entsprechenden Algorithmus [Bobick, 1998] zu einer Ersparnis der entsprechenden Rechenoperationen um den Faktor drei führt.

## 4.2 Verfahren zur Standpunktverknüpfung

Zur Lösung des Verknüpfungsproblems sind in der Literatur verschiedene Ansätze diskutiert worden. Bei einigen dieser Ansätze besteht zur Zeit noch erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich Robustheit der Ansätze und Automatisierbarkeit in der Anwendung. In der Praxis haben sich einige Ansätze etabliert, die abhängig sind vom jeweilig verwendeten Messinstrument und somit auch vom Hersteller der verwendeten Sensoren. Einen generellen Überblick über die eingesetzten Verfahren gibt Abbildung 4.3.

Eine Unterteilung der Verfahren in die Begriffe Orientierung und Registrierung nehmen [Wendt und Weisensee, 2003] vor. Dabei unterscheiden sie einerseits die Verfahren, die aus den Daten Merkmale extrahieren und diese Merkmale zur Transformation nutzen (Orientierung) und andererseits in die Verfahren, die überlappende, flächenhafte Bereiche der gesamten Datenmenge nutzen, um die relativen Beziehungen zwischen den Instrumentenstandpunkten festzulegen (Registrierung).



**Abb. 4.3:** Verfahren zur Verknüpfung verschiedener Instrumentenstandpunkte, nach [Wendt und Weisensee, 2003] adaptiert.

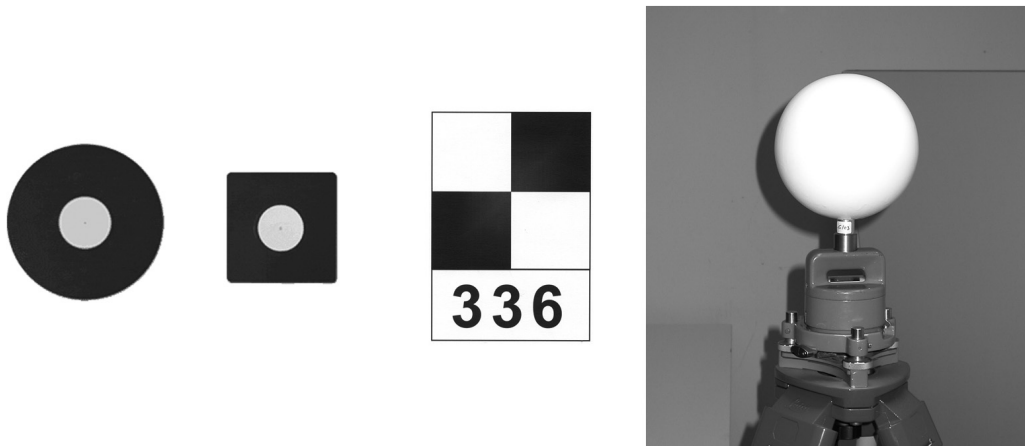
### 4.2.1 Orientierung

Werden die Koordinaten des Instrumentes unter Nutzung von Reflektoren mit einem geodätischen Verfahren, z. B. durch Nutzung eines Tachymeters gemessen und gelingt es, das polar messende Instrument in Richtung eines Fernzieles auszurichten, so kann auf einfache Weise eine Transformation in das Anwenderkoordinatensystem vorgenommen werden [Niemeier u. a., 2002]. Untersuchungen in [Buhrow, 2002] belegen für das untersuchte Messsystem I-SITE<sup>5</sup> jedoch, dass durch eine mechanisch bedingte unzureichende Ausrichtung des benötigten Zielfernrohres systematische Abweichungen in den Richtungswinkeln auftreten können und sich die äußere Richtungsgenauigkeit erheblich verschlechtert. Abhängig von der gewählten Aufgabenstellung und der damit verbundenen Genauigkeitsanforderungen für die abgeleiteten Zielgrößen ist das Verfahren der Verknüpfung mittels Zielfernrohr durch eines der nachfolgend genannten und genaueren Verfahren zu ersetzen.

Eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (HELMERT-Transformation) auf Grundlage von retroreflektierenden Zielmarken (tie points) zur Transformation von Messungen mehrerer Standpunkte wird u. a. in [Pfeifer u. a., 2000] vorgestellt. Die Genauigkeit dieser Transformation ist abhängig von der Detektierbarkeit und somit auch von der Größe der verwendeten Zielmarken, die jedoch in Bezug auf minimale Winkelauflösung, Laserstrahldivergenz und der Entfernung des Sensors vom Zielzeichen wiederum abhängt vom eingesetzten Instrument. Bei diesem Verfahren ist die Genauigkeit der Transformation ebenfalls mit der Anzahl und der räumlichen Verteilung der verwendeten Zielzeichen korreliert. Mehr als die drei zur eindeutigen Festlegung benötigten identischen Punkte erhöhen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Transformation, wobei analog zur Passpunktverteilung in der Photogrammetrie eine ausgewogene, d. h. gleichmäßige Verteilung der Zielzeichen im Messvolumen gewählt werden sollte. Durch Bildverarbeitungsoperationen (Ellipsenoperator) lassen sich die Mittelpunkte, der durch eine partiell höhere Auflösung erfassten Zielzeichen, bestimmen. Nachteilig wirkt sich bei diesem Verfahren jedoch aus, dass derzeit noch keine Aussage über die Identität der Zielmarken getroffen werden kann,

<sup>5</sup>Das System der Firma I-SITE basierte im Jahre 2002 auf einem RIEGL LMS – Z210 Sensor mit aufgesetztem Zielfernrohr.

da nur die Lage der Zielzeichen automatisch detektiert werden kann. Eine Einmessung mit gleichzeitiger Bestimmung der Identität der Zielzeichen kann jedoch mit einem anderen geodätischen Verfahren durchgeführt werden. Denkbar wären in diesem Zusammenhang beispielsweise die Tachymetrie oder die Kombination von tachymetrischen Verfahren und, wenn möglich, differentiellem GPS [Riegl u. a., 2003].



**Abb. 4.4:** Unterschiedlich ausgebildete Zielzeichen zur Registrierung von Punktwolken und Markierung von identischen Punkten: Targets (Durchmesser 15,2 cm und 7,6 cm  $\times$  7,6 cm) der Firma CYRA/LEICA GEOSYSTEMS [Leica Geosystems, 2003] (links), Zielzeichen 11 cm  $\times$  16 cm der Firma ZOLLER+FRÖHLICH (Mitte), sowie weiß lackierte Holzgloben mit einem Durchmesser von 15,1 cm (rechts) [Schulz und Ingensand, 2004a].

[Hovenbitzer, 2003] gelingt die Transformation bei einer Innenraumaufnahme über identische Punkte, die aus dem Schnitt von Ebenen abgeleitet wurden. Zur Bestimmung der Transformationsparameter zwischen zwei Systemen wurden unter Nutzung von in der Örtlichkeit vorhandenen Objekten (Pfeiler, Säulen und Tische) aus den Messdaten Ebenen extrahiert. Der Schnitt dreier Ebenen liefert dann jeweils einen Passpunkt, wobei die Korrespondenzen zwischen den Passpunkten in den verschiedenen Aufnahmen wieder manuell herzustellen sind.

Einen anderen Weg beschreitet [Kern, 2003], indem Polystyrol-Kugeln mit großem Durchmesser zur Verknüpfung der Messdaten Verwendung finden. Die Passkugeln werden vollständig automatisiert aus den Punktwolken der Laserscannerdaten extrahiert. Anschließend werden in einem gemeinsamen Ausgleichungsansatz, an dem alle Kugeloberflächenpunkte teilnehmen, die Parameter der Passkugeln (Mittelpunkt und Radius) neben den Transformationsparametern mitgeschätzt. Vorteilhaft lässt sich bei diesem Verfahren der Durchmesser der Kugeln variieren, mit der bei geeigneter Parameterschätzung über die Identitäten der Verknüpfungskugeln zwischen den zu transformierenden Szenen verfügt werden kann. Als Nachteil wird dort festgehalten, dass die Kugeln sehr groß und somit sehr unhandlich für den praktischen Einsatz sind. Trotzdem hat sich das Verfahren der Orientierung über identische Kugeln und deren Mittelpunktskoordinaten als der zur Zeit übliche Transformationsansatz bei der praktischen Anwendung herauskristallisiert.

Eine weitere Möglichkeit wird in [Kern, 2003] durch die Nutzung von Passebenen beschrieben, indem zu jeder benutzten Passebene eine parallel verlaufende Ebene beschrieben durch den Abstand gesucht wird und sich im Schnittpunkt dieser Ebenen der Standpunkt des Instrumentes im lokalen System befindet. Die Orientierung der Systeme wird dann über den Schnittwinkel der Normalenvektoren berechnet.

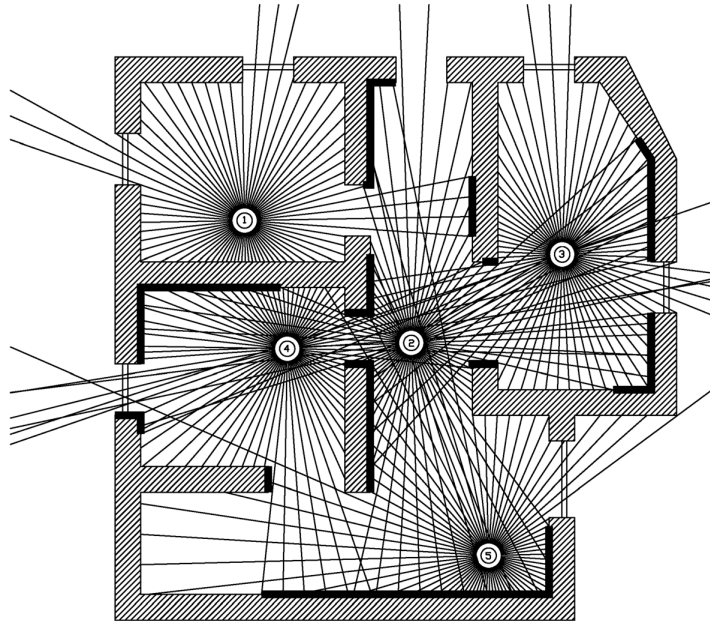
#### 4.2.2 Registrierung

Neben diesen Verfahren, die sich auf (platzierte oder natürliche) Merkmale in der Punktwolke beziehen, existieren diejenigen Verfahren, die sich aus dem so genannten *iterative closest point*-Verfahren [Besl und McKay, 1992] ableiten. Für diese Verfahren, die ihre spezielle Anwendung meist in der Bestimmung von Freiformflächen haben, haben sich die aus dem Bereich Computer Vision entnommenen Begriffe Datenfusion oder Registrierung etabliert. Dabei werden die (zwei) zu transformierenden lokalen Koordinatensysteme so orientiert, dass die Quadrate der Abstände zwischen korrespondierenden Punktepaaren minimiert werden. Für diese iterativen Verfahren benötigt man jedoch mehr oder weniger gute Startwerte, deren Bereitstellung auf Merkmalsextraktion beruhen [Schuster und Förstner, 2003]. Des Weiteren müssen signifikante Überlappungsbereiche mit einer aus-

reichender geometrischer Struktur existieren [Wendt und Weisensee, 2003]. Außerdem muss die Bereitstellung entsprechender Korrespondenzen in den Szenen gewährleistet werden.

### 4.3 Verkettete Systemtransformation mittels identischer Ebenen

Eine Standpunktverknüpfung auf Grundlage von identischen Passflächen wurde bereits in [Niemeier und Wild, 1995] und [Runne u. a., 2001] vorgeschlagen, jedoch nicht einer detaillierteren Betrachtung und Erläuterung unterzogen.



**Abb. 4.5:** Verknüpfung von verschiedenen Aufnahmen eines scannenden Messsystems mittels korrespondierender Flächen, vorgeschlagen in [Runne u. a., 2001].

In der kommerziellen Auswertesoftware *Cyclone 4.1* [Cyra, 2003] der Firma LEICA GEOSYSTEMS ist die Möglichkeit der Transformation mittels identischer Ebenen als einfachste Form der Passflächen verwirklicht. Nach Modellierung der Ebenen aus den Punktwolken im *ModelSpace* und Vergabe eines eindeutigen Identifikators werden in der so genannten *Constraint List* die Identitäten zur Bestimmung der Transformationsparameter bereitgestellt. Die Transformation erfolgt im Anschluss im *Registration* Modul, wobei der in dieser Software implementierte Ansatz nicht dokumentiert ist. Ähnliches gilt für den in [Alkis u. a., 2003] angedeuteten Ansatz der Blockausgleichung mit Flächensegmenten.

Wie bereits in Kapitel 3.3 eingeführt, ist eine Ebene durch den Normalenvektor  $\mathbf{n}$  und den Abstand  $d$  im dreidimensionalen Raum eindeutig gekennzeichnet. Aus diesem Grunde liegt es nahe, zur Transformation verschiedener Standpunktsysteme in ein übergeordnetes und/oder gemeinsames Koordinatensystem diese Parameter standpunktweise in einen funktionalen Zusammenhang zu bringen und die beschreibenden Parameter der Ebenen zur Transformation zwischen verschiedenen Standpunktsystemen zu nutzen. In diesem Abschnitt wird, im Sinne einer photogrammetrischen Blockausgleichung, ein Ansatz zur verketteten Transformation mehrerer Instrumentenstandpunkte mittels identischer Ebenen in einem Ausgleichungsschritt vorgestellt, der aufgrund seiner Bilinearität keine Näherungswerte benötigt, stabile numerische Resultate in 3D liefert und über eine Grobfehlersuchstrategie zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Steigerung der Genauigkeit verfügt. Durch die Grobfehlersuche werden u. a. auch Identitätsfehler bei der Zuordnung korrespondierender Flächen aufgedeckt, was aufgrund der Komplexität des Korrespondenzproblems mitunter notwendig ist. Neben der Berechnung der Transformationsparameter zwischen beliebig vielen Systemen besteht die Möglichkeit, die Parameter der Ebenen im Ausgleichungsmodell mit zu schätzen.

Ein ähnlicher mathematischer Ansatz findet sich in [Dijkman und van den Heuvel, 2002], der neben der Nutzung von Ebenenparametern auch die Einbeziehung von Zylindern zur Generierung von korrespondierenden Objekten vorsieht, sich jedoch auf die Transformation von zwei Szenen ineinander beschränkt und auf eine Grobfehlersuche verzichtet.

### 4.3.1 Prinzip der verketteten Transformation

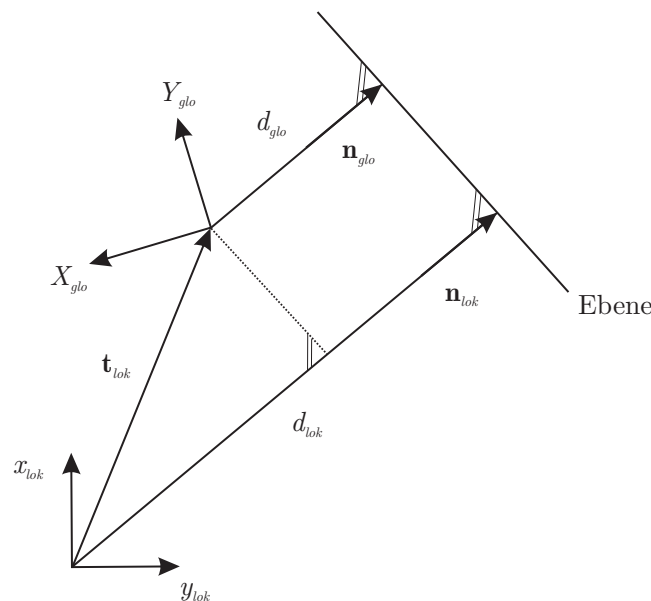
Zur Durchführung einer Koordinatentransformation müssen neben einer eindeutigen Transformationsvorschrift auch entsprechende Transformationsparameter vorhanden sein oder aber berechnet werden. Bei der Bestimmung der Transformationsparameter lassen sich zwei generelle Vorgehensweisen unterscheiden: die einfache und die verkettete Transformation, vgl. dazu [Gielsdorf, 1998].

**Einfache Transformation:** Bei der einfachen Transformation ergibt sich die Problemstellung, entsprechende Parameterwerte, meist Koordinaten von diskreten Punkten eines Ausgangssystems in ein Zielsystem zu transformieren. Unter Nutzung identischer Punkte, die im Ausgangs- und im Zielsystem vorliegen, werden die unbekannt Transformationsparameter und die Koordinaten aller Punkte im Zielsystem im Ausgleichsmodell berechnet. Anzustreben ist, dass bei der Bestimmung der Koordinaten im Zielsystem alle zu transformierenden Neupunkte in einem Gebiet liegen, welches von Passpunkten umschlossen ist. Bei einer Transformation außerhalb dieses Gültigkeitsbereiches ist damit zu rechnen, dass Extrapolationsfehler auftreten.

**Verkettete Transformation:** Die verkettete Transformation verwendet neben den identischen Punkten auch so genannte Verknüpfungspunkte in den überlappenden Bereichen mehrerer Ausgangssysteme. Mit diesem Vorgehen wird gewährleistet, dass der Gültigkeitsbereich der Transformationsparameter ausgedehnt wird und die Minimierung der Restklaffen erfolgt in den identischen Punkten sowie in den Verknüpfungspunkten. Die Ausgleichung erfolgt gleichzeitig unter Beachtung der geometrischen Bedingungen in einem Guss. Dazu ist es notwendig, die Koordinaten aller Punkte und die Kovarianzen mitzuführen. Durch die verkettete Transformation ist die Möglichkeit gegeben, Identitätsfehler und grobe Fehler im Beobachtungsmaterial aufzudecken. Eine Adaption dieses Vorgehens auf andere Arten von Parameterwerten (identische Ebenen statt identischer Punkte) ist jederzeit möglich bzw. es gelten die getroffenen Ausführungen.

### 4.3.2 Geometrische Beschreibung

Zur geometrischen Anschauung der Grundlagen dieser Transformation wird im Folgenden auf die Bezeichnungen der Abbildung 4.6 Bezug genommen. In dieser Abbildung ist eine identische Ebene dargestellt, die zur Transformation zwischen dem globalen  $\mathbf{X}_{glo}$  und lokalen  $\mathbf{x}_{lok}$  Koordinatensystem benötigt wird.



**Abb. 4.6:** Geometrischer Zusammenhang der Systemtransformation mittels identischer Ebenen in 2D zwischen dem globalen ( $\mathbf{X}_{glo}$ ) und lokalen ( $\mathbf{x}_{lok}$ ) Koordinatensystem am Beispiel einer identischen Ebene.

Neben der Darlegung der Koordinatensysteme sind die beschreibenden Ebenenparameter Normalenvektor  $\mathbf{n}$  und Abstand zum Ursprung  $d$  jeweils im lokalen und globalen Koordinatensystem dargestellt und beziehen sich dabei auf die bereits in Kapitel 3 eingeführten Bezeichnungen. Die Benennung *global* bezieht sich im

Folgendes auf das im Zuge der Transformation genutzte übergeordnete Referenz- oder Zielsystem, hingegen werden die verschiedenen zur Verkettung herangezogenen Koordinatensysteme als *lokal* bezeichnet. Der Vektor des Rotationsquaternions steht senkrecht zur Papierebene und ist somit in der Skizze nicht sichtbar. Die Darstellung beschränkt sich aus Übersichtlichkeitsgründen auf den zweidimensionalen Fall, lässt sich jedoch ohne weiteres um die dritte Dimension erweitern.

Die Transformation gliedert sich in eine Näherungswertbestimmung für die gesuchten Parameter und eine kombinierte Ausgleichung der Rotation und Translation in einem sich anschließenden Schritt, vgl. Abbildung 4.7.

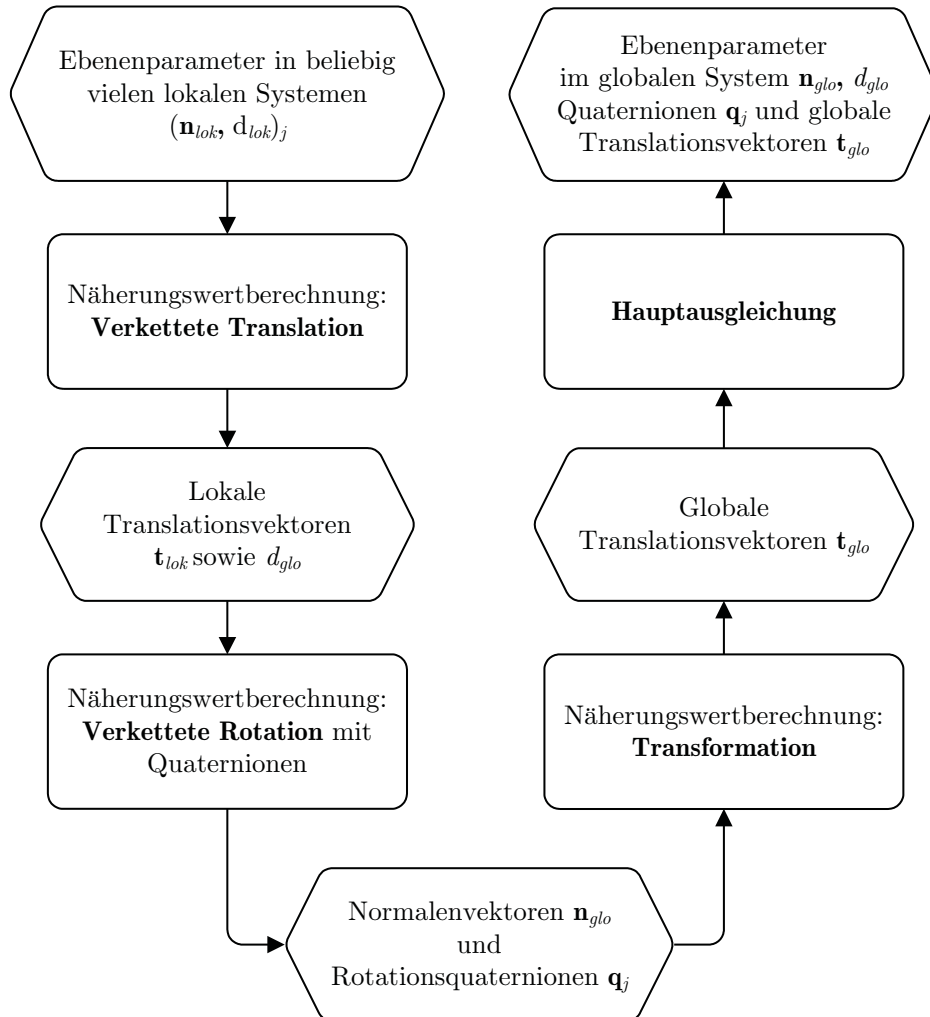


Abb. 4.7: Ablauf der Transformation mittels identischer Ebenen.

Dieses Vorgehen der Zerlegung in eine Näherungswertbestimmung und eine Hauptausgleichung lässt sich als Siebkette zur Grobfehlersuche verstehen. Dabei werden die Maschen der Siebkette von Schritt zu Schritt kleiner und filtern somit die groben Fehler bereits im Prozess der Näherungswertbestimmung zur Hauptausgleichung heraus. Bei dem hier vorgestellten Ansatz handelt es sich um eine verkettete Systemtransformation, was zur Folge hat, dass alle Ebenenparameter mit ihren Kovarianzen im gesamten Ausgleichungsprozess mitgeführt werden müssen.

### 4.3.3 Näherungswertbestimmung

Wie bereits erwähnt, eignet sich die Strategie der Näherungswertbestimmung im Sinne einer Siebkette zur Detektion und Eliminierung von groben Fehlern im Beobachtungsmaterial. Außerdem werden in diesen Berechnungsschritten die Näherungswerte für die Hauptausgleichung bereitgestellt. Im Folgenden wird detailliert auf die Näherungswertbestimmung eingegangen, die sich in die Berechnungsschritte verkettete Translation, verkettete Rotation und Transformation unterteilt.

## Translation

Für den globalen Abstandsparameter  $d_{glo_i}$  der Ebene  $E_i$  ergibt sich aus Abbildung 4.6 unmittelbar der Zusammenhang

$$d_{glo_i} = d_{lok_{i,j}} - \mathbf{t}_{lok_j} \mathbf{n}_{lok_{i,j}} \quad (4.15)$$

mit  $i = 1, 2, \dots, n$  beobachteten Ebenen je  $j = 1, 2, \dots, m$  lokalen 3D-Systemen. Diese Gleichung lässt sich nach Umstellung im Sinne einer Verbesserungsgleichung für eine Ebene  $i$  im lokalen System  $j$  aus Übersichtlichkeitsgründen unter Vernachlässigung der Indizes interpretieren

$$d_{lok} + v = \mathbf{n}_{lok} \mathbf{t}_{lok} + d_{glo} = \Phi_{i,j} = n_{lok_x} t_{lok_x} + n_{lok_y} t_{lok_y} + n_{lok_z} t_{lok_z} + d_{glo} \quad (4.16)$$

und im GAUSS-MARKOV-Modell mit der Designmatrix  $\mathbf{A}$ , die die partiellen Ableitungen der Funktion  $\Phi_{i,j}$  nach den unbekanntem Parametern  $\mathbf{t}_{lok_j}$  und  $d_{glo_i}$  an den Näherungsstellen enthält, lösen. Die Untermatrizen  $[\mathbf{A}_I]_j$  enthalten die Ableitungen nach den unbekanntem Parametern  $\mathbf{t}_{lok_j}$ , hingegen sind in den Untermatrizen  $[\mathbf{A}_{II}]_i$  die partiellen Ableitungen nach  $d_{glo_i}$  enthalten:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}_I]_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_{II}]_1 \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}_I]_2 & \cdots & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_{II}]_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & [\mathbf{A}_I]_j & [\mathbf{A}_{II}]_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_D]_{kk} \end{bmatrix}. \quad (4.17)$$

Aufgrund der bis hierhin fehlenden Datumsverfügung ist die Normalgleichungsmatrix des Ausgleichungsproblems singulär. Durch Einführen einer zur Zahl der in den Normalgleichungen auftretenden Rangdefekten äquivalenten Anzahl von datumsgebenden Parametern wird dieser Defekt behoben, vgl. [Welsch u. a., 2000]. Die Datumsfestlegung geschieht in der Gestalt, dass die frei wählbaren Datumparameter *Abstand zum Ursprung* der Anzahl  $k$  als Beobachtungen<sup>6</sup>

$$d_{glo}^* + v_{d_{glo}^*} = d_{glo} \quad (4.18)$$

eingeführt werden, was zur Erweiterung der Designmatrix  $\mathbf{A}$  um die datumsgebende Teilmatrix  $[\mathbf{A}_D]_{kk}$  führt. Das Ergebnis dieser Ausgleichung

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ &= \mathbf{N}^{-1} \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4.19)$$

sind Näherungswerte für die lokalen Translationsvektoren  $\mathbf{t}_{lok_j}$  und die globalen Abstandsparameter  $d_{glo_i}$ . Bei der Näherungswertbestimmung wird angenommen, dass die Beobachtungen der lokalen Ebenenparameter gleichgenau und unkorreliert sind, somit handelt es sich bei der Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  um eine Diagonalmatrix.

## Rotation

Im folgenden Schritt, der verketteten Rotation, werden die Näherungswerte für die Rotationsquaternionen  $\mathbf{q}_j$  der lokalen Systeme und die globalen Normalenvektoren  $\mathbf{n}_{glo_i}$  bereit gestellt. Aus dem Zusammenhang

$$\mathbf{n}_{lok_{i,j}} = \mathbf{q}_j \mathbf{n}_{glo_i} \mathbf{q}_j^{-1} \quad (4.20)$$

lässt sich im Sinne einer Verbesserungsgleichung bei Einführung der Quaternionenmultiplikation nach Gleichung (4.11) ein bilinearer Zusammenhang der folgenden Gestalt formulieren:

$$0 + \mathbf{v}_{i,j} = \mathbf{q}_j \mathbf{n}_{glo_i} - \mathbf{n}_{lok_{i,j}} \mathbf{q}_j = \Phi_{i,j}. \quad (4.21)$$

Analog zum vorhergehenden Schritt der Näherungswertbestimmung in der Translation ergibt sich der Aufbau und die Struktur der Designmatrix  $\mathbf{A}$  wie in (4.17). Die Untermatrizen  $[\mathbf{A}_I]_j$  enthalten die Ableitungen nach den Komponenten der Rotationsquaternionen  $\mathbf{q}_j$  und die Untermatrizen  $[\mathbf{A}_{II}]_i$  enthalten die partiellen Ableitungen nach  $\mathbf{n}_{glo_i}$ . Die Datumsverfügung geschieht analog zum Schritt der bereits beschriebenen Translation, hingegen werden hier die Normalenvektoren der Anzahl  $k$  der datumsgebenden Ebenen als Beobachtungen eingeführt

$$\mathbf{n}_{glo}^* + \mathbf{v}_{n_{glo}^*} = \mathbf{n}_{glo}, \quad (4.22)$$

<sup>6</sup>Erforderlich sind als Minimalanforderung  $k = 3$  Abstände  $d_{glo}^*$  von nicht koplanaren Ebenen zur Überwindung des Datumsdefektes.



was ebenfalls zur Erweiterung der Designmatrix  $\mathbf{A}$  um die Teilmatrix  $\mathbf{A}_D$  führt. Bei diesem Ausgleichungsansatz handelt es sich um eine Erweiterung des GAUSS-MARKOV-Modells, d. h. es werden zusätzlich Restriktionen zwischen den unbekanntem Parametern eingeführt. Aufgrund der Restriktion  $\|\mathbf{q}_j\| = 1$  lassen sich unter Vereinfachungen, die im Rahmen der Genauigkeit zulässig sind, folgende Bedingungsgleichungen aufstellen:

$$\Phi_{(\mathbf{q}_j)} = 0 = q_{0_j}^2 + q_{z_j}^2 + q_{y_j}^2 + q_{x_j}^2 - 1 \quad \text{für } j = 1, \dots, m. \quad (4.23)$$

Die Normierung der Quaternionen ist notwendig, um durch eine Behebung der Überparametrisierung der Quaternionen Rotationen im  $\mathbb{R}^3$  durchzuführen und um die Berechnung der Inversen des Quaternionen zu vereinfachen. Es ergibt sich die Matrix der Bedingungen  $\mathbf{C}^T$ , in der die partiellen Ableitungen der Bedingungsgleichungen abgeleitet nach den Unbekannten enthalten sind. Die Lösung wird nunmehr im vermittelnden Ausgleichungsansatz mit Bedingungen zwischen den zu schätzenden Parametern erhalten. Werden die Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ -\mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

nach  $\Delta \mathbf{x}$  aufgelöst, ergibt sich die Lösung für die Rotationsquaternionen  $\mathbf{q}_j$  der lokalen Systeme und die globalen Normalenvektoren  $\mathbf{n}_{glo_i}$ .

### Transformation

Die mit Hilfe der Translation gewonnenen lokalen Translationsvektoren  $\mathbf{t}_{lok_j}$  werden mit den bei der Rotation berechneten Quaternionen  $\mathbf{q}_j$  zu globalen Translationsvektoren  $\mathbf{t}_{glo_j}$  transformiert:

$$\mathbf{t}_{glo_j} = \mathbf{q}_j^{-1} \mathbf{t}_{lok_j} \mathbf{q}_j. \quad (4.25)$$

Die Transformation ist der letzte Schritt der Bereitstellung der Näherungswerte für die anschließende Hauptausgleichung, in der alle Systeme simultan in ein globales System überführt werden.

### 4.3.4 Hauptausgleichung

Der abschließende Schritt der Hauptausgleichung greift auf die in den Näherungswertberechnungen der vorigen Abschnitte bereitgestellten Näherungswerte für die unbekanntem Parameter zu.

### Funktionales Modell

Das funktionale Modell der Hauptausgleichung lässt sich als Funktion der Beobachtungen in den unbekanntem Parametern folgendermaßen anschreiben:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{lok_{i,j}} &= \mathbf{q}_j \mathbf{n}_{glo_i} \mathbf{q}_j^{-1} = \mathbf{R}_{(\mathbf{q}_j)} \mathbf{n}_{glo_i}, \\ d_{lok_{i,j}} &= d_{glo_i} - \mathbf{t}_{glo_j} \mathbf{n}_{glo_i}. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Aus diesem funktionalen Zusammenhang lassen sich Verbesserungsgleichungen aufstellen:

$$\begin{aligned} \mathbf{n}_{lok_{i,j}} + \mathbf{v}_{i,j} &= \mathbf{q}_j \mathbf{n}_{glo_i} \mathbf{q}_j^{-1} = \mathbf{R}_{(\mathbf{q}_j)} \mathbf{n}_{glo_i}, \\ d_{lok_{i,j}} + v_{i,j} &= d_{glo_i} - \mathbf{t}_{glo_j} \mathbf{n}_{glo_i}. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Das zusätzliche Einführen von  $k$  Datumparametern als Beobachtungen in der Form

$$\begin{aligned} n_x^* + v_{n_x^*} &= n_x \\ n_y^* + v_{n_y^*} &= n_y \\ n_z^* + v_{n_z^*} &= n_z \\ d^* + v_{d^*} &= d \end{aligned} \quad (4.28)$$

führt zu einer Erweiterung der Modalmatrix in Abhängigkeit von der Anzahl der Datumparameter. Die Designmatrix  $\mathbf{A}$  ergibt sich somit zu einer Blockstruktur:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}_I]_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & & & & [\mathbf{A}_{III}]_1 & & & \\ \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} & & \mathbf{0} & & \vdots & & \mathbf{0} & \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_I]_j & & & & [\mathbf{A}_{III}]_j & & & \\ & & & [\mathbf{A}_{II}]_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_{IV}]_1 & & & \\ & \mathbf{0} & & \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} & \vdots & & \mathbf{0} & \\ & & & \mathbf{0} & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_{II}]_j & [\mathbf{A}_{IV}]_j & & & \\ & \mathbf{0} & & & \mathbf{0} & & \mathbf{0} & [\mathbf{A}_{DII}] & & \\ \mathbf{0} & & & & \mathbf{0} & & [\mathbf{A}_{DI}] & \mathbf{0} & & \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Die mit ihren Dimensionen gekennzeichneten Teilmatrizen  $[\mathbf{A}_I]_j$ ,  $[\mathbf{A}_{II}]_j$ ,  $[\mathbf{A}_{III}]_j$  und  $[\mathbf{A}_{IV}]_j$  enthalten in dieser Reihenfolge die Koeffizienten einer JAKOBI-Matrix, d. h. die Ableitungen der Funktionen nach den unbekannt Parametern  $\mathbf{q}_j$ ,  $\mathbf{t}_{glo_j}$ ,  $\mathbf{n}_{glo_i}$  und  $d_{glo_i}$ . Die Submatrizen  $[\mathbf{A}_{DI}]_j$  und  $[\mathbf{A}_{DII}]_j$  zur Überwindung des Datumsdefektes ergeben sich aus (4.28). Die Datumsverfügung kann über in einem globalen Referenzrahmen bestimmte Ebenen festgelegt werden, z. B. durch Beobachtung von mindestens drei datumsgebenden Ebenen mit einem alternativen Messsystem am Rand des Objektes, oder aber die Datumsfestlegung geschieht über die Auswahl von geeigneten Ebenen auf einem beliebigen Standpunkt. Dabei ist die Anzahl der datumsbestimmenden Ebenen frei wählbar unter der Einschränkung, dass die Mindestforderung von drei nicht koplanaren Ebenen in der Datumsverfügung erfüllt sein muss.

### Stochastisches Modell

Zur Bereitstellung der stochastischen Information für dieses Ausgleichsmodell werden die aus der strukturierten Geometriedatenableitung (siehe Kapitel 3) gewonnenen Ebenenparameter und ihre entsprechenden Varianz-Kovarianzmatrizen übergeben. Die beobachteten Parameter sind ebenenweise stark miteinander korreliert und unter Umständen nicht gleichgenau. Es entsteht nach Invertierung der Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{II}$  eine Gewichtsmatrix, die nur in der Diagonalen vollbesetzte  $4 \times 4$  Untermatrizen  $\mathbf{P}_{i,j}$  enthält. Die Untermatrizen  $\mathbf{P}_{i,j}$  sind in den Diagonalen mit den Varianzen der Ebenenparameter belegt und dazu symmetrisch mit den Kovarianzen der aus den Ebenenausgleichungen gewonnenen Ebenenparametern:

$$\mathbf{P}_{i,j} = \mathbf{Q}_{II}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{n_x}^2 & cov(n_x, n_y) & cov(n_x, n_z) & cov(n_x, d) \\ cov(n_y, n_x) & \sigma_{n_y}^2 & cov(n_y, n_z) & cov(n_y, d) \\ cov(n_z, n_x) & cov(n_z, n_y) & \sigma_{n_z}^2 & cov(n_z, d) \\ cov(d, n_x) & cov(d, n_y) & cov(d, n_z) & \sigma_d^2 \end{bmatrix}_{i,j}^{-1}. \quad (4.30)$$

### Parameterschätzung

Bei dem oben eingeführten Ausgleichsansatz handelt es sich wiederum um eine Erweiterung des GAUSS-MARKOV-Modells, d. h. es werden ebenfalls Bedingungen zwischen den unbekannt Parametern formuliert. Zusätzlich zur Normierung der Rotationsquaternionen nach (4.23) sollen auch die globalen Normalenvektoren der Ebenen normiert werden ( $\|\mathbf{n}_{glo_i}\| = 1$ ), was zur Folge hat, dass das funktionale Modell um Bedingungsgleichungen der Form

$$\Phi_{(\mathbf{n}_{glo_i})} = 0 = n_{glo_{x_i}}^2 + n_{glo_{y_i}}^2 + n_{glo_{z_i}}^2 - 1 \quad \text{für } i = 1, \dots, n$$

erweitert wird. Die Matrix  $\mathbf{C}^T$ , in der die partiellen Ableitungen der Bedingungsgleichungen abgeleitet nach den Unbekannt enthalten sind, wird somit ebenfalls erweitert. Die unbekannt Parameter, d. h. die globalen Ebenenparameter  $\mathbf{n}_{glo_j}$  und  $d_{glo_j}$ , die Rotationsquaternionen  $\mathbf{q}_j$  sowie die Translationsvektoren  $\mathbf{t}_{glo_j}$ , ergeben sich aus den Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \\ -\mathbf{c} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

unter Berücksichtigung der LANGRANGESchen Multiplikatoren oder Korrelaten  $\mathbf{k}$  zu

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} - \mathbf{C} \mathbf{k}). \quad (4.32)$$

Genauigkeitsaussagen für die unbekannt Parameter lassen sich aus den durch die Invertierung erhaltenden Kofaktorenmatrizen unter Berücksichtigung des erwartungstreuen Schätzers  $s_0^2$  für den unbekannt Varianzfaktor  $\sigma_0^2$  gewinnen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\mathbf{xx}} & \mathbf{Q}_{\mathbf{xk}} \\ \mathbf{Q}_{\mathbf{kx}} & \mathbf{Q}_{\mathbf{kk}} \end{bmatrix}. \quad (4.33)$$

Unter Verwendung des erwartungstreuen Schätzers  $s_0^2$

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u + r} \quad (4.34)$$

mit  $n$  Beobachtungen,  $u$  zu schätzenden Parametern und  $r$  Bedingungen ergeben sich die Varianzen der gesuchten Schätzwerte als Diagonalelemente der Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_{\mathbf{xx}}$  der Parameter, vgl. [Welsch u. a., 2000], zu

$$s_i^2 = (\mathbf{C}_{\mathbf{xx}})_{ii} \quad \text{mit} \quad \mathbf{C}_{\mathbf{xx}} = s_0^2 \mathbf{Q}_{\mathbf{xx}}. \quad (4.35)$$

Da die Darstellungen der Quaternionen mit ihren Genauigkeiten als Rotationsparameter schwer zu interpretieren sind, kann eine Umrechnung in metrische Maße und eine Genauigkeitsabschätzung per Fehlerfortpflanzung berechnet werden. Aus der allgemeinen Darstellung eines Rotationsquaternions

$$\mathbf{q} = \left[ \cos\left(\frac{\omega}{2}\right), \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \mathbf{v} \right], \quad (4.36)$$

siehe auch Gleichung 4.10, lassen sich die Komponenten des Vektors  $\mathbf{v}$  und des Drehwinkel  $\omega$  berechnen. Der Drehwinkel  $\omega$  kann dabei als Orientierungsunbekannte interpretiert werden. Die Komponenten des Vektors  $\mathbf{v}$  lassen sich darstellen zu

$$\mathbf{v}^T = [v_x \quad v_y \quad v_z]^T = \left[ \frac{q_x}{\sqrt{1 - q_0^2}} \quad \frac{q_y}{\sqrt{1 - q_0^2}} \quad \frac{q_z}{\sqrt{1 - q_0^2}} \right]^T, \quad (4.37)$$

und die Orientierungsunbekannte lässt sich anschreiben zu

$$\omega = 2 \arccos q_0. \quad (4.38)$$

Durch eine Fehlerfortpflanzung bezüglich  $q_0, q_x, q_y$  und  $q_z$ , die gekennzeichnet ist durch

$$\sigma_i^2 = \mathbf{F} \cdot \mathbf{C}_{\mathbf{ll}} \cdot \mathbf{F}^T, \quad (4.39)$$

lassen sich Aussagen zu den Genauigkeiten der Unbekannten treffen. Die Funktionalmatrix enthält die partiellen Ableitungen der Zielfunktionen aus Gleichung (4.37) und (4.38) nach den Unbekannten. Die Kovarianzmatrix  $\mathbf{C}_{\mathbf{ll}}$  der Beobachtungen ist aufgrund von Korrelationen vollbesetzt. Die Funktionalmatrix  $\mathbf{F}_i$  für ein Rotationsquaternion  $\mathbf{q}_i$  ergibt sich zu

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \frac{q_x q_0}{\sqrt{(1 - q_0^2)^3}} & \frac{1}{\sqrt{1 - q_0^2}} & 0 & 0 \\ \frac{q_y q_0}{\sqrt{(1 - q_0^2)^3}} & \frac{1}{\sqrt{1 - q_0^2}} & 0 & 0 \\ \frac{q_z q_0}{\sqrt{(1 - q_0^2)^3}} & \frac{1}{\sqrt{1 - q_0^2}} & 0 & 0 \\ \frac{-2}{\sqrt{1 - q_0^2}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.40)$$

### Aspekte der Zuverlässigkeit

In allen zuvor beschriebenen Schritten der Näherungswertbereitstellung und im Zuge der Hauptausgleichung lassen sich nach erfolgter iterativer Lösung des jeweiligen Gleichungssystems Aussagen zur Zuverlässigkeit ableiten. Träger zur Bestimmung von Zuverlässigkeitskriterien ist die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{vv}$ , die sich folgendermaßen ableiten lässt:

$$\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{P}^{-1} - \left( \mathbf{A} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \right). \quad (4.41)$$

Zuverlässigkeitsmaße geben Auskunft über den Schutz vor groben Fehlern. Zur Überprüfung der Beobachtungen und zur Ableitung von Teststrategien auf grobe Beobachtungsfehler sollten allein die Verbesserungen

oder aus den Verbesserungen abgeleitete Funktionen Verwendung finden [Förstner, 1981]. Dabei lässt sich aufbauend auf die Kovarianzmatrizen der ausgeglichenen Größen folgende Teststrategie zur Eliminierung grober Fehler anwenden. Nach [Niemeier, 2002] lassen sich standardisierte (normierte) Verbesserungen

$$NV_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} = \frac{v_i}{\sigma_0 \sqrt{(q_{vv})_{ii}}} \sim N(0, 1) \quad (4.42)$$

eingeführen, wobei mit  $(q_{vv})_{ii}$  das  $i$ -te Diagonalelement von  $\mathbf{Q}_{vv}$  bezeichnet wird. Die normierten Verbesserungen folgen bei korrektem Ausgleichungsmodell der Standard-Normalverteilung und es kann die folgende Wahrscheinlichkeitsaussage für einen Einzeltest abgeleitet werden:

$$P \left\{ NV_i = \frac{|v_i|}{\sigma_0 \sqrt{(q_{vv})_{ii}}} > y_{1-\alpha/2} | H_0 \right\} = 1 - \alpha \quad (4.43)$$

Ein grober Fehler im Beobachtungsmaterial liegt nunmehr dann vor, wenn eine Testgröße  $NV_i$  größer ist, als ein aus der Normalverteilung abzuleitender Grenzwert  $y_{1-\alpha}$ . Dem Test liegt die Nullhypothese, die Beobachtung sei fehlerfrei, zugrunde. Bei der Berechnung der normierten Verbesserungen ist der Fall abzufangen, bei dem der Ausdruck im Nenner der Gleichung (4.42) zu Null wird. Dies ist der Fall, wenn über das Datum nur in der minimal möglichen Anzahl der Datumsparameter verfügt wird und somit die Verbesserungen  $v_k$  an den Datumsunkten zu Null werden<sup>7</sup>.

Auf diese Weise ist im Ausgleichungsprozess eine Grobfehlersuche im Beobachtungsmaterial möglich und eventuell auftretende Fehler in den Beobachtungen können iterativ eliminiert werden. Das praktische Vorgehen der Eliminierung grober Fehler ist durch die sukzessive Eliminierung der Beobachtung mit der jeweils größten normierten Verbesserung mit anschließender Wiederholung der Ausgleichung gekennzeichnet. Zu diesen groben Beobachtungsfehlern können beispielsweise falsche Ebenenidentifikationen aus Kapitel 3.4 gezählt werden. Diese falschen Zuordnungen lassen sich durch die Bestimmung und Bewertung der normierten Verbesserungen und anschließende Aufhebung der Identitäten beheben.

## Konfiguration

Wie bei den Transformationsansätzen, die durch eine 3D-HELMERT-Transformation nach Gleichung 4.1 gekennzeichnet sind, ist auch bei der Nutzung identischer Ebenen zur standpunktweisen Verknüpfung auf eine ausgewogene Verteilung der Ebenen zu achten, um eine bestmögliche Schätzung der Rotations- und Translationsparameter zu gewährleisten. Dabei sollten die zur Transformation herangezogenen Ebenen, soweit möglich, gleichmäßig im Messvolumen verteilt sein. Es ist die Minimalanzahl von drei identischen Ebenen zur Verknüpfung von jeweils zwei Instrumentenstandpunkten bereitzustellen. Jede weitere in den Transformationsprozess einfließende Ebene erhöht die Genauigkeit und ermöglicht Aussagen zur Zuverlässigkeit. Die nach der automatischen Extraktion aus den Punktwolken eines Standpunktes zu selektierenden Ebenen müssen des Weiteren derart ausgewählt werden, dass sie eine Bestimmung der Transformationsparameter in allen drei Dimensionen zulassen. Beispielsweise sollten zur sicheren Ableitung der Höhenkomponenten der Translationsparameter Ebenen in die Transformation einfließen, die aus Bereichen der Decke oder des Bodens gebildet werden.

Die Größe bzw. der sicht- und messbare Bereich der Ebenen hat auf die Bestimmung der Transformationsparameter einen direkten Einfluss. Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Bestimmung der Ebenenparameter, da der Abstandsparameter  $d$  und der Normalenvektor  $\mathbf{n}$  als Orientierung direkt in die Transformation mit eingehen. Je größer der sichtbare Teil und somit auch der zu Messungen von Objektpunkten auf der Oberfläche zur Verfügung stehende Bereich einer ebenen Fläche ist, um so genauer approximiert die Parameterschätzung die tatsächliche (ideale) Gestalt und somit auch die Orientierung für die jeweils betrachtete Ebene. Eine Erhöhung der Anzahl an gemessenen Objektpunkten durch ein engeres Raster und somit eine Erhöhung der Beobachtungen zur Ebenenausgleichung bringt in diesem Zusammenhang keine Verbesserung der Parameterschätzung für die Registrierung. Aus diesem Grund sollte darauf geachtet werden, wenn möglich Verdeckungen zu meiden, sowie die vollständige Ausdehnung der ebenen Flächen messtechnisch zu erfassen und aus diesen Objektpunkten die beschreibenden Parameter der Ebenen abzuleiten.

Für die Genauigkeit der Transformationsparameter ist es weiterhin entscheidend, wie die Wahl der datumsgebenden Ebenenparameter ausfällt. Hier sollte darauf geachtet werden, dass die zur Überwindung des Datumsdefektes mindestens benötigten drei Ebenen paarweise koplanar sind, d. h. ideal ist die Festlegung der datumsgebenden Ebenen durch diejenigen Ebenen, die beispielsweise eine Raum- oder Gebäudeecke bilden, vgl. auch Abbildung 4.8. Jede davon abweichende Konfiguration dieser drei Ebenen führt zu einer Verschlechterung der Genauigkeiten der Transformationsparameter.

<sup>7</sup>Analog zur Berechnung eines polar angehangenen Punktes, dort sind die Verbesserungen ebenfalls Null.

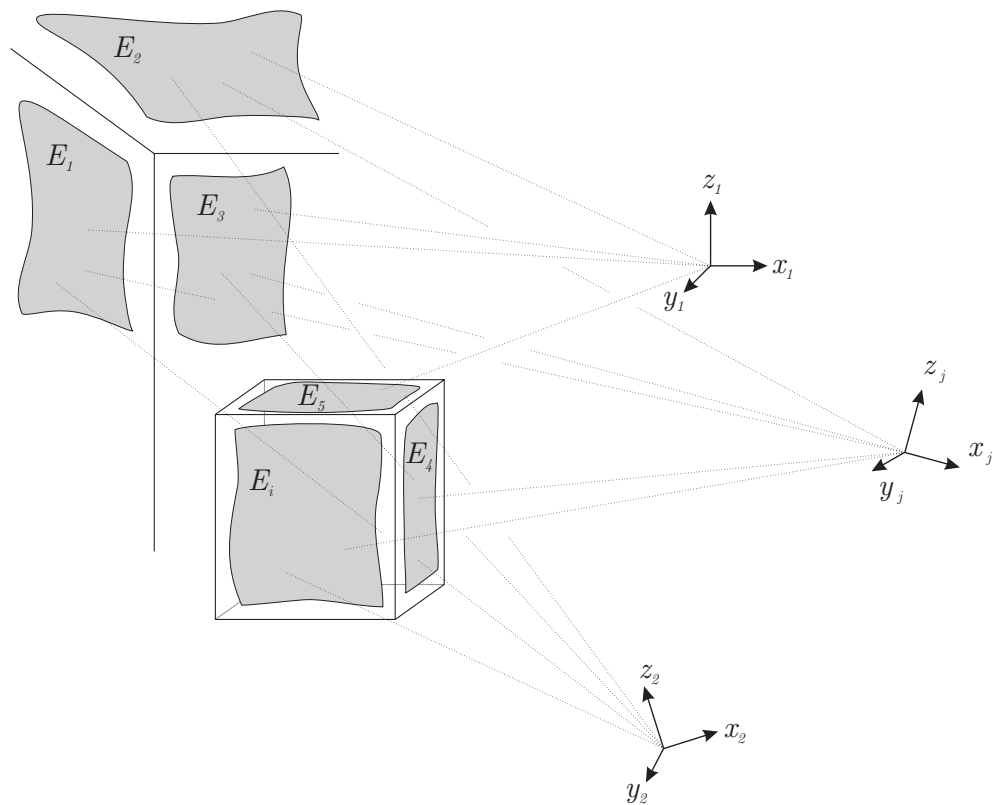


Abb. 4.8: Schematische Darstellung der verketteten 3D-Ebenentransformation.

#### 4.3.5 Testdatensätze

Zur praktischen Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Transformationsalgorithmus werden verschiedene Testdatensätze herangezogen, die mit einem ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003 Sensor aufgenommen wurden. Dazu wurden Messungen in einem Labor an der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Das Testobjekt besteht aus 15 ebenen Platten<sup>8</sup>, die, wie in Abbildung 4.9 dargestellt, im Laborraum angebracht wurden.

Die unterschiedliche Darstellung der Ebenen in dieser Abbildung kennzeichnet gleichzeitig die Anbringung bzw. die Lage der Ebenen im Raum. Aufgrund der baulichen Beschränkungen befinden sich an der Decke und auf dem Fußboden jeweils nur eine Ebene, hingegen sind an den Wänden des Labors neben horizontal angebrachten Platten auch Ebenen montiert, die sich schräg im Raum befinden.

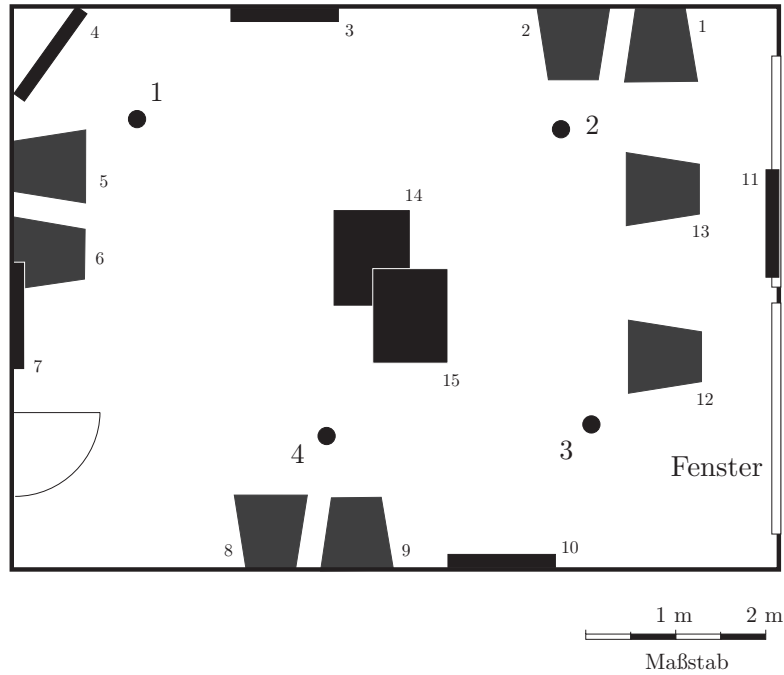
Der Datensatz des Laserscanners besteht aus vier Punktwolken, die, aufgenommen auf den Sensorstandpunkten, wesentlich mehr Informationen enthalten, als für diese Transformation benötigt werden. Aus diesem Grund wurden aus den Punktwolken unter Zuhilfenahme der kommerziellen Software *RealWorks Survey 4.1* der Firma MENSI die Messpunkte aller Ebenen extrahiert. Nach einer Ausdünnung der Punktmenge wurden die Punkte ebenenweise einer separaten Ebenenausgleichung nach Kapitel 3.3.3 zugeführt. Durch diese Verarbeitung ist für den Transformationsprozess gewährleistet, dass die, mit einem eindeutigen Identifikator versehenen, identischen Ebenen vorliegen.

#### Datensatz 1

Bei der Auswertung des ersten Datensatzes wurden alle gemessenen Ebenen in die Auswertung einbezogen. Die Datumsverfügung für diese Transformation wurde erreicht, indem alle Instrumentenstandpunkte auf den Instrumentenstandpunkt 1 bezogen wurden, d. h. alle beobachteten Ebenen des Standpunktes 1 wurden als globale Ebenen zur Datumsfestlegung benutzt.

Die Redundanz des Ausgleichsproblems beträgt  $f = 231$  und die Beurteilung der normierten Verbesserungen (NV) schließt grobe Fehler im Datenmaterial aus, da bei dieser Transformation der max. NV-Wert bei 2,3 und somit unterhalb der kritischen Grenze zur Anzeige eines groben Fehlers liegt. Die Bestimmung der Translationsparameter gelingt mit einer Genauigkeit zwischen 0,7 und 1,9 mm. Bei Betrachtung der Ergebnisse

<sup>8</sup>Weitere Ausführungen zur Größe und Anbringung der Platten siehe Kapitel 5.5.



**Abb. 4.9:** Darstellung der Instrumentenstandpunkte und Ebenen zur Transformation mittels identischer Ebenen [Rietdorf u. a., 2004].

der Parameterschätzung fällt auf, dass die Bestimmung der Höhenkomponente der Translationsparameter etwas schlechter ausfällt als für die Lagekomponenten. Dieser Umstand ist sicherlich in der etwas ungünstigen Konfiguration zur Bestimmung der Höhenkomponente zu suchen, da die Ebenen an der Decke und am Boden nur eine Ausdehnung von ca.  $1 \text{ m}^2$  haben und die Ebenenparameter aus Punkten unter schleifendem Auftreffwinkel abgeleitet wurden.

Hauptausgleichung – Rotationsparameter (Datensatz 1)								
Stpkt.-Nr.	$q_0$	$s_{q_0}$	$q_x$	$s_{q_x}$	$q_y$	$s_{q_y}$	$q_z$	$s_{q_z}$
1	1,000000	0,0000	0,000001	0,0003	-0,000003	0,0003	0,000021	0,0002
2	0,583957	0,0002	0,000078	0,0002	-0,000519	0,0003	-0,811784	0,0001
3	0,521045	0,0002	0,000058	0,0003	-0,000149	0,0002	0,853529	0,0001
4	0,395830	0,0002	-0,000121	0,0003	0,000916	0,0003	0,918323	0,0001

**Tabelle 4.1:** Ergebnisse der Transformation mit identischen Ebenen – ausgeglichene Rotationsparameter des Datensatzes 1.

Hauptausgleichung – Translationsparameter (Datensatz 1)							
Stpkt.-Nr.	$t_x$	$s_{t_x}$	$t_y$	$s_{t_y}$	$t_z$	$s_{t_z}$	Betrag
	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[m]
1	0,0000	0,8	0,0000	0,8	0,0000	0,7	-
2	0,4366	1,5	4,0829	0,9	-0,0979	1,7	4,1073
3	-2,3170	1,6	4,7357	1,3	0,5422	1,9	5,2999
4	-2,7227	1,0	1,9363	1,3	-0,0890	1,4	3,3422

**Tabelle 4.2:** Ergebnisse der Transformation mit identischen Ebenen – ausgeglichene Translationsparameter des Datensatzes 1.

## Datensatz 2

Im Gegensatz zum Datensatz 1 wurde in Datensatz 2 eine für praktische Messungen realitätsnähere Aufnahmesituation simuliert. Durch Ausdünnung der Anzahl der beobachteten Ebenen pro Standpunkt wurde eine Aufnahme im Sinne einer Verkettung von unterschiedlichen Standpunkten simuliert, vgl. Abbildung 4.8, die aufgrund von Abschattungen und Hinterschneidungen mit einer geringen Anzahl von Verknüpfungsebenen auskommen muss. In Tabelle 4.3 sind die beobachteten Ebenen standpunktweise aufgeführt, dabei beziehen sich die Bezeichnungen der beobachteten Ebenen auf Abbildung 4.9. Die Datumsfestlegung bei dieser Auswertung wurde über drei im übergeordneten Koordinatensystem bekannte Ebenen definiert. Die datumsgebenden Ebenen 3, 7, 14 stehen dabei annähernd rechtwinklig zueinander.

Anzahl Ebenen pro Standpunkt (Datensatz 2)		
Stpkt.-Nr.	Anzahl Ebenen	Nr. der beobachteten Ebenen
1	8	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 14
2	7	1, 2, 11, 12, 13, 14, 15
3	6	9, 10, 11, 12, 13, 15
4	5	7, 8, 9, 10, 12

**Tabelle 4.3:** Anzahl der Ebenen je Standpunkt im simulierten Datensatz 2.

In Tabelle 4.4 sind die Ergebnisse der Parameterschätzung aus den Ausgleichungen der Datensätze 1 und 2 gegenübergestellt. Zusätzlich sind in der letzten Spalte der Tabelle die Differenzen zwischen den beiden unterschiedlichen Parameterschätzungen für den globalen Abstandsparameter  $d_{glo}$  aufgeführt.

Schätzwerte des Ebenenparameters $d_{glo}$ und $s_{d_{glo}}$					
Ebenen Nr.	Datensatz 1		Datensatz 2		Differenz $d_{glo1}/d_{glo2}$ [mm]
	$d_{glo1}$ [m]	$s_{d_{glo}}$ [mm]	$d_{glo2}$ [m]	$s_{d_{glo}}$ [mm]	
1	-1,265	0,8	-1,258	2,6	-7
2	-1,562	0,8	-1,560	0,6	-2
3	-1,396	0,8	-1,396	0,4	0
4	-1,225	0,8	-1,225	0,6	0
5	-1,377	0,9	-1,378	0,6	1
6	-1,845	0,8	-1,845	0,6	0
7	-1,782	0,8	-1,781	0,4	-1
8	-4,355	0,8	-4,355	0,6	0
9	-4,169	0,8	-4,166	3,2	-3
10	-5,267	0,8	-5,270	2,4	3
11	-7,547	0,8	-7,544	4,0	-3
12	-3,374	0,8	-3,375	2,1	1
13	-3,688	0,8	-3,680	2,5	-8
14	-1,541	0,8	-1,542	0,4	1
15	-0,973	0,8	-0,964	1,8	-9

**Tabelle 4.4:** Vergleich des Ebenenparameters  $d_{glo}$  zwischen den Parameterschätzungen der Datensätze 1 (Ideale Konfiguration) und 2 (Simulation).

Die höheren Differenzen im Vergleich zum Datensatz 1 für den Ebenenparameter  $d_{glo}$  an den Ebenen 1, 13 und 15 sind darauf zurückzuführen, dass diese Ebenen nur von einem Standpunkt aus aufgenommen wurden, d. h. diese Ebenen tragen zur Schätzung der Transformationsparameter als polar angehangene Ebenen nicht bei. Des Weiteren ist, wie zu erwarten, eine Abhängigkeit von der Datumsfestlegung durch die datumsgebenden Ebenen 3, 7 und 14 erkennbar. Die Ebenen, die am weitesten von den datumsgebenden Ebenen entfernt sind, weisen neben den Ebenen, die nur einmal angemessen wurden, die größte Differenz zur idealen Konfiguration auf, wobei als ideale Konfiguration zu Vergleichszwecken die Bestimmung des Abstandsparameters  $d_{glo}$  aus Datensatz 1 angesetzt wurde. Gleiches gilt für die Standardabweichung des Abstandsparameters  $s_{d_{glo}}$ . Auch hier ist für die

Genauigkeit die Entfernung zu den Datumsebenen ausschlaggebend. Ebenfalls liegt die Standardabweichung der polar angehangenen Ebenen um den Faktor zwei höher, als bei den Ebenen, die an der Transformation beteiligt sind.

### 4.3.6 Vergleich mit anderen Transformationsverfahren

Als Vergleich zur Transformation mit identischen Ebenen wurde eine tachymetrische Netzmessung und anschließende Netzausgleichung durchgeführt, vgl. auch Abbildung 4.10. Die Netzmessung selber erfolgte auf den vier Instrumentenstandpunkten und wurde realisiert mit einem Präzisionstachymeter LEICA TCA 2003 sowie einer zusätzlichen Streckenmessung mit einer kalibrierten 2 m – Basislatte zur hochgenauen Streckenmessung im Nahbereich. Die Netzausgleichung [Neptan/GPS, 2002] des Tachymeternetzes liefert Koordinaten in einem lokalen, frei ausgeglichenen Netz mit einem mittleren Punktfehler von 0,1 mm.

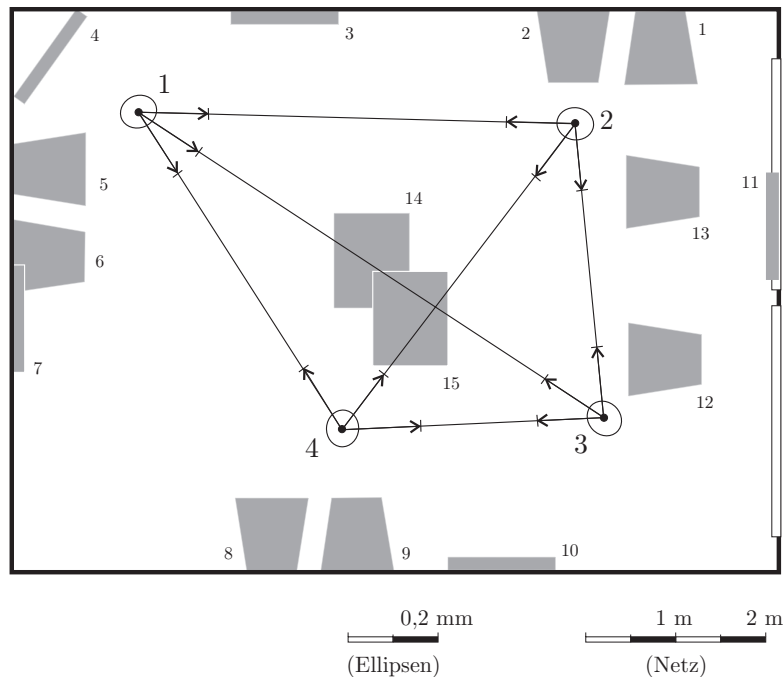


Abb. 4.10: Netzaufbau der tachymetrischen Vergleichsmessung.

Durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (3D-HELMERT-Transformation) auf Grundlage der in Tabelle 4.2 und Tabelle 4.5 dargestellten Komponenten der Translationsvektoren lassen sich die Restklaffen an den Instrumentenstandpunkten zwischen den transformierten Systemen berechnen. Dabei wird das Tachymeternetz als Referenz betrachtet, da es mit übergeordneter Genauigkeit, ca. um den Faktor zehn besser, bestimmt wurde. Der Unterschied in den Beträgen der Translationsvektoren ist auf die unterschiedlichen Instrumentenbezugs- punkte für die Höhenkomponente zurückzuführen.

Koordinaten Instrumentenstandpunkte (alternative Transformationen)				
Netzausgleichung Tachymeternetz:				
Stpkt.-Nr.	$x$ [m]	$y$ [m]	$z$ [m]	Betrag [m]
1	100,0003	100,0007	100,0027	-
2	100,0004	104,1077	99,9973	4,1070
3	102,8115	104,4632	100,0116	5,2742
4	102,9125	101,6373	100,0094	3,3406

Tabelle 4.5: Koordinaten (Linkssystem) aus alternativen Transformationen: Tachymeternetz (LEICA TCA 2003 + Basislattenmessung).



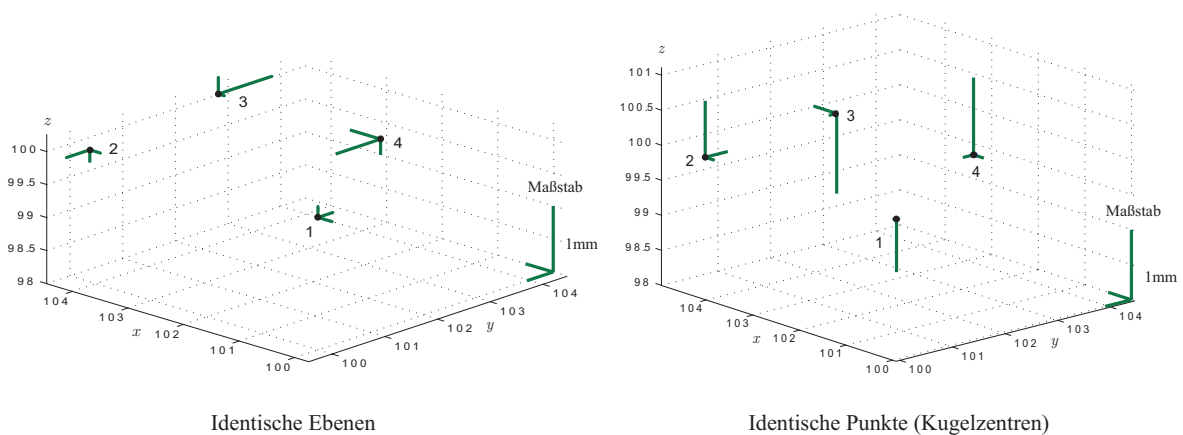
Die Originaldaten, die zur Auswertung für die obigen Ergebnisse nach dem Ansatz der Transformation mittels identischer Ebenen herangezogen wurden, enthielten auch in den Szenen platzierte Kugeln mit einem Durchmesser von 15,1 cm. Als Beispiel dient die in Abbildung 4.4 dargestellte Holzkugel, die durch eine mechanische Vorrichtung in einer Zwangszentrierung befestigt werden kann. Durch Modellierung der Mittelpunktkoordinaten der Kugeln in der kommerziellen Software *Cyclone 4.1* [Cyra, 2003] und Nutzung dieser Informationen zur Registrierung der Standpunkte, ist ein Vergleich der unterschiedlichen Transformationsansätze möglich. Dabei wurden die Kugeln aus Punktwolken modelliert, die mit der höchsten Auflösung des Scanners erfasst wurden. Bei der als *Super High* bezeichneten Auflösung, vgl. auch Kapitel 5.7, ergibt sich in 10 Metern Entfernung ein Punktabstand zwischen benachbarten Punkten am Objekt von ca. 3 mm. Bei den hier in diesem Beispiel vorliegenden Zielweiten hat diese Auflösung zur Folge, dass die Kugeln abhängig von der Entfernung Sensor - Zielkugel aus ca. 2300 bis maximal ca. 15500 diskreten Messpunkten modelliert wurden. Die Bestimmung der Kugelzentrumkoordinaten aus diesen Messpunkten gelang dabei im Schnitt mit einer Genauigkeit von ca. 2 mm bei maximalen Abweichungen einzelner Messpunkte von der Kugeloberfläche zwischen 1 cm und ca. 5 cm.

Koordinaten Instrumentenstandpunkte (alternative Transformationen)				
Transformation mit <i>Cyclone 4.1</i> :				
Stpkt.-Nr.	$x$ [m]	$y$ [m]	$z$ [m]	Betrag [m]
1	0,000	0,000	0,000	-
2	4,080	0,438	-0,094	4,1045
3	4,731	-2,318	0,547	5,2967
4	1,936	-2,719	-0,095	3,3392

**Tabelle 4.6:** Koordinaten aus alternativen Transformationen: Transformation mit identischen Punkten (abgeleitete Kugelmittelpunkte) mittels 'Cyclone 4.1' (Rechtssystem).

Als ein Defizit der Auswertesoftware *Cyclone 4.1* stellen sich die nach fehlertheoretischen Gesichtspunkten fehlenden Aussagen zu Genauigkeiten und zur Zuverlässigkeit der Transformationsparameter dar. Es erfolgt in den Protokollen nur die Ausgabe eines Fehlervektors, der die Restklaffen an den zur Transformation herangezogenen identischen Punkten angibt. Genauigkeitsangaben zu den Transformationsparametern und somit die Möglichkeit einer Interpretation der Transformation fehlen hingegen. Analog zum oben beschriebenen Vorgehen ist jedoch auch hier ein Vergleich der Restklaffen nach erfolgter räumlicher Ähnlichkeitstransformation mit dem übergeordneten Tachymeternetz möglich.

#### Restklaffen an transformierten Punkten



**Abb. 4.11:** Darstellung der Restklaffen nach erfolgter Transformation in das als Referenz angenommene Tachymeternetz an den vier Instrumentenstandpunkten der unterschiedlichen Transformationsansätze: Standpunktverknüpfung mit identischen Ebenen (links) und unter Nutzung von identischen Punkten, die als Kugelmittelpunkte aus einer Vielzahl von Objektpunkten abgeleitet wurden (rechts).

Die in Abbildung 4.11 auf der rechten Seite dargestellten Restklaffen haben einen maximalen Wert von 2 mm, wobei die Höhenkomponente bei der Transformation mit identischen Punkten (Kugelzentren) etwas größer ausfällt als bei der Nutzung von identischen Ebenen zur Registrierung. Dieser Fakt ist in der ungünstigeren räumlichen Verteilung der Passkugeln gegenüber den Passebenen begründet, da sich in diesem Beispiel alle Passkugeln aufgrund der baulichen Gegebenheiten auf einem ähnlichen Höhenniveau befunden haben.

#### 4.4 Diskussion

Die Standpunktverknüpfung mit dem vorgestellten Ansatz der identischen Ebenen liefert numerisch vergleichbare Ergebnisse wie die alternativen Transformationsergebnisse über identische Punkte. Die erzielbaren Genauigkeiten liegen bei Betrachtung der Restklaffen in der gleichen Größenordnung. Über die vorgeschalteten Module der Näherungswertberechnung konnte gezeigt werden, dass schon im Vorfeld der Hauptausgleichung eine Detektion und Eliminierung grober Beobachtungsfehler möglich ist und die Transformation dabei verkettet in einem Schritt erfolgt.

Durch die Erkennung der groben Fehler lassen sich im Auswerteprozess auch die in der Vorverarbeitung eventuell nicht korrekt zugeordneten Identitäten der Ebenen wieder auflösen. Die Parameter der entsprechenden Ebenen werden im anschließenden Ausgleichungsprozess neu bestimmt. Somit ist es z. B. möglich, bei einer Gebäudeinnenaufnahme mit scannenden Messverfahren einen äußeren Referenzrahmen in Form von mindestens drei in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmten Ebenen zu definieren, die sich in einer Gebäudecke befinden. Durch die verkettete Transformation können anschließend alle Ebenen sowie auch Flächen höherer Ordnung in diesen vorgegebenen Referenzrahmen eingepasst werden.

Der vorgestellte Ansatz der verketteten Standpunkttransformation mittels identischer Ebenen lässt sich durch eine Erweiterung des funktionalen Modells um instrumentenabhängige Parameter zum Aufbau einer Kalibrierstrategie nutzen. Das allgemeine Prinzip der Zerlegung der Transformation in eine Folge von Rotationen und Translationen lässt sich dabei prinzipiell für jedes Instrument anwenden. Die parametrische Erweiterung des Ansatzes und die daraus resultierende Modellierung der Instrumentfehler in einem Ausgleichungsmodell für Sensoren, die nach dem tachymetrischen Messprinzip arbeiten, sind integraler Bestandteil des folgenden Kapitels.

## 5 Kalibrierstrategie

Das Anwendungsgebiet von polaren, scannenden Messverfahren ist breit gefächert und berührt die verschiedensten Sektoren in der Industrie, Medizin und Forschung. Als einige repräsentative Beispiele dienen die as-built Dokumentationen<sup>1</sup> von Maschinen- und Anlagenteilen, Stadtplanungen und 3D-Stadtmodelle, Anwendungen in der Bauaufnahme und Facility-Management-Geometriedatenerfassung, Überwachung (monitoring) des Bewegungsverhaltens einzelner Objekte oder von Objektteilen sowie die Dokumentationen historischer Bausubstanz.

Die Qualität der abgeleiteten Produkte aus den dreidimensionalen Messungen, wie 3D-Modelle, Parameter von extrahierten Flächen oder Flächenteilen, aber auch von sehr kleinen bis hin zu großräumigen Objekten oder Objektteilen ist entscheidend von der Genauigkeit und Präzision der verwendeten Instrumente abhängig. Eventuell vorhandene Instrumentenfehler gehen direkt als systematische Abweichungen in die Bestimmung aller abgeleiteten Informationen (meist 3D-Koordinaten  $(x, y, z)_i$  der Punkte  $P_i$  der Punktwolke) ein [Ivarone und Martin, 2003].

Aus diesem Grund ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass der Nutzer der scannenden Messverfahren über die möglichen auftretenden Instrumentenfehler informiert ist und Aussagen über die Größenordnung der Instrumentenfehler der verwendeten Messgeräte treffen kann. Zu diesem Zweck sind in einem Kalibrierungsprozess mit geeigneten Untersuchungsmethoden die Instrumentenfehler zu bestimmen und auf die originären Messwerte im Zuge der Auswertung als Korrekturen anzubringen. Ein weiterer Gedanke bei der Beurteilung der entsprechenden Kalibrierverfahren ist der zeitliche Aspekt der Geräteuntersuchungen. Aufgrund von Veränderungen der optischen und mechanischen Bauteile durch Alterung und Verschleiß sind die Kalibrierparameter nicht langzeitstabil. Aus diesem Grund sind entsprechende Folgeuntersuchungen durchzuführen und die Bestimmung der Instrumentenfehler ist in regelmäßigen Zeitabständen zu wiederholen [Schwarz, 2001].

### 5.1 Ansätze zur Bestimmung von Genauigkeiten und Instrumentenfehlern

In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur Bestimmung von Genauigkeiten und zur Kalibrierung von scannenden Messverfahren sowie der jeweils verwendeten Instrumenten diskutiert worden. [Riegl u. a., 2003] vertreten die Auffassung, dass der Lasersensor selbst durch den Benutzer nicht zu kalibrieren sei, da der Sensor alle geometrischen Informationen *genau* misst, und der Hersteller bereits alle Korrekturen im Zuge der Messung intern an die Messwerte angebracht hat. Da dieses „Black-Box“ Denken [Staiger, 2001] jedoch nicht der geodätischen Sichtweise entspricht bzw. nicht entsprechen sollte, wurden verschiedene Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Genauigkeiten der einzelnen Streckenmessung (range precision) und zur Bestimmung der 3D-Objektpunktgenauigkeit (in-plane precision) entwickelt. Des Weiteren werden zum jetzigen Zeitpunkt verschiedene Kalibriermethoden für scannende Messverfahren, speziell für Laserscanner, entwickelt und diskutiert.

#### 5.1.1 Abhängigkeit vom Auftreffwinkel und Oberflächenbeschaffenheit

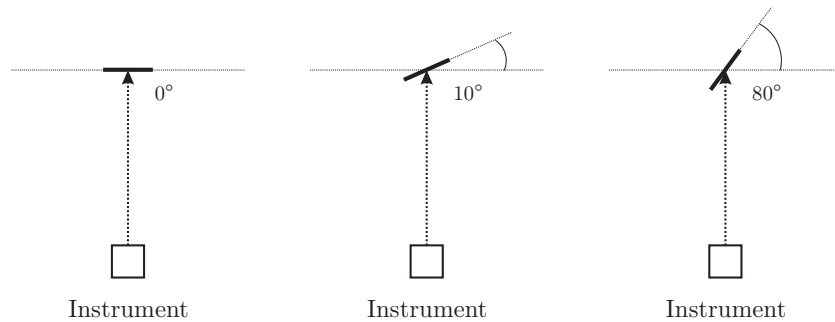
Bei der signalisierungsfreien Distanzmessung auf natürliche oder künstliche Objekte bzw. Oberflächen ohne Reflektoren oder retroreflektierende Zielzeichen sind neben der Entfernung vor allem der Auftreffwinkel und die Oberflächenbeschaffenheit am Objekt für die Güte der Distanzmessung verantwortlich, da diese Parameter direkt die Intensität des zurückgestreuten Messsignals beeinflussen [Schulz und Ingensand, 2004a]. Dabei ist die Intensität oder Beleuchtungsstärke indirekt proportional zum Quadrat der Entfernung [Lindner, 1993].

Die Abhängigkeit der Genauigkeit der Streckenmessung eines Laserscanners von der Oberflächenfarbe und Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Materialien sowie vom Entfernungsbereich des Instrumentes zum Objekt ist u. a. in [Cheok u. a., 2002] beschrieben, wobei dort keine expliziten Aussagen zum untersuchten Sensortyp gemacht werden. Aufgrund der Divergenz des Laserstrahls nimmt die Spotgröße des Lasers mit zunehmender Entfernung zum Objekt stark zu. Da weiterhin auch eine Abhängigkeit der Streckenmessgenauigkeit vom Auftreffwinkel des Laserstrahls auf die Objektoberfläche festzustellen ist, überlagern sich beide Effekte und

---

<sup>1</sup>As-built Erfassung: 3D-Erfassung und Dokumentation von (vorwiegend) Industrieanlagen, in dem Zustand, wie sie erbaut wurden. Die as-built Dokumentation gewinnt zunehmend an Interesse, z. B. bei der Neuplanung von Rohrleitungen in einem Altbestand. Dabei kann es zu Kollisionen des vorhandenen Bestandes mit den geplanten Anlagenteilen kommen, die es gilt, im Vorfeld der Baumaßnahme auszuschließen.

führen zu einer Verschlechterung der Streckenmessgenauigkeit mit zunehmender Entfernung und mit zunehmendem Auftreffwinkel auf der Oberfläche des Messobjektes gegenüber den Referenzstrecken, die mit einem Interferometer gemessen wurden.



**Abb. 5.1:** Versuchsaufbau Streckenmessgenauigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Auftreffwinkel.

Aus den oben getroffenen Schlussfolgerungen können Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Materialien auf die Distanzmessung und Genauigkeitsuntersuchungen bei Messungen auf unterschiedliche Oberflächen mit unterschiedlichen Auftreffwinkeln des Laserstrahls für den Prototypen POMES abgeleitet werden, vgl. Abbildung 5.1.

Untersuchte Oberflächenmaterialien				
Material	Oberfläche	Struktur	Größe	Anwendungen
1	Raufasertapete (weiß)	sehr grob	20 × 20 cm	Wände
2	Spanplatte unbeschichtet	leicht rau	20 × 20 cm	Tische
3	Kork (dunkel)	rau	20 × 17 cm	Wände, Verkleidung
4	Presspappe	rau	20 × 20 cm	Pinwand
5	Presspappe	glatt	20 × 20 cm	Türen
6	Keramik (weiß)	sehr glatt	20 × 20 cm	Wände, Boden
7	Spanplatte	glatt	20 × 20 cm	Kücheneinrichtung
8	Pressspanplatte (grau)	strukturiert	10 × 20 cm	Arbeitsplatten
9	Pressspanplatte (Eiche)	strukturiert	20 × 20 cm	Schränke
10	Holz	sehr glatt	10 × 14 cm	Mobiliar
11	Metall (silbergrau)	glatt	40 × 20 cm	Herde
12	Papier (weiß)	glatt	40 × 20 cm	Poster, Bilder

**Tabelle 5.1:** Untersuchte Oberflächenmaterialien von Objekten im Wohn- und Arbeitsumfeld, nach [Richter, 2004].

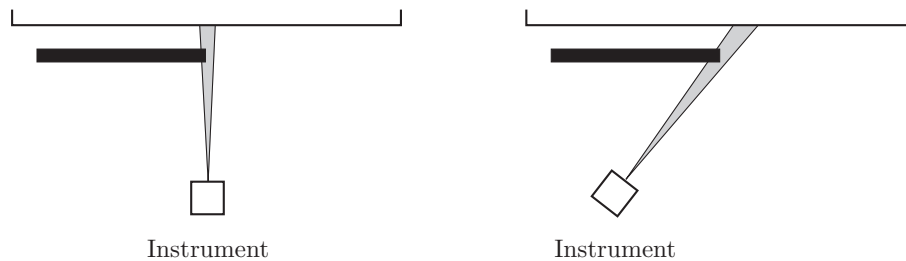
Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die Streckenmessung wurden verschiedene Materialien getestet, die vorzugsweise im menschlichen Wohn- und Arbeitsumfeld auftreten, vgl. Tabelle 5.1. Die Bestimmung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit (Struktur, Material) erfolgte indirekt über die Ableitung der Nullpunktkorrektur<sup>2</sup>  $k_0$  und der ermittelten Standardabweichung mit fünf Instrumentenaufstellungen auf zwangszentrierten Stativen mit einer Gesamtdistanz von ca. 60 m. Durch eine Ausgleichung im GAUSS-MARKOV-Modell ist eine Schätzung der Nullpunktkorrektur für die jeweils zu untersuchenden Oberflächenmaterialien möglich. Bei der Auswertung der unterschiedlichen Messreihen kann im Falle des Prototypen POMES aufgrund der hohen Streckenmessgenauigkeit von unter 1 mm im Entfernungsbereich bis 100 m keine Abhängigkeit der Nullpunktkorrektur vom verwendeten reflektiven Medium festgestellt werden. Im Mittel ergibt sich eine konstruktionsbedingt große Nullpunktkorrektur von  $k_0 = 71,3$  mm mit einer Standardabweichung von  $s_{K_0} = 0,3$  mm. Daraus ergibt sich für die in obiger Tabelle aufgeführten Materialien kein signifikanter Einfluss auf die Distanzmessung. Ähnliche Untersuchungen werden in [Kogoj, 2001] und [Kern, 2003] durchgeführt. Dort wird bei Objektoberflächen mit extrem rauher Oberfläche (Teppich und Styropor) eine deutliche

<sup>2</sup>Unter Nullpunktkorrektur  $k_0$  wird der anzubringende systematische Anteil an der durch den Lasersensor gemessenen Distanz verstanden, der sich aus der Kombination Entfernungsmessteil – Reflexionsmedium ergibt., vgl. auch Seite 73.

Zunahme von Messabweichungen bei der reflektorlosen Distanzmessung festgestellt, da der Messstrahl teilweise in die Objektoberfläche eindringt und so die Distanzmessung verfälscht.

Im Gegensatz zu diesen Untersuchungen ist jedoch eine Abhängigkeit der Streckenmessgenauigkeit vom Auftreffwinkel des Lasermessstrahls zu beobachten. Bei den verwendeten Oberflächenmaterialien aus Tabelle 5.1 ist wiederum im Falle des POMES eine signifikante Verschlechterung der Streckenmessgenauigkeit bei einem Auftreffwinkel des Laserstrahls größer 60 gon zu beobachten. Diese Aussage wird durch [Runne, 1993] bestätigt, der für derartige Untersuchungen ebenfalls einen Wert für die maximale Horizontaldrehung der Zielfläche ohne Beeinträchtigung der Messwerte von ca. 65 gon angibt. Bei einigen Materialien (Metall, Keramik) ist hingegen eine Messung von Distanzen mit einem größeren Auftreffwinkel als 60 gon aufgrund der starken *Spiegeleffekte* nicht möglich. Als Konsequenz aus diesen Untersuchungen muss festgestellt werden, dass schleifende Schnitte im Auftreffwinkel des Lasermessstrahls bei der Messung mit diesen Instrumenten bei einer hohen Genauigkeitsanforderung wenn möglich vermieden werden sollten, der Einfluss unterschiedlicher Materialien hingegen vernachlässigbar klein ist.

Des Weiteren ist in einem praktischen Einsatz auf eine ungestörte Sichtfreiheit des Messstrahlbündels zu achten. [Brýs und Ćmielewski, 2004] weisen nach, dass der Einfluss einer Teilverdeckung des Messstrahlbündels zu einer Genauigkeitseinbuße bei der Distanzmessung führt. Dieser Effekt tritt besonders stark an Ecken und Kanten auf und ist schwer einzugrenzen, d. h. eine Zuordnung der Distanzmessung zur korrekten Entfernung zwischen Sensor und betreffendem Objektteil ist in diesen Fällen nicht oder nur schwer möglich, vgl. Abbildung 5.2. Der Effekt der ungenauen Streckenmessung wird umso größer, je schleifender der Auftreffwinkel des Lasermessstrahles auf dem im Vordergrund platzierten Objekt oder Objektteil ist.



**Abb. 5.2:** Teilverdeckung des Messstrahlbündels bei der Distanzmessung an zwei hintereinander liegenden Objektteilen – kritisch ist zu entscheiden, an welchem Objektteil die Streckenmessung erfolgte.

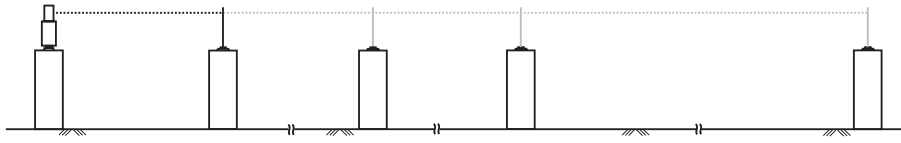
### 5.1.2 Vergleich mit Referenzstrecken

Ein in der Geodäsie, speziell im Bereich der Ingenieurvermessung übliches Verfahren zur Überprüfung von Messgeräten ist der Vergleich von Messgrößen des zu untersuchenden Instrumentes mit den Messgrößen eines unabhängigen und mit übergeordneter Genauigkeit bekannten Messverfahrens. Durch den Vergleich der Messgrößen bzw. durch Gegenüberstellung der aus den Messgrößen abgeleiteten Vergleichsmerkmale sind Aussagen zur Genauigkeit und bei entsprechenden Messkonfigurationen und Auswertemodellen auch die Ableitung von Korrektur- und Kalibrierparametern möglich. [Ivarone und Martin, 2003] fordern in diesem Zusammenhang ein geeignetes Testfeld mit hochpräzise bestimmten, gut verteilten und sicher identifizierbaren Kontrollpunkten, welches eine Bestimmung der Instrumentenfehler gewährleistet.

[Staiger und Ettl, 2003] vergleichen die mit einem Laserscanner gewonnenen Strecken bei Messungen auf Holzkugeln mit Referenzstrecken, die mit einem kalibrierten Tachymeter gemessen wurden und leiten aus den Streckendifferenzen Genauigkeitsaussagen für den untersuchten Sensor *Imager 5003* der Firma ZOLLER+FRÖHLICH ab. [Santala und Joala, 2003] vergleichen ebenfalls die Ergebnisse aus einer Aufnahme, die mit dem *Cyrix 2500* Scanner der Firma CYRA entstanden sind, mit einer Referenzmessung eines Theodolitmesssystems (bestehend aus 2 Wild T2000) auf 9 Zielzeichen und leiten neben 3D-Genauigkeitsmaßen für diskrete Punkte noch einen Maßstab auf Grundlage einer 7-Parameter HELMERT-Transformation zwischen beiden Systemen ab. Ähnliche Untersuchungen wurden für den *Cyrix 2500* Scanner durchgeführt, indem wiederum bekannte Punkte, ausgebildet als Zielmarken [Staiger, 2002], [Gordon u. a., 2001] und/oder als natürliche Punkte [Balzani u. a., 2001], mit diesem Laserscanner angemessen wurden. Eine Aussage zu Genauigkeiten des Sensors wurde im Nachhinein aus den Differenzen zu den bekannten Koordinaten ermittelt. In [Lichti u. a., 2000] wird über den Vergleich der Messungen eines I-SITE<sup>3</sup> – Laserscanners mit bekannten Strecken einer EDM-Vergleichsstrecke

<sup>3</sup>Das System der Firma I-SITE basierte im Jahre 2000 auf einem RIEGL LMS – Z210 Sensor, vgl. Seite 51.

berichtet, vgl. Abbildung 5.3. [Johansson, 2002] führt derartige Untersuchungen zur Ableitung der Streckenmessgenauigkeit für drei verschiedene Laserscanner aus.



**Abb. 5.3:** Aufbau und Messungen auf einer EDM-Vergleichsstrecke (ohne Maßstabsangabe).

Alle vorgestellten Ansätze treffen nur Aussagen über die Genauigkeiten der untersuchten Messgeräte, indem unterschiedlich definierte Zielzeichen (direkte Bestimmung des Zentrums der Zielmarke möglich) oder Zielkörper (Kugeln, Tafeln) angemessen werden. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den Ergebnissen aus einem Messverfahren höherer Genauigkeit bzw. den Messwerten eines kalibrierten Referenzgerätes, beispielsweise eines Präzisionstachymeters. Alle erwähnten Literaturstellen bestimmen jedoch außer der Additionskonstanten keine weiteren Instrumentenfehler, sondern zeigen nur den Einfluss der Instrumentenfehler auf die Messungen unter praktischen Bedingungen [Boehler u. a., 2003].

[Ingensand u. a., 2003] bestimmen für den *Imager 5003* der Firma ZOLLER+FRÖHLICH neben Untersuchungen zur Genauigkeit der Streckenmessung einen Parametersatz von Instrumentenfehlern, bestehend aus Kippachsfehler und Exzentrizität der Zielachse. Auf die Bestimmung eines Taumelfehlers, der seine Ursache in einer Bewegung der momentane Drehachse gegenüber der idealen Drehachse (Stehachse) hat, wird in [Schulz und Ingensand, 2004a] eingegangen. Dabei beschränken sich beide Literaturstellen auf eine Komponentenkalibrierung, d. h. bei diesem Kalibrierverfahren erfolgt eine einzelne und getrennte Bestimmung der Instrumentenfehler des untersuchten Messgerätes.

## 5.2 Kalibrierung im Testfeld

Unter Nutzung der in Kapitel 3 beschriebenen automatischen Verfahren zur Extraktion von Ebenen als Vorstufe der Bearbeitung von Punktwolken und der verketteten dreidimensionalen Ebenentransformation aus Kapitel 4.3, ist es nunmehr möglich, einen Algorithmus zur Kalibrierung von polar messenden (geodätischen) Instrumenten auf Basis von identischen Ebenen und Verzicht auf Markierungen durch identische Punkte zu entwickeln. Als Vorteil wird bei diesem Ansatz der Kalibrierung die hohe Punktdichte eines Laserscanners ausgenutzt. Bei den verfahren mit identischen Punkten kann dies ohne großen Aufwand nicht gewährleistet werden. Die Bestimmung der relevanten Kalibrierparameter erfolgt in einem Ausgleichungsprozess, gleichzeitig werden Genauigkeitsangaben für die einzelnen Richtungs- und Streckenbeobachtungen abgeleitet.

### 5.2.1 Allgemeines Fehlermodell

Die bereits oben angesprochenen, als systematische Abweichungen einzuschätzenden Instrumentenfehler entstehen dadurch, dass abweichend zur gedachten, ideal-geometrischen Konstruktion die Bauteile mathematisch nicht exakt zusammengesetzt werden können oder die Bauteile während des Gebrauchs ihre Soll-Lage verändern [Deumlich und Staiger, 2002]. Aus diesem Grund ist ein geeignet parametrisiertes Modell des entsprechenden Instrumentes aufzustellen, mit dem die auftretenden Instrumentenfehler geeignet beschrieben und modelliert werden können. Dem nachstehenden geometrischen Modell der Kalibrierung liegt die Annahme zugrunde, dass die auftretenden Instrumentenfehler denen einer geodätischen Totalstation entsprechen, wobei für die Winkelfehler das Modell eines Theodoliten herangezogen wird.

Üblicherweise werden die Achsenfehler von Theodoliten und Tachymetern bestimmt, indem diskrete Punkte in zwei Fernrohrlagen angezielt werden. Dabei erfolgt die Ermittlung der Achsenfehler zeitlich voneinander getrennt. Die Bestimmung des Zielachsenfehlers  $c$  muss bei horizontaler Visur durch Anzielung eines Zielpunktes in beiden Fernrohrlagen erfolgen

$$c = \frac{Hz_i^{II} - 200 \text{ gon} - Hz_i^I}{2} \quad (5.1)$$

und kann z. B. für eine Korrektur  $kc$  in der ersten Fernrohrlage

$$kc^I = \frac{c}{\sin V_i} \quad (5.2)$$

genutzt werden. Der Kippachsenfehler  $i$  wird nach Beseitigung des Zielachsenfehlers derart bestimmt, dass ein Zielpunkt, wenn möglich unter steiler Visur, in zwei Fernrohrlagen angezielt wird

$$i = \left( \frac{Hz_i^{II} - 200 \text{ gon} - Hz_i^I}{2} - \frac{c}{\sin V_i} \right) \tan V_i, \quad (5.3)$$

und kann wiederum zur Korrektur  $ki$

$$ki^I = i \cot V_i \quad (5.4)$$

verwendet werden. Die Verarbeitung der Messungen und die Berechnung der Achsenfehler  $c$  und  $i$  erfolgt bei elektronischen Tachymetern meist in der geräteinternen Software oder wird vom Anwender nach oben genannten Formeln berechnet. Bei Polaraufnahmen und der damit verbundenen Messung in einer Fernrohrlage müssen die Instrumentenfehler als Korrektur angebracht werden. Wird mit einem Instrument hingegen in zwei Lagen gemessen, so ist die gemittelte Ablesung der Horizontalrichtung und Zenitdistanz frei vom Einfluss eventueller Kipp- und Zielachsenfehler [Deumlich und Staiger, 2002].

Für hochgenaue Anwendungen in der Ingenieurvermessung, z. B. in der Industrievermessung mit sehr steilen Visuren weist [Stahlberg, 1997] jedoch daraufhin, dass die Mittelung der Zenitwinkelablesung den Einfluss der Achsfehler nicht beseitigt. Desweiteren wird dort nachgewiesen, dass der gemeinsame Einfluss der Achsfehler auf die Horizontal- und Zenitwinkelmessung nicht vernachlässigt werden darf. Um diesem Einfluss über den gesamten Messungsbereich der polaren Instrumente Rechnung zu tragen, werden folgende Formeln zum Einfluss beider Fehlergrößen auf die Winkelmessung herangezogen. Abgeleitet wurden diese Korrekturformeln aus der vektoriellen Betrachtung der beiden Fehlergrößen [Stahlberg, 1997], da die Korrekturen Funktionen des Kippachsenfehlers  $i$  und des Zielachsenfehlers  $c$  sind, sich jedoch gegenseitig beeinflussen. Die Korrektur die Horizontalwinkelmessung lässt sich darstellen zu:

$$Hz_{korr_i} = Hz_i + \Delta Hz_i = Hz_i + \arctan \left( \frac{\cos i \tan c}{\sin V_i} + \frac{\sin i}{\tan V_i} \right). \quad (5.5)$$

Der Vertikalwinkel muss ebenfalls vom Einfluss des Kipp- und Zielachsenfehlers bereinigt werden:

$$V_{korr_i} = \arccos (\cos i \cos c \cos V_i - \sin i \sin c). \quad (5.6)$$

Die oben beschriebene Messungsanordnung der Messung in zwei Fernrohrlagen zur Bestimmung der Achsenfehler ist jedoch für Laserscanner nicht realisierbar, da sich diskrete Punktpositionen des Laserstrahls aus konstruktiven Gründen nicht reproduzieren lassen. Um dennoch aus den originären Messwerten systematische Instrumentenfehler bestimmen und Genauigkeitsaussagen treffen zu können, greift man im Allgemeinen auf Zielkugeln und Zielmarken zurück, deren Zentren wiederum diskrete Punkte repräsentieren. Durch Ableitung der Kugelmittelpunktskoordinaten aus einer Vielzahl von einzelnen Messpunkten werden diese diskreten Punkte erhalten, aus denen durch geeignet parametrisierte Modelle die oben genannten Instrumentenfehler und Genauigkeitsangaben für die einzelnen Komponenten ableitbar sind.

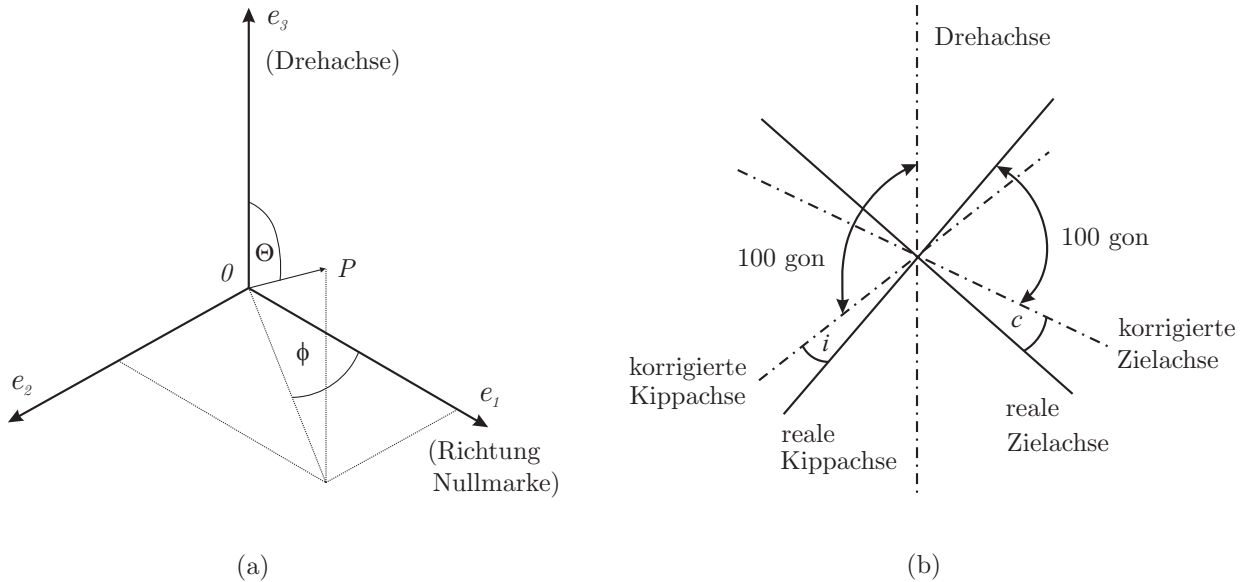
Die beschriebene Lösung kann aber durch das ungünstige Reflektionsverhalten am Rand der Kugeln zu Modellierungsproblemen der Mittelpunktskoordinaten führen, die nur durch ein interaktives Eingreifen in den Modellierungsprozess beseitigt werden können. Dieser Effekt des Überstrahlens an den Ränder einer Kugel oder Zieltafel und somit die Messung nicht zum Zielzeichen gehörender Punkte (Mischpixel) wird in diesem Zusammenhang auch Kometenschweif genannt [Staiger, 2003].

Als weiteres Manko dieses Ansatzes ist zu nennen, dass die hohe Punktdichte des Laserscanners bei der Bestimmung von Kalibrierwerten nicht ausgenutzt wird. Im nachfolgend beschriebenen Verfahren wird daher eine andere Messungsanordnung genutzt. Anstatt identischer Punkte werden identische Ebenen von unterschiedlichen Laserscannerstandpunkten aus angemessen. Aus der großen Menge der Beobachtungswerte lassen sich mit Hilfe einer Ausgleichung Ebenen-, Standpunkt- und Instrumentenparameter schätzen und auf Signifikanz untersuchen.

### Herleitung der Winkelfehler

Bei Messungen mit einem scannenden Messinstrument werden – durch die Schrittmotoren oder durch die entsprechenden Inkremente der Encoder beim Abgriff der Positionen der rotierenden Elemente im Sinne einer „Teilkreisablesung“ – vorgegebenen Kugelkoordinaten die zugehörigen Raumpunkte zugeordnet. Im Gegensatz dazu erfolgt die Zuordnung bei der Messung mit einer Totalstation umgekehrt. Die Definitionen von Horizontal- und Vertikalwinkeln erfolgt bei den scannenden Instrumenten dennoch analog zu den Bezeichnungen eines Theodoliten.

Bei der Winkelmessung werden Kugelkoordinaten  $\phi$  und  $\Theta$  bezüglich einer lokalen Basis bestimmt, die nachstehende Eigenschaften besitzt, vergleiche dazu auch Abbildung 5.4 (a). Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems befindet sich im Schnittpunkt der Achsen, die Hauptrichtung  $\mathbf{e}_3$  des orthonormalen Dreibeins entspricht der Drehachse, die Nebenrichtung  $\mathbf{e}_1$  wird durch die Richtung vom Mittelpunkt des Drehkreises zu seiner Nullmarke festgelegt und die Nebenrichtung  $\mathbf{e}_2$  steht rechtwinklig auf beiden, so dass sich ein Linkssystem ergibt [Stahlberg, 1997].



**Abb. 5.4:** Winkeldefinitionen zur Bestimmung der Kugelkoordinaten  $\phi$  und  $\Theta$  (a) sowie Darstellung Zielachsenfehler  $c$  und Kippachsenfehler  $i$  (b), nach [Stahlberg, 1997].

Aufbauend auf diese Definitionen lassen sich die Achsfehler eines polar messenden Instrumentes folgendermaßen beschreiben. Als Zielachsenfehler  $c$  wird der Winkel zwischen Zielachse und der Normalen zur Kippachse, gemessen in der Ebene aufgespannt durch Kippachse und Zielachse, bezeichnet. Der Kippachsenfehler  $i$  ist dann folgerichtig der Winkel zwischen Kippachse und der Normalen zur Drehachse, gemessen in der durch Drehachse und Kippachse aufgespannten Ebene [Stahlberg, 1997]. Der Höhenindexfehler  $h$  wird als konstanter Offset auf die Ablesungen der Vertikalwinkel (Zenitwinkel) verstanden und im funktionalen Modell entsprechend mitgeschätzt.

Aufgrund der mechanischen Konstruktion des Prototypen POMES müssen zusätzlich zu den oben beschriebenen Achsfehlern noch drei weitere Instrumentenfehler eingeführt werden. Bei diesen drei Parametern handelt es sich um Achsexzentrizitäten zwischen den Hauptachsen des Messsystems, wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Mit der Modellierung dieser zusätzlichen Parameter für die orthogonalen Achsabstände wird die These überprüft, ob sich die drei Geräteachsen in einem gemeinsamen Punkt treffen. Die Instrumentenfehler  $e_{vh}$ ,  $e_{vz}$  und  $e_{hz}$  bezeichnen in gleicher Reihenfolge die orthogonalen Abstände zwischen Steh- und Kippachse, zwischen Steh- und Zielachse und zwischen Kipp- und Zielachse.

Zusammenfassend wird das instrumenteneigene polare Koordinatensystem durch eine vertikale Drehachse (Stehachse), eine horizontale Drehachse (Kippachse) sowie durch den Laserstrahl (Zielachse) realisiert. Die gegenseitige Lage dieser drei Achsen im Raum lässt sich durch 6 Parameter – drei Translationen und drei Rotationen – beschreiben. Die Winkel werden in einer Projektionsebene gemessen, die zu den jeweils betrachteten Achsen parallel ist. Die Translationen sind definiert zu:

- $e_{vh}$  : Orthogonaler Abstand Stehachse - Kippachse
- $e_{vz}$  : Orthogonaler Abstand Stehachse - Zielachse
- $e_{hz}$  : Orthogonaler Abstand Kippachse - Zielachse

und die Rotationen beschreiben folgende Winkel:

- $\alpha_{vh}$  : Winkel zwischen Stehachse und Kippachse
- $\alpha_{vz}$  : Winkel zwischen Stehachse und Zielachse
- $\alpha_{hz}$  : Winkel zwischen Kippachse und Zielachse.



Folgende Beziehungen gelten für die Winkel:

$$\alpha_{vh} + i = 100 \text{ gon} \quad (5.7)$$

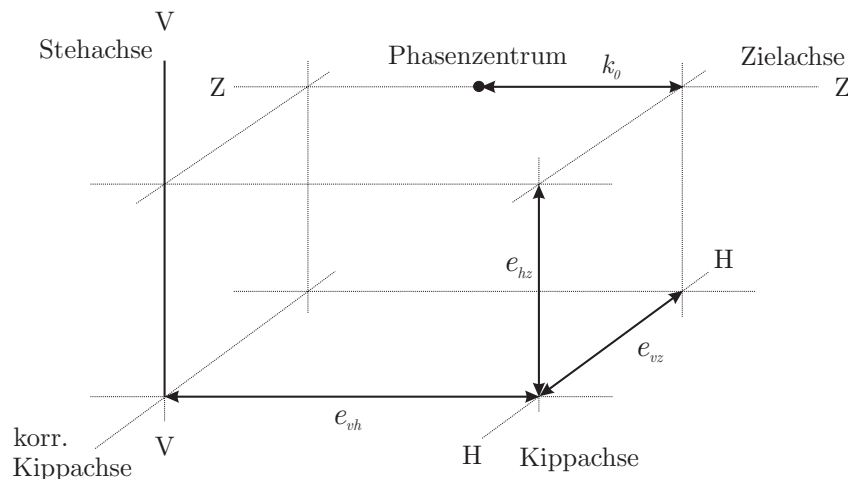
$$\alpha_{vz} = \Theta + h \quad (5.8)$$

$$\alpha_{hz} + c = 100 \text{ gon} \quad (5.9)$$

mit

- $i$  : Kippachsenfehler
- $h$  : Höhenindexfehler
- $\Theta$  : gemessener Zenitwinkel
- $c$  : Zielachsenfehler .

Die Komponenten des Stehachsenfehlers  $\xi$  und  $\eta$ , d. h. die Abweichung der Stehachse des Instrumentes aus der Lotrechten, werden im vorliegenden Modell nicht als instrumentenspezifische Fehler betrachtet, sondern vielmehr als standpunktspezifische Orientierungsparameter. Sie können als rotatorische Transformationsparameter des lokalen Koordinatensystems in das äußere globale Referenzkoordinatensystem interpretiert werden. Sie werden daher für jede Aufstellung separat bestimmt und durch die Einführung von Rotationsquaternionen modelliert. Auf Grundlage dessen ist die Orientierung des zu untersuchenden Instrumentes beliebig wählbar.



**Abb. 5.5:** Nullpunktkorrektur und Achsexzentrizitäten, am Beispiel des POMES.

### Streckenmessfehler

Die Streckenmessfehler können in einen konstanten und in einen streckenproportionalen Anteil zerlegt werden. Bei dem konstanten Anteil handelt es sich um die Nullpunktkorrektur  $k_0$ , unter der in diesem Zusammenhang der anzubringende systematische Anteil an der durch den Lasersensor gemessenen Distanz verstanden wird, der sich aus dem Zusammenspiel Entfernungsmessteil – Reflexionsmedium ergibt. Die Korrektur ist bedingt durch eine starke Abhängigkeit von den Materialeigenschaften der einzelnen Bauteile als eine Distanzmesser-Reflexmedium-Kombination zu bestimmen [Joeckel und Stober, 1999]. Sie ist des Weiteren von den Materialeigenschaften, wie z. B. der Struktur und der Oberflächenrauigkeit des aufzunehmenden Objektes abhängig.

Der lineare Anteil des Streckenmessfehlers wird im folgenden als Maßstabsfehler  $m$  bezeichnet. Die Schrägstrecke  $S$  ist somit gegeben zu:

$$S = k_0 + S_{gem} \cdot m \quad (5.10)$$

mit

- $S$  : Schrägstrecke
- $k_0$  : Nullpunktkorrektur
- $S_{gem}$  : gemessene Schrägstrecke
- $m$  : Maßstab .

Auf die Bestimmung des linearen Anteils am Streckenmessfehler wird im Folgenden nicht explizit eingegangen, da die Möglichkeiten zur differenzierteren Betrachtung mittels Vergleichsmessungen auf einer interferometrischen Messstrecke nicht gegeben sind und somit die Berechnung eines Maßstabsfaktors mittels HELMERT-Transformation nach Gleichung 4.1 nicht sinnvoll erscheint. Auf die Bestimmung eines Maßstabsfehlers wird dennoch kurz eingegangen, da durch eine geeignete Messanordnung mittels Zwangszentrierung auf bekannten Punkten auch dieser Einfluss modelliert werden kann.

### 5.2.2 Modellierung der Instrumentenfehler

Die im vorangegangenen Abschnitt eingeführten Instrumentenfehler müssen in einem nächsten Schritt in einen funktionalen Zusammenhang mit den ursprünglichen Beobachtungen gebracht werden. Aus diesem Grund werden die kartesischen Koordinaten als Funktion der Beobachtungen und der auftretenden Instrumentenfehler formuliert. Die Aufstellung der Gleichungen

$$\mathbf{X}_i = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_i = f(\phi, \Theta, S_{gem}, c, i, h, k_0, m, e_{vh}, e_{vz}, e_{hz}) \quad (5.11)$$

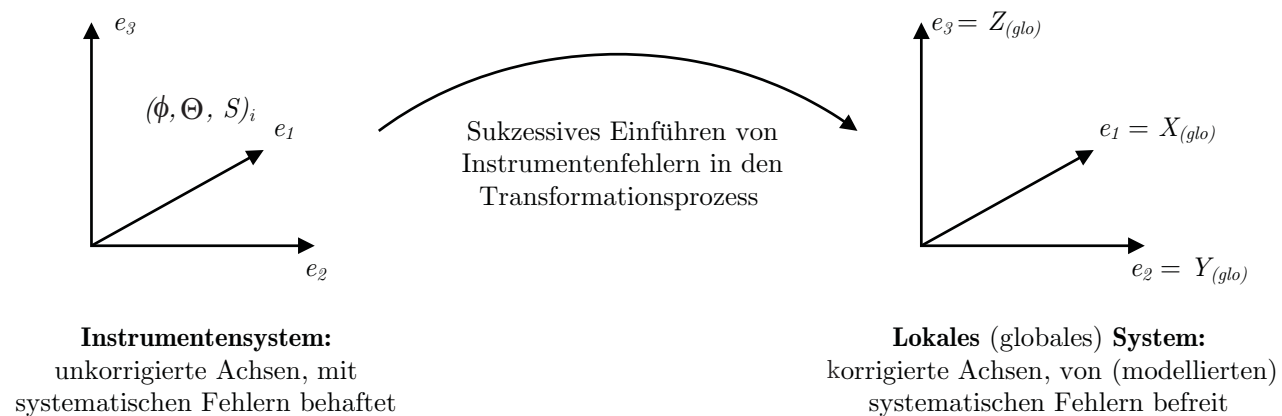
mit

$\phi$	:	Kugelkoordinate, erster Raumwinkel, entspricht Horizontalkreisablesung [gon]
$\Theta$	:	Kugelkoordinate, zweiter Raumwinkel, entspricht Vertikalkreisablesung [gon]
$S_{gem}$	:	gemessene Schrägstrecke [m]
$c$	:	Zielachsenfehler [gon]
$i$	:	Kippachsenfehler [gon]
$h$	:	Höhenindexfehler [gon]
$k_0$	:	Nullpunktkorrektur des Entfernungsmessteils [m]
$m$	:	Maßstab
$e_{vh}, e_{vz}, e_{hz}$	:	Achsexzentritäten [gon]

zur Bestimmung der kartesischen Koordinaten besitzen den Vorteil, dass sie als Bedingungsgleichungen im Ausgleichungsprozess formuliert werden können.

### Systemtransformationen

Die Modellierung der Instrumentenfehler wird über die sukzessive Einführung von Instrumentenparametern und deren Beschreibung in verschiedenen Systemtransformationen erreicht, siehe Abbildung 5.6.



**Abb. 5.6:** Illustration zur Modellierung der Instrumentenfehler: Durch sukzessives Einfuehren der Instrumentenfehler in den Transformationsprozess erfolgt eine Überführung des lokalen unkorrigierten Instrumentensystems in das übergeordnete, um alle systematischen Effekte bereinigte Koordinatensystem.

Dabei wird der Weg von den Beobachtungen zu den kartesischen Koordinaten eines lokalen Systems, bei entsprechender Transformation auch eines globalen Systems, unter Berücksichtigung der systematischen Instrumentenfehler dargestellt.

**System 1 (Ausgangssystem):** Im Ausgangssystem der verschiedenen nacheinander auszuführenden Transformationen ist nur die Streckenbeobachtung berücksichtigt. Daraus ergibt sich für das beschreibende orthonormale Dreibein bezüglich der lokalen Basis  $[e_1, e_2, e_3]$  folgende Konfiguration:  $e_1$  entspricht der unkorrigierten Zielachse,  $e_2$  steht senkrecht auf der unkorrigierten Zielachse und  $e_3$  steht senkrecht auf  $e_1$  und  $e_2$ . Unter Verwendung der Quaternionenschreibweise stellt sich ein Ortsvektor  $\mathbf{X}_i$  im System 1 wie folgt dar:

$$\mathbf{X}_i^1 = \left[ 0, \begin{pmatrix} k_0 + S_{gem} \cdot m \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right]. \quad (5.12)$$

**System 2:** Die folgende Transformation lässt den Zielachsenfehler  $c$  in das funktionale Modell mit einfließen, d. h. es wird eine Rotation mit dem Zielachsenfehler um  $e_3$  durchgeführt, da dieser in einer Normalebene zu  $e_3$  liegt. Die Rotation

$$\mathbf{X}_i^2 = \mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{X}_i^1 \cdot \mathbf{q}_1^* \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_1 = \left[ \cos\left(\frac{c}{2}\right), \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin\left(\frac{c}{2}\right) \end{pmatrix} \right] \quad (5.13)$$

führt dazu, dass  $e_1$  der korrigierten Zielachse entspricht,  $e_2$  senkrecht auf der Zielachse steht und mit dieser eine Ebene aufspannt, die eine Parallelebene hat, in der die unkorrigierte Kippachse liegt.  $e_3$  steht wiederum senkrecht auf  $e_1$  und  $e_2$ .

**System 3:** Da zusätzlich zu den auf die Winkel- und Streckenmessungen systematisch wirkenden Instrumentenfehlern die in Abbildung 5.5 eingeführten Achsexzentrizitäten<sup>4</sup> in die funktionale Beschreibung eingeführt werden müssen, wird zum Übergang in das dritte System eine Translation mit dem orthogonalen Achsabstand  $e_{hz}$  zwischen der Ziel- und Kippachse angesetzt. Nach erfolgter Transformation stellt der Basisvektor  $e_1$  die Zielachse dar,  $e_2$  entspricht der unkorrigierten Kippachse und analog zu den vorangegangenen Systemen steht  $e_3$  senkrecht auf  $e_1$  und  $e_2$ . Die Translation um  $e_{hz}$  in Richtung von  $e_3$  liefert:

$$\mathbf{X}_i^3 = \mathbf{X}_i^2 + \mathbf{q}_2 \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_2 = \left[ 0, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ e_{hz} \end{pmatrix} \right]. \quad (5.14)$$

**System 4:** Das System 4 ist durch die Einführung der Vertikalkreisablesung  $\Theta$  und des Höhenindexfehlers  $h$  gekennzeichnet. Die Einführung eines Höhenindexfehlers hinsichtlich seiner Art und Wirkungsweise ist jedoch vom zu untersuchenden Instrument abhängig. Bei der Kalibrierung des POMES muss der Höhenindexfehler in zwei separate Komponenten  $h_a$  und  $h_m$  zerlegt werden:

1.  $h_a$ : beschreibt die konstruktionsbedingte Abweichung der Libellenachse aus der Horizontalen, die als Aufstellungsfehler modelliert wird und
2.  $h_m$ : drückt die ungenügende Realisierung der Parallelität zwischen Libellenachse und Zielachse aus, die mechanisch bedingt ist und als konstant angesehen werden kann.

In der Transformation kann die Summe aus beiden Einflussgrößen gebildet werden, da beide Einflüsse in die gleiche Richtung wirken. Die Rotation um  $e_2$  mit der Summe aus dem Vertikalwinkel  $\Theta$  und dem Nullpunktfehler  $h = h_a + h_m$  ist gekennzeichnet durch

$$\mathbf{X}_i^4 = \mathbf{q}_3 \cdot \mathbf{X}_i^3 \cdot \mathbf{q}_3^* \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_3 = \left[ \cos\left(\frac{\Theta + h}{2}\right), \begin{pmatrix} 0 \\ \sin\left(\frac{\Theta + h}{2}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \right]. \quad (5.15)$$

<sup>4</sup>Wie bereits auf Seite 72 erläutert, handelt es sich bei diesen zusätzlichen Instrumentenfehlern um flexibel anzusetzende systematischen Fehler, die von der mechanischen Konstruktion des jeweils zu kalibrierenden Instrumentes abhängen. Im Fall des POMES sind diese anzusetzen.

Nach der Transformation entspricht der Basisvektor  $e_1$  der Projektion der Zielachse in die Normalebene der (schiefen) Stehachse, die unkorrigierte Kippachse entspricht  $e_2$  und  $e_3$  ist orthogonal zu  $e_1$  und  $e_2$ .

**System 5:** Der Übergang in das System 5 vollzieht sich durch die Einführung des Kippachsenfehlers  $i$ , indem um den Basisvektor  $e_1$  rotiert wird:

$$\mathbf{X}_i^5 = \mathbf{q}_4 \cdot \mathbf{X}_i^4 \cdot \mathbf{q}_4^* \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_4 = \left[ \cos\left(\frac{i}{2}\right), \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{i}{2}\right) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right]. \quad (5.16)$$

Anschließend liegt folgendes System vor:  $e_1$  entspricht der Projektion der Zielachse in die Normalebene der unkorrigierten Stehachse, die Kippachse entspricht  $e_2$  und  $e_3$  ist eine Parallelversetzte zur unkorrigierten Stehachse. Der Abstand zwischen der unkorrigierten Stehachse und der zu ihr Parallelen ist durch die Achsexzentrizitäten  $e_{vh}$  und  $e_{vz}$  begründet.

**System 6:** Die Translationen mit den orthogonalen Achsabständen zwischen der Steh- und Kippachse  $e_{vh}$  und zwischen der Steh- und Zielachse  $e_{vz}$  führen zur Verschiebung des Systems 6 in die unkorrigierte Stehachse:

$$\mathbf{X}_i^6 = \mathbf{X}_i^5 + \mathbf{q}_5 \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_5 = \left[ 0, \begin{pmatrix} e_{vh} \\ e_{vz} \\ 0 \end{pmatrix} \right]. \quad (5.17)$$

**System 7:** Die Berücksichtigung der Instrumentenfehler im vorangegangenen Transformationsschritt haben dazu geführt, dass die Basisvektoren  $e_1$  der Zielachse,  $e_2$  der Kippachse und  $e_3$  der unkorrigierten Stehachse entsprechen. Durch eine Rotation um die Drehachse  $e_3$  mit dem Horizontalwinkel  $\phi$

$$\mathbf{X}_i^7 = \mathbf{q}_6 \cdot \mathbf{X}_i^6 \cdot \mathbf{q}_6^* \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_6 = \left[ \cos\left(\frac{\phi}{2}\right), \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{pmatrix} \right] \quad (5.18)$$

wird das lokale System so gedreht, dass der Basisvektor  $e_1$  der Nullrichtung des Instrumentensystems entspricht. Die Nebenrichtung  $e_2$  ist orthogonal zu  $e_1$  und  $e_3$  ausgerichtet und  $e_3$  verkörpert die unkorrigierte Stehachse.

Im nun vorliegenden System sind alle Instrumentenfehler modelliert. Die weiteren Transformationen dienen zur Orientierung des Messsystems in einem äußeren Rahmen, d. h. zur globalen Orientierung in einem übergeordneten Koordinatensystem.

**System 8:** Durch eine Rotation mit der Orientierungsunbekannten  $\omega$  und den Komponenten der Stehachsschiefe  $\xi$  und  $\eta$  werden die Orientierungsunbekannte und die Stehachsschiefe eliminiert. Eine gesonderte Bestimmung dieser Aufstellungsunsicherheiten wird hier nicht weiter verfolgt, da sie für die Bestimmung der Instrumentenfehler nicht von Interesse sind. Die Transformation

$$\mathbf{X}_i^8 = \mathbf{q}_7 \cdot \mathbf{X}_i^7 \cdot \mathbf{q}_7^* \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_7 = \left[ q_0, \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} \right] \quad (5.19)$$

führt dazu, dass der Basisvektor  $e_1$  parallel zur Nullrichtung des lokalen Koordinatensystems ausgerichtet wird,  $e_2$  ist orthogonal zu  $e_1$  sowie zu  $e_3$  und der Basisvektor  $e_3$  entspricht der korrigierten Stehachse, d. h. der lokalen Lotrichtung.

**System 9 (Zielsystem):** Durch den letzten Transformationsschritt wird der Übergang vom lokalen Instrumentensystem in ein übergeordnetes Koordinatensystem vollzogen und wird durch drei Translationen  $t_x$ ,  $t_y$  und  $t_z$  ausgeführt:

$$\mathbf{X}_i^9 = \mathbf{X}_i^8 + \mathbf{q}_8 \quad \text{mit} \quad \mathbf{q}_8 = \left[ 0, \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \right]. \quad (5.20)$$

Nach erfolgter Transformation entsprechen die Basisvektoren  $e_1$ ,  $e_2$  und  $e_3$  den drei Koordinatenachsen des übergeordneten Koordinatensystems.

### Transformationsvorschrift

Die Zusammenfassung der einzelnen Transformationen führt zu

$$\mathbf{X}_i^g = \mathbf{q}_7 \cdot \mathbf{q}_6 \cdot [\mathbf{q}_4 \cdot \mathbf{q}_3 \cdot (\mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{X}_i^l \cdot \mathbf{q}'_1 + \mathbf{q}_2) \cdot \mathbf{q}'_3 \cdot \mathbf{q}'_4 + \mathbf{q}'_5] \cdot \mathbf{q}'_6 \cdot \mathbf{q}'_7 + \mathbf{q}'_8. \quad (5.21)$$

Durch Auflösen der obigen Gleichung und Formulierung von Ersatzparametern in der Form

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_9 &= \mathbf{q}_7 \cdot \mathbf{q}_6 \\ \mathbf{q}_{10} &= \mathbf{q}_9 \cdot \mathbf{q}_4 \cdot \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_{11} &= \mathbf{q}_{10} \cdot \mathbf{q}_1 \end{aligned}$$

ergibt sich die endgültige Transformationsvorschrift zu

$$\mathbf{X}_i^g = \mathbf{q}_{11} \cdot \mathbf{X}_i^l \cdot \mathbf{q}'_{11} + \mathbf{q}_{10} \cdot \mathbf{q}_2 \cdot \mathbf{q}'_{10} + \mathbf{q}_9 + \mathbf{q}_5 \cdot \mathbf{q}'_9 + \mathbf{q}_8, \quad (5.22)$$

die eingesetzt in die Ebenengleichung nach Gleichung 3.10 einer Bedingungsgleichung als Funktion von Beobachtungen und Unbekannten entspricht:

$$E : \mathbf{n} \cdot \mathbf{X}_i^g - d = 0. \quad (5.23)$$

## 5.3 Parameterschätzung

Bei der Formulierung eines funktionalen Modells zur Kalibrierung von polaren Messsystemen muss ein Zusammenhang zwischen den Beobachtungen  $\mathbf{l}_i$  und den unbekanntem, in einem Ausgleichsprozess zu bestimmenden Kalibrier- und Transformationsparametern  $\mathbf{x}_i$  hergestellt werden. Unter Kenntnis des mechanischen und optischen Aufbaus des zu untersuchenden Sensors lassen sich die zu erwartenden Instrumentenfehler aufstellen. Der elektronische Aufbau der Sensoren kann sich ebenfalls in verschiedenen Fehlern niederschlagen, wird im Weiteren aber nicht untersucht.

### 5.3.1 Modellbildung

Im als GAUSS-HELMERT-Modell bezeichneten Allgemeinfeld der Ausgleichsrechnung ergibt sich folgende implizite, nichtlineare funktionale Beziehung:

$$\mathbf{f}(\mathbf{l}_i, \mathbf{x}_i) = \mathbf{0}. \quad (5.24)$$

Dabei sind die Beobachtungen  $\mathbf{l}_i$  zur Bestimmung der dreidimensionalen Koordinaten  $(x, y, z)_i$  des Punktes  $P_i$  am Objekt die Horizontalrichtung  $H z_i$ , der Vertikalwinkel  $V_i$  und die gemessene Schrägstrecke  $S_i$ . Das stochastische Modell der Beobachtungen ist gegeben durch  $\Sigma_{ll} = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{ll}$ ,  $\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{ll}^{-1}$ . Zusätzlich zu den Bedingungsgleichungen mit Unbekanntem nach Gleichung 5.24 unterliegen die unbekanntem Parameter  $\mathbf{x}_i$  noch Bedingungen  $\mathbf{g}(\mathbf{x}_i)$ , die in ihrer allgemeinen, nichtlinearen Form formuliert werden können zu:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}. \quad (5.25)$$

Dem obigen Ansatz hinzugefügt, erhält man das erweiterte GAUSS-HELMERT-Modell, d. h. eine bedingte Ausgleichung mit Unbekanntem und Bedingungen zwischen den Unbekanntem. Unter diesen Randbedingungen lässt sich, nach einer Linearisierung mittels TAYLOR-Reihenentwicklung bis zur ersten Ordnung, folgendes differentielles Gleichungssystem anschreiben

$$\begin{aligned} \mathbf{B}^T \mathbf{v} + \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_1 &= \mathbf{0} \\ \mathbf{C}^T \Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_2 &= \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5.26)$$

das aufgrund der realen Beobachtungen und der Näherungswerte der unbekanntem Parameter mit Widersprüchen behaftet ist.

Bei der Ableitung der Normalgleichungen nach der Methode der kleinsten Quadrate zur Schätzung der unbekanntem Parameter und den Beobachtungsverbesserungen sind neben der Minimierungsbedingung für die Beobachtungsverbesserungen und der Bedingungsgleichung zwischen den Beobachtungen noch die Bedingungsgleichungen zwischen den Parametern in der LAGRANGESchen Funktion zu berücksichtigen. Die LAGRANGE-Funktion als Verfahren der mathematischen Optimierung liefert die Lösung dieser Minimierungsaufgabe mit Nebenbedingungen, d. h.  $\Delta \mathbf{x}$  und  $\mathbf{v}$  sind so zu bestimmen, dass die Hauptbedingung  $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$  unter Erfüllung der Nebenbedingung (5.26) ein Minimum wird. Die LAGRANGE-Funktion

$$\Omega = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} - 2\mathbf{k}_1^T (\mathbf{B}^T \mathbf{v} + \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_1) - 2\mathbf{k}_2^T (\mathbf{C}^T \Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_2) \quad (5.27)$$

liefert für ihr Minimum die Gleichungen

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{v}} &= 2\mathbf{v}^T \mathbf{P} - 2\mathbf{k}_1^T \mathbf{B}^T \\ \frac{\partial \Omega}{\partial \mathbf{x}} &= -2\mathbf{k}_1^T \mathbf{A} - 2\mathbf{k}_2^T \mathbf{C}^T\end{aligned}\quad (5.28)$$

bzw.

$$\begin{aligned}-\mathbf{P}\mathbf{v} + \mathbf{B}\mathbf{k}_1 &= 0 \\ \mathbf{A}^T \mathbf{k}_1 + \mathbf{C}\mathbf{k}_2 &= 0\end{aligned}\quad (5.29)$$

Durch Zusammenführen von (5.26) und (5.29) ergibt sich das Normalgleichungssystem wie folgt:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{P} & \mathbf{B} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{0} & \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}^T & \mathbf{0} & \mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{k}_1 \\ \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} = 0.\quad (5.30)$$

Die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  enthält die Gewichte der Beobachtungen und ist nur auf der Hauptdiagonalen besetzt. Die in den Koeffizientenmatrizen  $\mathbf{B}$  und  $\mathbf{A}$  enthaltenen partiellen Ableitungen der Bedingungsgleichung (5.24) nach den Beobachtungen und den unbekannt Parametern werden zum Aufbau des Normalgleichungssystems ebenso benötigt, wie die Koeffizientenmatrix  $\mathbf{C}$ , die die partiellen Ableitungen der Bedingungsgleichungen nach den unbekannt Parametern enthält. Aufgrund der Komplexität der Gleichungen (5.24), die zum Besetzen der Matrizen  $\mathbf{B}$  und  $\mathbf{A}$  benötigt werden, erfolgt die Ableitung der Bedingungsgleichung numerisch [Alder, 2003]. Der Vektor  $\mathbf{v}$  enthält die Verbesserungen der Beobachtungen und  $\Delta \mathbf{x}$  ist der Vektor der unbekannt Parameterzuschläge. Die Größen  $\mathbf{k}_1$  und  $\mathbf{k}_2$  stellen die beiden Korrelatenvektoren der LAGRANGESchen Funktion dar und  $\mathbf{w}_1$  sowie  $\mathbf{w}_2$  bedeuten die Vektoren der Widersprüche.

Durch Einsetzen von  $\mathbf{v} = \mathbf{Q}\mathbf{B}\mathbf{k}_1$  aus (5.29) in (5.26) mit  $\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1}$  ergibt sich

$$\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B}\mathbf{k}_1 + \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_1 = 0,\quad (5.31)$$

und das verbleibende Gleichungssystem entspricht

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B} & \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} & \mathbf{C} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} = 0.\quad (5.32)$$

Aus der ersten Gleichung nach  $\mathbf{k}_1$  entwickelt liefert

$$\mathbf{k}_1 = -(\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B})^{-1} (\mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_1),\quad (5.33)$$

und durch Einsetzen in die zweite Gleichung folgt daraus:

$$-\mathbf{A}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{C}\mathbf{k}_2 - \mathbf{A}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{w}_1 = 0.\quad (5.34)$$

Das zweimal reduzierte System ergibt sich demnach zu:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{A}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \mathbf{k}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\mathbf{A}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B})^{-1} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \end{bmatrix} = 0.\quad (5.35)$$

Unter Verkürzung der Formeln nach [Höpcke, 1980]

$$\mathbf{B}^T \mathbf{Q}\mathbf{B} = \mathbf{M}, \quad \mathbf{A}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} = \mathbf{N} \quad \text{und} \quad \mathbf{C}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{C} = \mathbf{S},\quad (5.36)$$

liefert die Auflösung dieses Systems die Lösungen:

$$\mathbf{k}_2 = \mathbf{S}^{-1} [(\mathbf{N}^{-1} \mathbf{C})^T (\mathbf{M}^{-1} \mathbf{A})^T \mathbf{w}_1 - \mathbf{w}_2]\quad (5.37)$$

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{N}^{-1} [\mathbf{C}\mathbf{k}_2 - (\mathbf{M}^{-1} \mathbf{A})^T \mathbf{w}_1]\quad (5.38)$$

$$\mathbf{k}_1 = -\mathbf{M}^{-1} (\mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{w}_1)\quad (5.39)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{Q}\mathbf{B}\mathbf{k}_1.\quad (5.40)$$

### 5.3.2 Datumsverfügung

Das Normalgleichungssystem dieser Ausgleichungsaufgabe ist aufgrund der fehlenden Datumsverfügung ebenfalls singulär, vgl. auch Kapitel 4.3.3. Auch hier wird durch Einführung einer zur Zahl der in den Normalgleichungen auftretenden Rangdefekten äquivalenten Anzahl von datumsgebenden Parametern dieser Defekt behoben [Welsch u. a., 2000]. Dies gelingt durch die Definition der Translationen und Rotationen bezüglich der drei Koordinatenachsen (eines Standpunktes), indem die Translationskomponenten und drei der vier Komponenten des Rotationsquaternions festgehalten werden.

Eine andere Vorgehensweise der Datumsverfügung ist durch das Einführen von direkt beobachteten Ebenenparametern gegeben. Neben der Überwindung des Rangdefektes bietet diese Art der Datumsfestlegung die Möglichkeit, bekannte Ebenenparameter mit ihren Kovarianzmatrizen als stochastische Vorinformation in den Ausgleichungsprozess zu integrieren. Die Lagerung des Netzes erfolgt auf den entsprechenden Datumsebenen ihrem Genauigkeitspotential entsprechend „weich“.

### 5.3.3 Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Unter der Annahme, dass die funktionalen Beziehungen zwischen Messgrößen und unbekanntem Parametern korrekt modelliert wurden und die a-priori Annahmen über Standardabweichungen und Korrelationen zutreffen, liefert die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{xx}$  und der Schätzwert für den Varianzfaktor  $s_0^2$  eine Aussage zur Genauigkeit der Parameterschätzung. Die Kofaktorenmatrix, vgl. [Höpcke, 1980], ergibt sich zu

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{N}^{-1} - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{C}^T \mathbf{N}^{-1}, \quad (5.41)$$

und der Schätzwert für den Varianzfaktor

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{r} \quad (5.42)$$

mit der Redundanz  $r$ . Diese ist, wie [Ackermann, 1981] zeigt, identisch mit der Spur von  $\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P}$ . Die Redundanzanteile

$$r = \sum_{i=1}^n r_i \quad \text{mit} \quad r_i = (\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P})_{ii} \quad (5.43)$$

besagen, welchen Anteil eine Beobachtung  $i$  an der Gesamtredundanz liefert. Die Kofaktorenmatrix  $\mathbf{Q}_{vv}$  ist Träger zur Bestimmung von Zuverlässigkeitskriterien

$$\mathbf{Q}_{vv} = \mathbf{Q} \mathbf{B} \mathbf{Q}_{k_1 k_1} \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \quad \text{mit} \quad \mathbf{Q}_{k_1 k_1} = \mathbf{M}^{-1} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{Q}_{xx} \mathbf{A}^T \mathbf{M}^{-1}. \quad (5.44)$$

Analog zu den Ausführungen in Kapitel 4.3.4 lassen sich zum Schutz vor groben Fehlern Zuverlässigkeitsmaße ableiten. Die nach Gleichung 4.42 eingeführten normierten Verbesserungen stellen das zum Auffinden und zur anschließenden Bewertung von groben Beobachtungsfehlern nötige Werkzeug dar. Durch die sukzessive Eliminierung der Beobachtung mit der jeweils größten normierten Verbesserung bis hin zu einem Grenzwert, und anschließender Wiederholung der Ausgleichung, ist das praktische Vorgehen der Grobfehlerrückmeldung gekennzeichnet.

### 5.3.4 Hypothesentests

Im vorliegenden funktionalen Ausgleichungsmodell werden in Abhängigkeit des zu untersuchenden Instrumentes eine in quantitativer Hinsicht verschiedene Anzahl von Instrumentenfehlern angesetzt. Da sich die Ausprägung bzw. das Auftreten der Instrumentenfehler von Gerät zu Gerät unterscheiden können, müssen die im Ausgleichungsprozess geschätzten Parameter auf Signifikanz getestet werden. Dies geschieht durch die Einführung von Signifikanz- oder Hypothesentests auf Basis der *Fischer*- und *Student*-Verteilung.

#### Globaltest

Ein erster Indikator im Sinne eines Globaltestes ist der Vergleich der Verbesserungsquadratsummen  $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$  zwischen zwei Parameterschätzungen  $S_I$  und  $S_{II}$ , wobei in der Parameterschätzung  $S_I$  alle Instrumentenfehler frei gegeben werden und in der Parameterschätzung  $S_{II}$  ein Zwang im Ausgleichungsprozess in der Gestalt ausgeübt wird, dass alle Instrumentenfehler zu Null gesetzt werden. Es wird somit die Hypothese aufgestellt, dass keine Instrumentenfehler vorliegen. Da die Varianzfaktoren  $s_0^I$  und  $s_0^{II}$  nicht voneinander unabhängig sind, erfolgt der Übergang zur Testgröße

$$F = \frac{(\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})^{II} - (\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v})^I}{\Delta r} \quad (5.45)$$

mit  $\Delta r$  als Differenz der aus den Teilausgleichungen erhaltenen Einzelredundanzen, vergleiche dazu [Wolf, 1980]. Die für die Durchführung des Test gültige Wahrscheinlichkeitsbeziehung lautet analog zu 4.43

$$P \{F > F_{f_I, f_I, 1-\alpha} | H_0\} = \alpha \quad (5.46)$$

mit  $F_{f_I, f_I, 1-\alpha}$  als Quantil der F-Verteilung mit  $f_I$  und  $f_I$  als Anzahl der Freiheitsgrade der Einzelausgleichungen. Bei der praktischen Anwendung dieses Tests kann mit dem Signifikanzniveau  $1 - \alpha$  beim Überschreiten des zugehörigen Grenzwertes der F-Verteilung durch die Testgröße festgestellt werden, dass die Einführung von Kalibrierparametern eine signifikante Änderung der Ausgleichungsergebnisse bewirkt, d. h. die Einführung von Kalibrierparametern führt zu einer Verbesserung der Ausgleichungsergebnisse. Im Falle von bereits vom Hersteller kalibrierten Instrumenten ist somit einerseits eine Aussage zur korrekten Kalibrierung der Sensoren möglich. Andererseits wird die Richtigkeit der angesetzten Kalibrierparameter überprüft.

### Lokaltest

Zum Testen der einzelnen Kalibrierparameter auf Signifikanz kommt ein t-Test zur Anwendung, bei dem die Hypothese untersucht wird, ob sich der jeweilige zu testende Parameter signifikant vom Erwartungswert  $\xi$  gleich *Null* unterscheidet. Durch die Einführung der Nullhypothese  $H_0 : x_i = 0$  ergibt sich explizit die Alternativhypothese  $H_A : x_i \neq 0$ , die zu einem zweiseitigen Test führt. Die Prüfgröße  $t$  ergibt sich zu

$$t = \frac{x_i - \xi}{s_{x_i}} \quad (5.47)$$

und wird gegen den Schrankenwert  $t_S$ , der eine Funktion der Redundanz  $r$  und der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $S$  ist, verglichen. Ist die Prüfgröße  $t$  kleiner als der Schrankenwert  $t_S$ , kann mit der Sicherheitswahrscheinlichkeit auf das Zutreffen der Nullhypothese geschlossen werden, d. h. im konkreten Fall ist der betreffende Kalibrierparameter als nicht signifikant anzunehmen und aus der Liste der zu schätzenden Instrumenten-Kalibrierparameter zu entfernen. Aufgrund der Korrelation zwischen den Parametern ist jedoch nur derjenige Parameter zu entfernen, der die kleinste Prüfgröße aufweist. Anschließend ist die Parameterschätzung zu wiederholen.

### 5.3.5 Varianzkomponentenschätzung

Sind die Genauigkeitsniveaus der Beobachtungsgruppen nicht hinreichend genau bekannt, lassen sich die Beobachtungen und Verbesserungen der Zerlegung der Kovarianzmatrix entsprechend in Beobachtungsgruppen unterteilen. Auf diese Weise lässt sich eine Varianzkomponentenschätzung durchführen, die häufig zur Verbesserung der Parameterschätzung beiträgt. Für die einzelnen Beobachtungsgruppen  $i$  lassen sich eigene Varianzfaktoren  $\sigma_{0_i}^2$  einführen, die als Varianzkomponenten bezeichnet werden, vgl. [Niemeier, 2002] sowie [Welsch u. a., 2000] und für deren Berechnung ein iteratives Vorgehen nötig ist. Nach Aufstellung einer Startlösung für das stochastische Modell ( $m_{0_i}^2$ ) wird die Ausgleichung nach dem oben eingeführten Modell berechnet. Für die Schätzung der Varianzkomponenten einer Beobachtungsgruppe  $i$  gilt

$$s_{0_i}^2 = \frac{\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_{ii} \mathbf{v}_i}{sp(\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P}_{ii})}, \quad (5.48)$$

die benutzt werden, um die Startwerte  $m_{0_i}^2$  zu verbessern. Die iterative Berechnung wird durchgeführt, bis für alle neu geschätzten Varianzkomponenten das Konvergenzziel  $s_{0_i}^2 = 1,0$  erreicht ist. Die Analyse der Varianzkomponenten setzt voraus, dass keine Modellfehler vorliegen und dass das Beobachtungsmaterial frei von groben Fehlern ist. Die Eliminierung von groben Fehlern ist im Zuge der Parameterschätzung im eingeführten Modell nach Gleichung (4.42) möglich und ist vor der Varianzkomponentenschätzung entsprechend durchzuführen.

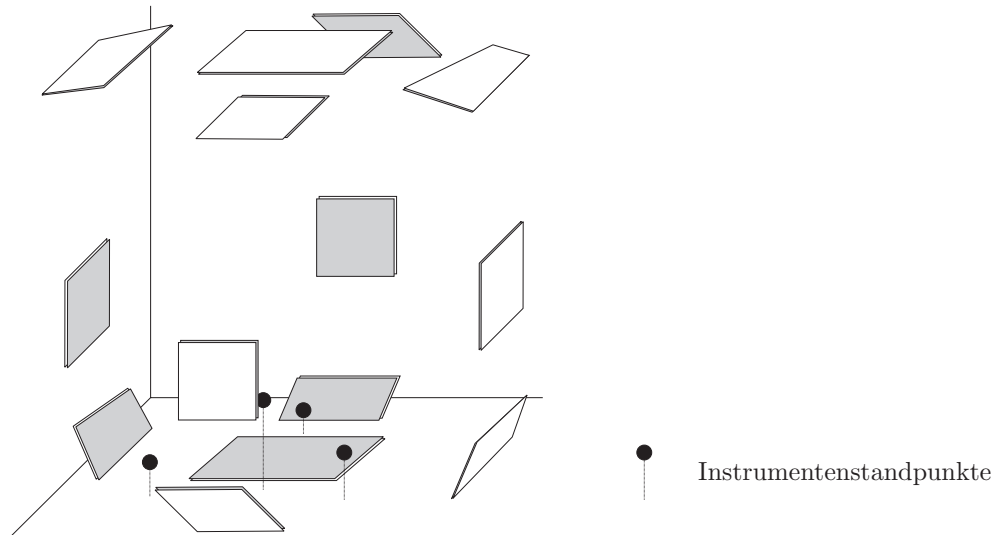
## 5.4 Simulation von Instrumentenfehlern

Um die entwickelte Kalibrierstrategie auf ihre Leistungsfähigkeit zu testen, wurde ein synthetischer Simulationsdatensatz bestehend aus 14 Ebenen erzeugt, vgl. Abbildung 5.7. Zu diesen Ebenen wurden fiktive Beobachtungen aus den Koordinaten der jeweiligen Objektpunkte auf der Oberfläche der Ebenen berechnet und um die in Tabelle 5.2 aufgeführten Instrumentenfehler verfälscht. Der Höheninexfehler wurde als standpunktabhängig eingeführt und nur auf einem der vier simulierten Instrumentenstandpunkte berücksichtigt.

Eine erste Simulation mit 9 Beobachtungen pro Standpunkt ergab hinsichtlich der benötigten Anzahl an Beobachtungen, dass für eine ausreichend genaue und sinnvolle Bestimmung der Instrumentenfehler die aus



der Anzahl an Beobachtungen und der zu schätzenden unbekannt Parameter resultierende Redundanz nicht ausreicht. Durch eine Erhöhung der Anzahl an Beobachtungen pro Ebene auf 25 wird die Zuverlässigkeit in der Bestimmung erhöht. Ebenfalls führt eine Erhöhung der Anzahl an Instrumentenstandpunkten zu einer verbesserten Schätzung der unbekannt Parameter. Im praktischen Einsatz der Kalibrierstrategie gilt es aus diesem Grund, eine sinnvolle Abschätzung zwischen der Anzahl an Instrumentenstandpunkten und somit dem Messaufwand und der Bestimmungsgenauigkeit der unbekannt Parameter zu treffen. Eine Steigerung der Anzahl an Beobachtungen ist einer Erhöhung der Anzahl an Standpunkten sicherlich vorzuziehen, da der Aufwand wesentlich geringer ist, aus den vergleichsweise großen Datenmengen, die beim Scannen ohnehin anfallen, Beobachtungen zu extrahieren, als zusätzliche Messungen auf einem weiteren Standpunkt vorzunehmen.



**Abb. 5.7:** Simulierte Ebenen zur Erzeugung fiktiver Beobachtungen.

Bei Ansicht der Ergebnisse der simulierten Parameterschätzungen lässt sich feststellen, dass der vorgestellte Kalibrieransatz eine vollständige und genaue Bestimmung der Instrumentenfehler zulässt. Auf der anderen Seite muss festgestellt werden, dass die Parameterschätzung versagt, wenn die Instrumentenfehler Kippachsenfehler, Zielachsenfehler und Höhenindexfehler in der gleichen Größenordnung wie die Messgenauigkeit des zu untersuchenden Instrumentes vorliegen.

Simulationberechnungen, 14 Ebenen, 25 Beobachtungen/Ebene					
Simulierte Instrumentenfehler		Parameterschätzung bei simulierten Messgenauigkeiten			
		$\sigma_{\phi, \Theta} = 0$ mgon $\sigma_S = 0$ mm	$\sigma_{\phi, \Theta} = 1$ mgon $\sigma_S = 1$ mm	$\sigma_{\phi, \Theta} = 3$ mgon $\sigma_S = 3$ mm	$\sigma_{\phi, \Theta} = 1$ cgon $\sigma_S = 1$ cm
Kippachsenfehler	20,0 mgon	20,0 mgon	21,7 mgon	26,1 mgon	-
Zielachsenfehler	20,0 mgon	20,0 mgon	20,0 mgon	16,9 mgon	37,7 mgon
Höhenindexfehler	20,0 mgon <sup>5</sup>	20,0 mgon	15,9 mgon	20,0 mgon	-
Nullpunkt korrektur	-5,0 mm	-5,0 mm	-4,9 mm	-5,6 mm	-5,3 mm <sup>6</sup>

**Tabelle 5.2:** Parameterschätzung bei der Simulation von Instrumentenfehlern, aufgeführt sind nur die aus der Ausgleichung erhaltenen signifikanten Parameter.

## 5.5 Testumgebung

Zum Zwecke einer Machbarkeitsstudie wurde an der Technischen Universität Berlin in einem Laborraum ein Kalibrierfeld installiert. Aufgrund baulicher Gegebenheiten besteht dieses aus 15 Ebenen, vgl. Abbildung 5.8.

<sup>5</sup>Der Höhenindexfehler wurde nur auf Standpunkt vier als standpunktabhängiger Instrumentenfehler eingeführt.

<sup>6</sup>Die Parameterschätzung für die Nullpunkt korrektur ist an der Nachweisgrenze des statistischen Tests.

Die Ebenen sind, damit der gesamte Instrumentenhorizont abgedeckt werden kann, gleichmäßig im Raum verteilt und als Platten an Decke, Fußboden und den Wänden ausgebildet. Zusätzlich wurden mehrere schräg angebrachte Platten montiert. Dadurch wird gewährleistet, dass wesentlich mehr und mit anderen Orientierungsparametern versehene Ebenen als die in einem normalen Raum zur Verfügung stehenden Ebenen in den Kalibrierprozess eingebracht werden. Die Wahl von ebenen Platten gegenüber der Nutzung der Wände und Decken hat zudem noch den Vorteil, dass eventuelle natürliche Störeffekte der vorhandenen Bausubstanz, beispielsweise konvexe oder konkave Wölbungen und Unstetigkeitsstellen der Ebenen, nicht in den Kalibrierprozess einfließen und diesen stören.

Als Kalibrierplatten wurden handelsübliche beschichtete Spanplatten mit den ungefähren Abmessungen von  $1.0\text{ m} \times 1.3\text{ m}$  verwendet. Getestet wurden im Vorfeld die Reflexionseigenschaften unterschiedlicher Beschichtungsmaterialien. Ausgewählt wurden zum Einbau in den Kalibrierraum die Spanplatten mit einer heliograuen Beschichtung, die über die besten Reflexionseigenschaften verfügt. Die Kalibrierplatten wurden unter einer Dreipunktlagerung an die betreffenden Ausschnitte des Kalibrierraumes angeschraubt, um keinen Zwang in der Befestigung auf die Platten auszuüben, falls die Wände oder der Boden nicht eben sind.



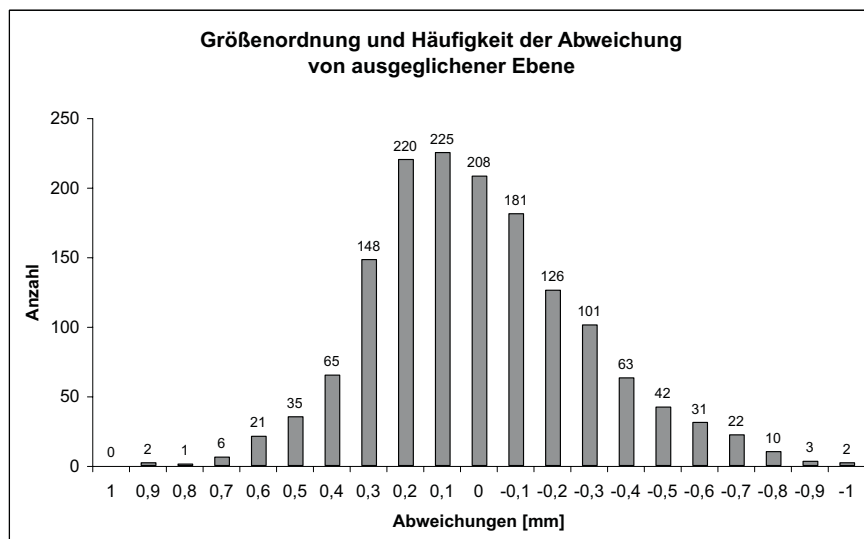
**Abb. 5.8:** Realisierung eines Testfeldes mit Kalibrierplatten (Ausschnitt). Zur Darstellung des Grundrisses siehe auch Abbildung 4.9.

Eine wichtige Forderung im Rahmen der Kalibrierstrategie ist, dass die angemessenen Objektpunkte pro Testfeldplatte in die Formgleichung der Ebene gezwungen werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, die verwendeten Kalibrierplatten auf Ebenheit zu überprüfen. Dazu wurden beispielhaft zwei dieser Kalibrierplatten (vertikal an einer Wand im Kalibrierraum angebracht und eine schräg abgehängte Kalibrierplatte) mit einem Messverfahren höherer Genauigkeit vermessen. Ein Messverfahren höherer Genauigkeit gegenüber dem Laserscanning ist beispielsweise die photogrammetrische Auswertung mehrerer Bilder in einer gemeinsamen Bündelblockausgleichung. Zum Zweck der Überprüfung auf Ebenheit wurde ein Raster von Markierungen auf die Kalibrierplatten aufprojiziert, wobei für die Zeit, die zur Aufnahme von 5 Bildern benötigt wurde, die Stabilität des verwendeten Beamers in Bezug auf die optischen Eigenschaften (thermische Effekte) vorausgesetzt wurde. In Abbildung 5.9 sind die ca. 1500 projizierten Zielzeichen (ausgebildet als Kreuze) auf der Oberfläche einer der untersuchten Kalibrierplatten dargestellt, die zweite untersuchte Platte wurde aus Platzgründen mit einer geringeren Anzahl von Targets (ca. 800) versehen. Die zur Bündelausgleichung benötigten Koordinaten von ausgewählten Pass- und Verknüpfungspunkten wurde im Vorfeld unter Einsatz eines Präzisions-Tachymeters (LEICA TCA 2003) bestimmt, die Maßstabübertragung wurde über eine in die Szenen eingefügte 2 m-Basislatte realisiert.



**Abb. 5.9:** Projizierte Targets auf der Oberfläche einer Testfeld-Kalibrierplatte (Messbild).

Die photogrammetrischen Aufnahmen wurden mit einer Teilmesskamera ROLLEI 6006 metric und 50 mm Objektiv durchgeführt. Dabei wurden 4 bzw. 5 Bilder der entsprechenden Kalibrierplatten gewonnen. Vor der Verarbeitung in der Bündelblockausgleichung wurden die analogen Aufnahmen digitalisiert. Nach einer Réseaumessungen zur Bestimmung der inneren Orientierung der Einzelbilder wurden die Bildkoordinaten der projizierten Zielmarken mittels Bildzuordnungsalgorithmen (Matching) automatisch gemessen, anschließend erfolgte die Berechnung aller Unbekannten (Objektkoordinaten aller Messpunkte, äußere Orientierung der Messkamera) in einer Bündelblockausgleichung. In der Bündelblockausgleichung mit PICTRAN [Pictran, 2002] wurden Standardabweichungen der Objektpunktkoordinaten von ca. 0,2 mm - 0,5 mm berechnet.



**Abb. 5.10:** Häufigkeit der Abweichungen von der ausgeglichener Ebene der schräg angebrachten Kalibrierplatte (Nummer 9) – Angabe in [mm].

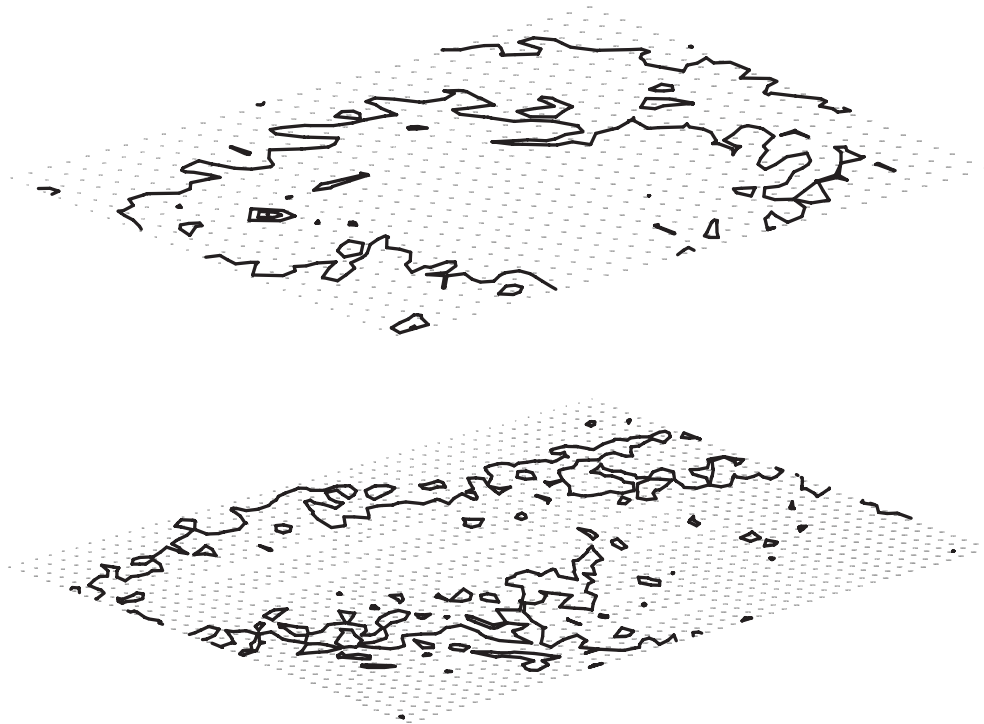
Die anschließende Ebenenausgleichung aller Objektpunkte *einer* Testfeldkalibrierplatte erlaubt eine statistische Abschätzung der Ebenheit der Platten, dargestellt in Abbildung 5.10 und aufgelistet in Tabelle 5.3. Bei beiden untersuchten Platten beträgt die maximale Abweichung der beteiligten Objektpunkte von der ausgeglichenen Ebene ca. 1 mm. Bei der Kalibrierplatte mit der (internen) Nummer 3 mussten aufgrund von Punktverwech-

Statistik zur Ebenenausgleichung zweier Testfeld-Kalibrierplatten		
Plattennummer	<b>3</b>	<b>9</b>
Anbringung	vertikal	schräg
Anzahl Targets	771	1481
eliminierte Beobachtungen	3	-
max. Abstand von ausgeglichener Ebene	1,1 mm	1,0 mm

**Tabelle 5.3:** Untersuchungen zur Ebenheit ausgewählter Testfeld-Kalibrierplatten.

selungen in der Bündelausgleichung im Zuge der dreidimensionalen Ebenenausgleichung drei Punkte eliminiert werden, hingegen nahmen für die Bestimmung der Parameter der ausgeglichenen Ebene für die Platte mit der (internen) Nummer 9 alle Punkte an der Ausgleichung teil.

Um eine eventuelle Aufwölbung oder Durchbiegung der Platten zu erfassen, wurden in einer sich anschließenden Untersuchung Höhenlinien auf den Platten abgeleitet. Diese Höhenlinien, dargestellt in Abbildung 5.11, lassen für die Platte mit der Nummer 9 jedoch keine Aufwölbungen oder Durchbiegungen erkennen. Bei Betrachtung der Höhenlinien der Platte 3 lässt sich hingegen eine kleine Aufwölbung<sup>7</sup> zur Plattenmitte hin feststellen. Da der Betrag dieser Aufwölbung aber nur ca. 1 mm beträgt, wird diese Kalibrierplatte im Kalibrierprozesses weiter verwendet.



**Abb. 5.11:** Höhenlinienmodell der vertikal angebrachten Kalibrierplatte Nr. 3 (oben) und Höhenlinienmodell der schräg angebrachten Kalibrierplatte Nr. 9 (unten) – der Abstand der Höhenlinien beträgt in beiden Modellen 0,5 mm.

## 5.6 Ablauf einer Kalibrierung

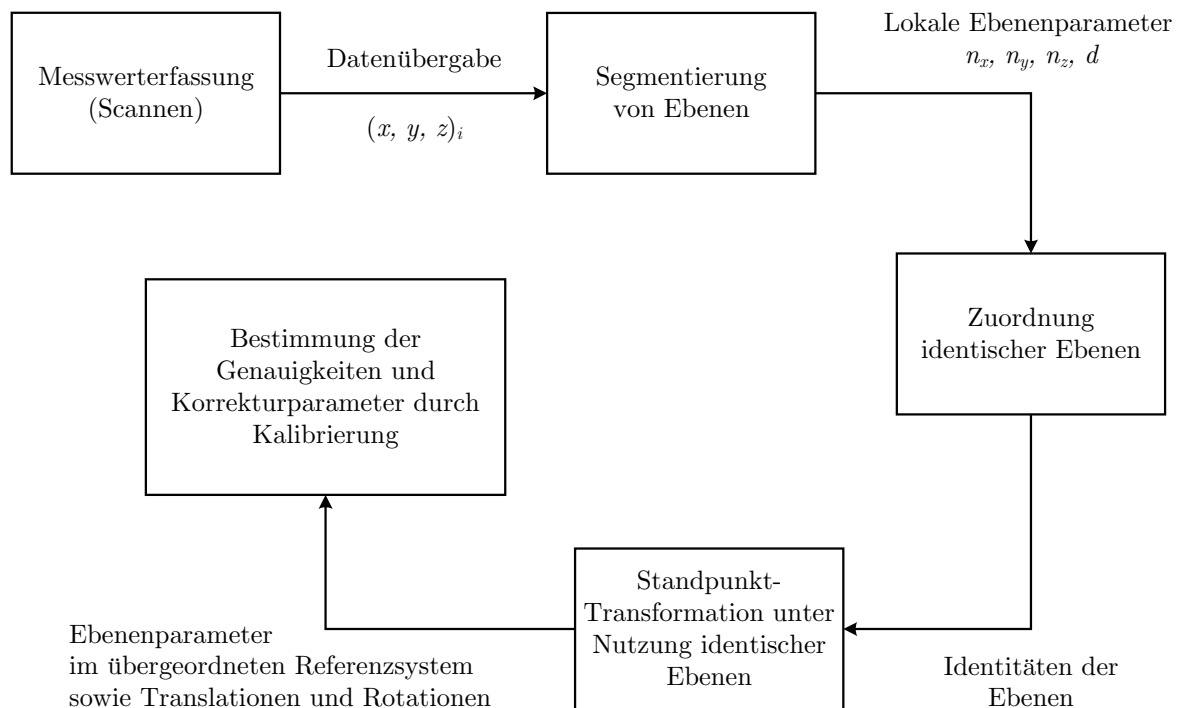
Die Messwerterfassung erfolgt mit dem zu untersuchenden Instrument vor Ort im Testfeld. Erste Untersuchungen in [Alder, 2003] haben ergeben, dass eine optimale und wirtschaftlich sinnvolle Bestimmung der Instrumentenfehler mit vier unterschiedlichen Instrumentenstandpunkten (Aufstellungen) im beschriebenen Testfeld durchzuführen ist. Diese Angabe wird durch die Ergebnisse der Simulationsberechnungen nach Kapitel 5.4

<sup>7</sup>Die Größenordnung dieser Aufwölbung ist auch mit „bloßem Auge“ bei Ansicht der Kalibrierplatte durch den Betrachter zu erfassen.

bestätigt. Die Kalibrierstandpunkte müssen gleichmäßig verteilt werden, wobei die Höhe der verschiedenen Aufnahme­standpunkte im Testfeld variiert werden sollte, um auch an den horizontal angebrachten Kalibrier­platten unterschiedliche Auftreffwinkel des Messstrahles zu gewährleisten. Des Weiteren wird auf diese Weise versucht, den Einfluss von schleifenden Schnitten auf der Oberfläche der Kalibrier­platten bei kurzen Zielweiten zu minimieren. Sicherlich ist hier ein Kompromiss zwischen baulichen Gegebenheiten hinsichtlich Raumhöhe und Aufstellmöglichkeiten mittels Stativen oder Zwangszentrierung auf Pfeilern zu finden.

Nach dem Scannen der Kalibrier­platten und/oder der gesamten Szenerie von unterschiedlichen Standpunkten, liegen die originären Beobachtungsdaten eines Scans vor. Dies sind dreidimensionale polare Koordinaten - Richtungen  $\phi$ ,  $\Theta$  und Schrägstrecken  $S$ . Das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Standpunktes ist hierbei durch die temporäre Position und die Orientierung des Messinstrumentes definiert.

Lassen sich hingegen nur die kartesischen Koordinaten der Objektpunkte aus den zu untersuchenden Instrumenten abspeichern und somit einer Weiterverarbeitung zuführen, so müssen diese in Polarkoordinaten nach Gleichung 3.4 umgewandelt werden, da nur diese Messwerte in den Kalibrierprozess einfließen. Dieser Auswertungsschritt ist zulässig, da in Abschnitt 5.4 nachgewiesen wurde, dass aus den kartesischen Koordinaten die polaren Beobachtungsgrößen abgeleitet werden können, ohne die Gültigkeit des Kalibrieransatzes zu verletzen. Somit ist auch eine Kalibrierung von Instrumenten möglich, die dem Nutzer keine Originalmesswerte zur Verfügung stellen.



**Abb. 5.12:** Ablaufplan einer Kalibrierung von der originären Messwernerfassung bis zur Bestimmung der Instrumentenfehler [Rietdorf u. a., 2004].

Nach der Übergabe der originären, oder bereits gewandelter Messdaten an die Auswertesoftware werden in einem Prozess der Segmentierung die in den aufgenommenen Szenerien enthaltenen Ebenen automatisch extrahiert<sup>8</sup> und einer Ebenenausgleichung zugeführt, bei der eventuelle Ausreißer im Beobachtungsmaterial entfernt werden. Dieser Verarbeitungsschritt erfolgt standpunktweise, d. h. als Ergebnis dieses Verarbeitungsschrittes liegen die beschreibenden lokalen Ebenenparameter Normalenvektor  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$  und  $d$  als orthogonaler Abstand zum Koordinatenursprung vor.

In einem sich daran anschließenden automatischen Prozess der Zuordnung von homologen Ebenen werden die Identitäten der Ebenen auf unterschiedlichen Standpunkten festgestellt. Die so gefundenen identischen Ebenen werden in einem nächsten Schritt zur Transformation der lokalen Standpunktsysteme in ein übergeordnetes

<sup>8</sup>Teilweise ist es günstiger, die vom jeweiligen Hersteller zu den Laserscannern vertriebene Software für diesen Prozess zu nutzen, da dort die Möglichkeit der Zuschneidung der Punktwolke gegeben ist. Anschließend können beim Vorliegen eines ASCII-Exportfilters o. ä. die betreffenden Messwerte gespeichert und der weiteren Verarbeitungskette zugeführt werden.

und/oder gemeinsames Koordinatensystem benutzt. Dabei wird unter Verzicht auf identische Passpunkte eine verkettete Systemtransformation mittels identischer Ebenen durchgeführt, in der beliebig viele lokale Standpunktsysteme simultan in ein übergeordnetes Referenzsystem überführt werden können. Die Orientierungsparameter der verschiedenen Standpunktsysteme (Translationen und Rotationen) gehen dabei als Näherungswerte in die eigentliche Bestimmung der Kalibrierparameter ein.

Der zeitliche Bedarf für eine Kalibrierung ist zum einen abhängig von der Messgeschwindigkeit des zu untersuchenden Instrumentes, und zum anderen von der eingesetzten Strategie zur Vorverarbeitung der Messwerte (Ausdünnung der Messwert, Selektion der Ebenen, usw.) bzw. dem zur Verfügung stehenden Automatisierungsgrad. Dabei spielt der zeitliche Aufwand der Messdatenerfassung im Kalibrierfeld im Gegensatz zur Auswertung eine untergeordnete Rolle. Das für Messaufgaben mit Laserscannern verbundene typische Verhältnis des zeitlichen Bedarfs an Erfassungs- zu Auswerteaufwand von 1:3 bis 1:5 trifft generell für eine Kalibrierung im oben beschriebenen Testfeld und die Auswertung auch hier zu.

## 5.7 Ergebnisse

Als beispielhafte Auswertungen sollen hier die Ergebnisse für Kalibrierungen ausgewählter Instrumente präsentiert werden. Als Beispiel für einen Sensor mit vergleichsweise großen Instrumentenfehlern dient der in Kapitel 2.4 beschriebene Prototyp POMES, der aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften alle beschriebenen Instrumentenfehler aufweist. Als Beispiel für die Kalibrierung eines aktuellen Laserscanners dient der *Imager 5003* Sensor der Firma ZOLLER+FRÖHLICH.

### Prototyp PoMeS

Der Prototyp des polaren Messsystems POMES wurde im Testfeld unter Nutzung von vier Instrumentenstandpunkten kalibriert. Da die Messung von einem Standpunkt auf eine Kalibrierplatte aufgrund einer Verdeckung nicht möglich war, gehen in die Parameterschätzung nur 59 Ebenen ein. Aufgrund der hohen Redundanz spielt dies jedoch zur Bestimmung der Kalibrierparameter eine untergeordnete Rolle. Eine Reduktion der Messdaten auf eine sinnvolle, d. h. programmtechnisch beherrschbare Anzahl von Beobachtungen wurde bei diesem Instrument nicht durchgeführt, da bei der Messdatenerfassung bereits darauf geachtet wurde, die zur Kalibrierung heran zu ziehende Datenmenge zu begrenzen. Somit ergibt sich eine Statistik der Parameterschätzung, die in Tabelle 5.4 dargestellt ist.

Ergebnisse der Kalibrierung PoMeS	
<b>Ausgleichsstatistik</b>	
Beobachtungen	6323
Unbekannte (Bedingungen)	98 25
Redundanz	6250
<b>Genauigkeit der Beobachtungsgruppen</b>	
Horizontalrichtungen $s_\phi$	0,0090 gon
Zenitdistanzen $s_\Theta$	0,0103 gon
Raumstrecken $s_S$	0,00082 m

**Tabelle 5.4:** Statistik der Parameterschätzung zur Kalibrierung des polaren Messsystems POMES.

Aufgrund der Beobachtungsanzahl von 6323 und der Anzahl der unbekannt Parameter ergibt sich ein Redundanz der Ausgleichung von 6250 und ein mittlerer Redundanzanteil von 0,98, was sich wiederum in einer hohen Bestimmungsichte<sup>9</sup> ausdrückt.

In Tabelle 5.5 sind die Ergebnisse der Parameterschätzung aufgeführt, wobei im Falle des untersuchten POMES der Höhenindexfehler nicht als Instrumentenfehler in die Parameterschätzung eingeführt wurde, sondern als Aufstellungsfehler für jeden Standpunkt berechnet wurde. Dies ist zulässig, da aufgrund der mechanischen Konstruktion die Horizontierung nur durch Einspielen der Alhidadenlibelle in einer fest vorgegebenen Schrittweite von 0,1 gon erfolgen kann und sich auch in den in Tabelle 5.6 dargestellten Ergebnissen widerspiegelt.

<sup>9</sup>Die Bestimmungsichte ist eine Angabe über das relative Verhältnis der Anzahl an Beobachtungen gegenüber der Anzahl an zu schätzenden Parametern [Niemeier, 2002]; bei einer unendlichen Anzahl an Beobachtungen wird die Bestimmungsichte eins.



Ergebnisse der Kalibrierung PoMeS			
Kalibrierparameter			
Kalibrierparameter	Wert	Standardabweichung	Prüfgröße des t-Tests
Zielachsenfehler	-305,88 mgon	14,16 mgon	21.609
Kippachsenfehler	-35,10 mgon	2,66 mgon	13.193
Höhenindexfehler	-	-	-
Nullpunktkorrektur	72,61 mm	0,13 mm	547.818
Maßstab	1,00	-	-
Achsexzentrizität $e_{vh}$	-0,52 mm	0,15 mm	3.551
Achsexzentrizität $e_{vz}$	1,12 mm	0,08 mm	13.964
Achsexzentrizität $e_{hz}$	-0,48 mm	0,22 mm	2.189

**Tabelle 5.5:** Ausgeglichene Parameter der Kalibrierung des polaren Messsystems PoMeS.

Die Bestimmung der Nullpunktkorrektur  $k_0$  erfolgte mit einem numerischen Wert von 72,6 mm. Dieser Schätzwert stimmt mit der Parameterschätzung im GAUSS-MARKOV-Modell, erhalten aus den Messungen auf einer Kalibrierstrecke bestehend aus 5 in einer räumlichen Flucht stehenden Stative, auf einen Millimeter überein. Rechnerisch ergab sich dort eine Nullpunktkorrektur von 71,6 mm. Die verbliebene Abweichung zwischen diesen beiden Schätzwerten lässt sich durch den hohen Korrelationskoeffizienten von -0,63 zwischen den Schätzungen der Nullpunktkorrektur  $k_0$  und der Achsexzentrizität  $e_{vh}$  erklären, da die Achsexzentrizität  $e_{vh}$  im vorliegenden Fall mit einem halben Millimeter signifikant bestimmt wurde und sich die Effekte addieren.

Ergebnisse der Kalibrierung PoMeS		
Standpunktabhängiger Höhenindexfehler		
Standpunkt	$h(h_a + h_m)$ [gon]	$s_h$ [gon]
1	0,1192	0,007
2	0,1259	0,008
3	0,1145	0,006
4	0,0423	0,006

**Tabelle 5.6:** Standpunktabhängiger Höhenindexfehler bei der Kalibrierung des polaren Messsystems PoMeS.

Ergebnisse der Kalibrierung PoMeS			
Genauigkeit der Ebenenparameter $n_x, n_y, n_z, d$			
Standardabweichung der Ebenenparameter	minimal [mm]	maximal [mm]	Mittelwert [mm]
$s_{n_x}$	0,028	0,264	0,193
$s_{n_y}$	0,155	0,262	0,188
$s_{n_z}$	0,002	0,237	0,137
$s_d$	0,274	1,318	0,752

**Tabelle 5.7:** Genauigkeit der Ebenenparameter  $n_x, n_y, n_z$  und  $d$  bei der Kalibrierung des polaren Messsystems PoMeS.

Auf die Bestimmung eines Maßstabes wurde verzichtet, da eine Aussage über die Maßstabsinformation im hier vorgestellten Testfeld nur aus relativ kurzen Strecken ableitbar wäre. Aufgrund der maximalen Zielweite von ca. 8 Metern sollte die Maßstabsinformation nicht auf längere Strecken als die im Kalibrierfeld zur Verfügung stehenden extrapoliert werden. Aus diesem Grund wird der Maßstab nicht mitbestimmt, könnte aber durch das Freigeben der Normierung des Quaternions, welches die Stehachsschiefe und die Orientierung repräsentiert, bestimmt werden. Eine anderes Vorgehen ist durch das in Kapitel 4.3.5 beschriebene Vorgehen möglich. Durch Nutzung einer Zwangszentrierung und Bestimmung von Vergleichskordinaten mit einem Messverfahren höherer

Genauigkeit (Tachymeternetz) ist eine Ableitung des Maßstabes über den Vergleich der Translationsbeträge in einer 3D-HELMERT-Transformation durchführbar.

Neben den eigentlichen Kalibrierparametern ist eine Angabe der Standpunktparameter (Translationen und Rotationen) zur Überprüfung der Kalibrierergebnisse möglich. Eine Betrachtung der Ebenenparameter, vgl. Tabelle 5.7, gibt Auskunft über die Güte der Ebenheit der Kalibrierplatten. Die Bestimmung der Komponenten der Normalenvektoren der an der Kalibrierung beteiligten Ebenen gelingt im Schnitt mit einer Genauigkeit von  $s_{n_x} = s_{n_y} = s_{n_z} \approx 0,2$  mm und der Ebenenparameter  $d$  wird mit einer Genauigkeit im Mittel von  $s_d \approx 0,7$  mm ermittelt.

### Laserscanner Zoller+Fröhlich Imager 5003

Um den vorgestellten Ansatz der Kalibrierung auf Tauglichkeit hinsichtlich eines Einsatzes zur Kalibrierung von aktuellen Laserscannern beurteilen zu können, wurde ein *Imager 5003* Sensor der Firma ZOLLER+FRÖHLICH im Testfeld einer Kalibrierung unterzogen.



**Abb. 5.13:** Laserscanner ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003.

Der ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003, dargestellt in Abbildung 5.13, verfügt über die Option, die Distanzbestimmung in zwei unterschiedlichen Eindeutigkeitsbereichen vorzunehmen, die als *close* (Eindeutigkeitsbereich 25,2 m) und *far* (Eindeutigkeitsbereich 53,3 m) bezeichnet werden. Dieser Laserscanner geht auf Arbeiten von [Fröhlich, 1996] zurück und beruht auf einem zweifrequenten Phasendifferenzverfahren, d. h. einer gleichzeitigen Intensitätsmodulation des ausgesandten Trägersignals mit zwei Sinussignalen verschiedener Frequenzen. Die Komponente zur Bestimmung einer eindeutigen Grobentfernung hat je nach Ausführung eine Frequenz von  $f_{1(25,2m)} = 5,5$  Mhz bzw.  $f_{1(53,5m)} = 2,8$  Mhz. Die zur präzisen Bestimmung verwendete Feinkomponente weißt eine Frequenz von  $f_2 = 44,8$  Mhz auf. Das zurückgestreute und detektierte Signal beinhaltet die Phasenverschiebung beider Modulationsfrequenzen. Durch frequenzselektive Verrechnung der Phasendifferenzen ergibt sich eine absolute ( $f_1$ ) und präzise ( $f_2$ ) Distanzmessung [Fröhlich, 1996].

Zusätzlich zur Distanzmessung werden Reflektivitätswerte gemessen, die den Amplitudenwerten der zurückgeworfenen Messsignale entsprechen. Somit ist bei diesem System eine gleichzeitige Streckenmessung und



Reflektivitätsbestimmung zu einem Messpunkt im Raum direkt möglich. Der Scanner gehört zur Gruppe der Panoramascanner und verfügt über einen horizontalen Messbereich von  $360^\circ$  und einen vertikalen Messbereich von  $310^\circ$ . Zur Überlappung der horizontalen Seitenränder des Gesichtsfeldes wird bei einem Rundum-Scan ein  $2^\circ$  breiter Streifen doppelt aufgenommen.

Die primäre Rotation um die horizontale Achse wird durch ein schnell rotierendes Prisma vorgenommen. Die Drehung um die vertikale Achse erfolgt auf Grundlage von Servomotoren. Der Abgriff der Teilkreise zur Winkelmessung erfolgt inkrementell. Der Encoder für den Abgriff des Horizontalkreises weist 36.000 Teilungen auf. Hingegen ist der Abgriff für die schnelle rotatorische Komponente des sich mit 25 Hz drehenden Prismas durch einen Encoder mit 20.000 Teilungen realisiert. Beide Encoder sind ohne Zwischenkupplungen direkt auf der Welle montiert und besitzen somit kein Spiel.

Die Datenerfassungsrate liegt aufgrund des Phasenmessprinzips bei bis zu 625.000 Punkte/sec., die typische Datenerfassungsrate wird mit 125.000 Punkten/sec. angegeben [Zoller+Fröhlich, 2004]. Der Scanner verfügt über eine zusätzlich montierte Alhidadenlibelle. Somit besteht die Möglichkeit, den Sensor an der Lotrichtung auszurichten. Der Scanner, der die Datenerfassung in drei verschiedenen Auflösungsstufen vornehmen kann, wurde lt. Firmenangabe im Februar 2004 kalibriert.

<b>Ergebnisse der Kalibrierung Zoller+Fröhlich Imager 5003</b>	
<b>Ausgleichungsstatistik, Auflösung: High</b>	
Beobachtungen	7606
Unbekannte (Bedingungen)	92 25
Redundanz	7539
<b>Genauigkeit der Beobachtungsgruppen</b>	
Horizontalrichtungen $s_\phi$	0,0122 gon
Zenitdistanzen $s_\Theta$	0,0235 gon
Raumstrecken $s_S$	0,0024 m

**Tabelle 5.8:** Statistik der Parameterschätzung zur Kalibrierung des Laserscanners ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003, am Beispiel der Auflösung „High“.

Im Testfeld wurden mit allen drei Auflösungen (*Super High*, *High* und *Middle*) Testdatensätze erzeugt und dem oben beschriebenen Auswerteprozess zugeführt. Im Rahmen dieses Auswerteprozesses wurden in einem Vorverarbeitungsschritt die Daten so ausgedünnt, dass ca. 120 Punkte pro beobachtete Testfeldplatte in den Kalibrierprozess eingeflossen sind.

<b>Ergebnisse der Kalibrierung Zoller+Fröhlich Imager 5003</b>			
<b>Ausgleichungsstatistik, Auflösung: High</b>			
Kalibrierparameter	Wert	Standardabweichung	Prüfgröße des t-Tests
Zielachsenfehler	0,00 mgon	0,00 mgon	-
Kippachsenfehler	0,00 mgon	0,00 mgon	-
Höhenindexfehler	0,00 mgon	0,00 mgon	-
Nullpunktkorrektur	0,73 mm	0,36 mm	2,031
Maßstab	1,00	0,00	-
Achsexzentrizität $e_{vh}$	-1,68 mm	0,48 mm	3,463
Achsexzentrizität $e_{vz}$	0,54 mm	0,19 mm	2,809
Achsexzentrizität $e_{hz}$	1,50 mm	0,30 mm	5,062

**Tabelle 5.9:** Ausgeglichenen Parameter der Kalibrierung des Laserscanners ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003, am Beispiel der Auflösung „High“.

In einem ersten Schritt der Kalibrierung wurde eine Überprüfung vorgenommen, ob ein signifikantes Anwachsen des Schätzwertes der empirischen Standardabweichung der Gewichtseinheit  $s_0$  – a posteriori (Varianzfaktor) auftritt, wenn die Kalibrierparameter im Ausgleichungsprozess auf Null gezwungen werden. Dazu wurden die Verbesserungsquadratsummen nach Gleichung 5.42 der Einzelausgleichungen (Kalibrierparameter frei und ge-

zwungen) einem Globaltest unterzogen, der anzeigt, dass beim Freigeben der Kalibrierparameter ein optimales Kalibrierergebnis erhalten wird. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Schätzung der Kalibrierparameter, vgl. Tabelle 5.9, ist festzustellen, dass bei dem untersuchten Sensor keine Achsenfehler auftreten und sich die Bestimmung der Nullpunktkorrektur aufgrund der Korrelation der Achsexzentrizität  $e_{vh}$  mit der Nullpunktkorrektur nicht eindeutig festlegen lässt. Des Weiteren befindet sich die Prüfgröße der Nullpunktkorrektur zur Durchführung des Signifikanztests unmittelbar an der Nachweisgrenze, ist also ebenfalls hinsichtlich einer Signifikanz kritisch zu beurteilen.

Die Angabe eines Maßstabsfaktors ist mit dem in Kapitel 4.3.6 beschriebenen Vorgehen möglich, obgleich das im vorangegangenen Abschnitt bei der Auswertung der Daten des POMES kritisch zu betrachtende Vorgehen der Maßstabsbestimmung mit kurzen Strecken hier ebenfalls zutrifft. Dennoch ergibt sich ein Maßstab für die Auflösung *High* von  $0,999919 \sim 80$  ppm, d. h. ca. 0,1 mm/m.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der anderen Auflösungen *Middle* und *Super High* lassen sich Ergebnisse für die Beobachtungsgruppen in der gleichen Größenordnung feststellen. Die aus den Parameterschätzungen ermittelten Genauigkeiten der Beobachtungsgruppen nehmen jedoch leicht von der Auflösung *Middle* bis zur Auflösung *Super High* zu. Diese Feststellung deckt sich nicht mit den in [Staiger und Ettl, 2003] dargestellten Ergebnissen, die besagen, dass die Streckenmessgenauigkeit der Auflösungsstufe *Middle* wesentlich schlechter ist als die höher aufgelösten Datenerfassungsraten. Die Herstellerangaben [Zoller+Fröhlich, 2004] gehen von einer Streckenmessgenauigkeit von 3 mm (bei einem Eindeutigkeitsbereich von 25,2 m) sowie einer horizontalen und vertikalen Winkelgenauigkeit von  $0,02^\circ$  rms<sup>10</sup> aus. Die aus den Parameterschätzungen erhaltenden Genauigkeitsangaben für die Beobachtungsgruppen werden für die Streckenmessgenauigkeit und die vertikale Winkelgenauigkeit bestätigt. Hingegen ist die horizontale Winkelgenauigkeit um den Faktor zwei genauer als die vertikale Winkelgenauigkeit.

## Zusammenfassung

Das oben beschriebene Vorgehen zur Kalibrierung von polaren Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip ist besonders geeignet zur Bestimmung von Instrumentenfehlern, die die Richtungsmess- oder Richtungsabgriffkomponenten der Sensoren betreffen. Des Weiteren ist es mit der so vorgenommenen Parametrisierung möglich, die Nullpunktkorrektur zu bestimmen und Aussagen zur Streckenmessgenauigkeit zu treffen. Neben der Ableitung von Kalibrierparametern ist ein Vergleich mit den Genauigkeitsangaben der Hersteller für die Richtungs- und Streckenmessung in einem Auswerteprozess möglich. Dabei wird diese Kalibrierstrategie als ein Verfahren zur Überprüfung der Messinstrumente vor der eigentlichen Nutzung des Messinstrumentes angesehen. Eine regelmäßige Folgeuntersuchung ist jedoch genauso möglich wie eine Neubestimmungen oder Überprüfung der Kalibrierparameter nach einem außergewöhnlichen Ereignis, beispielsweise längere Einsätze unter klimatisch extremen Bedingungen oder beim Verdacht auf Transportschäden.

Auf die Bestimmung von Auflösungsvermögen, Rauschen sowie Reichweite und Einflüssen hervorgerufen von unterschiedlichen Materialien und Auftreffwinkel des Messstrahls verbunden mit Untersuchungen zum Verhalten der Messungen an Kanten wird in diesem Ansatz der Kalibrierung nicht eingegangen. Derartige Untersuchungen führt z. B. [j3mainz, 2004] für (fast) alle auf dem aktuellen Markt befindlichen Laserscanner durch.

## 5.8 Erweiterung der Kalibrierstrategie

Zur Kombination von mit Laserscannern aufgenommenen Informationen – in der Regel  $x, y, z$  - Koordinaten und Intensitätswerte diskreter Punkte von Objekten oder Objektausschnitten – mit photogrammetrisch aufgenommenen Bildern werden hauptsächlich CCD-Kameras eingesetzt. Die Hersteller der Laserscanning-Hardware reagieren auf derartige Entwicklungen zur zusätzlichen Informationsgewinnung mit der Kombination der Vorteile der beiden Technologien Laserscanning und Photogrammetrie durch die direkte Einbindung von Digitalkameras in die Scannerhardware (beispielsweise LEICA HDS 3000 [Leica Geosystems, 2004] und CALLIDUS [Kern, 2003]) sowie durch die Möglichkeit, auf dem Gehäuse des Laserscanners eine Digitalkamera zu montieren [Ullrich u. a., 2003]. Die Auswertung der verschiedenen Daten erfolgt dann meist in einer gemeinsamen Stationsausgleichung, die es ermöglicht, die detailreicheren Digitalbilder im Nahbereich mit den Laserscannerdaten zu koppeln.

Diese Digitalkameras sind hinsichtlich der verfügbaren Auflösung und aufgrund ihrer nicht-stabilen Aufnahmegeometrie meist nicht für die Anforderungen konzipiert, die an photogrammetrische Messkameras gestellt

<sup>10</sup>Die Formeln zur Berechnung der Standardabweichung bzw. eines RMS (root mean square) – Wertes unterscheiden sich. Bei einer genügend hohen Anzahl an Beobachtungen  $n \rightarrow \infty$  entspricht der RMS – Wert jedoch der empirischen Standardabweichung.

werden. Die Hauptforderung für eine photogrammetrische Objektrekonstruktion ist die Einhaltung der zentralperspektivischen Abbildung, jedoch ist die Abweichung von einer idealen Kamera aufgrund verschiedener Einflüsse immer gegeben. Das Bestreben ist nunmehr, durch geeignete Maßnahmen diesen Idealfall der Lochkamera wieder herzustellen. Dies gelingt bei einer Aufnahmekamera durch die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung, d. h. durch die Beschreibung der Lage des Projektionszentrums im kamerafesten Bildkoordinatensystem sowie durch die Modellierung der Abweichungen vom mathematischen Modell der Zentralperspektive, vgl. Abbildung 5.14. Die innere Geometrie der oben beschriebenen Kameras ist meist nicht bekannt und kann sich durch Fokussieren verändern. Hinzu kommen die Verzeichnung der Optiken und Effekte des CCD-Sensors [Maas, 1997] sowie Veränderungen der Bauteile im meist geringwertigen Gehäuse.

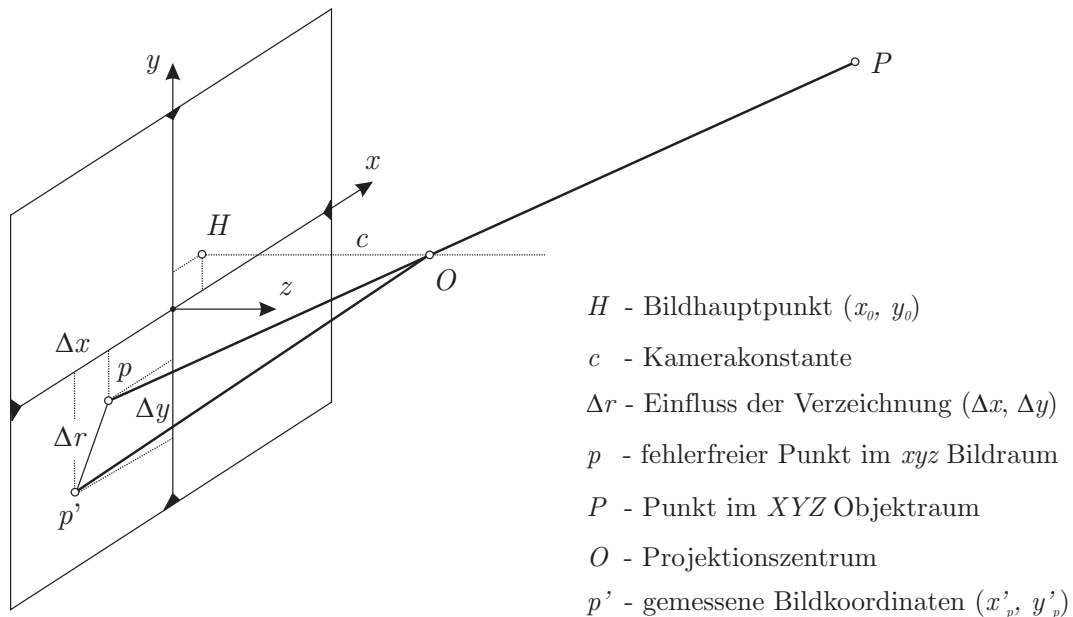


Abb. 5.14: Parameter der inneren Orientierung, nach [Luhmann, 2003].

### Allgemeine Ansätze zur Kalibrierung von Digitalkameras

Zur Kalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmesystemen sind verschiedene Methoden entwickelt worden, die sich nach [Luhmann, 2003] in drei Hauptverfahren, je nach Art des Testkörpers und der zur Anwendung kommenden Messmethode, unterscheiden lassen:

- **Laborkalibrierung:** Laborkalibrierungen werden nur bei Messkameras mittels eines optischen Goniometers [Kraus, 1994] oder eines Kollimators unter definierten Bedingungen hinsichtlich der Temperatur und des Luftdruckes in einem Prüflabor vorgenommen.
- **Testfeldkalibrierung:** Hierbei wird ein Objektpunktfeld, welches über eine möglichst große Anzahl signalisierter Messpunkte verfügt, formatfüllend und von mehreren Kamerastandorten aufgenommen. Dabei können die Messpunkte mit bekannten Koordinaten versehen sein oder es können in der Auswerteprozess geeignete Zusatzinformationen, beispielsweise mit höherer Genauigkeit bestimmte Strecken integriert werden.

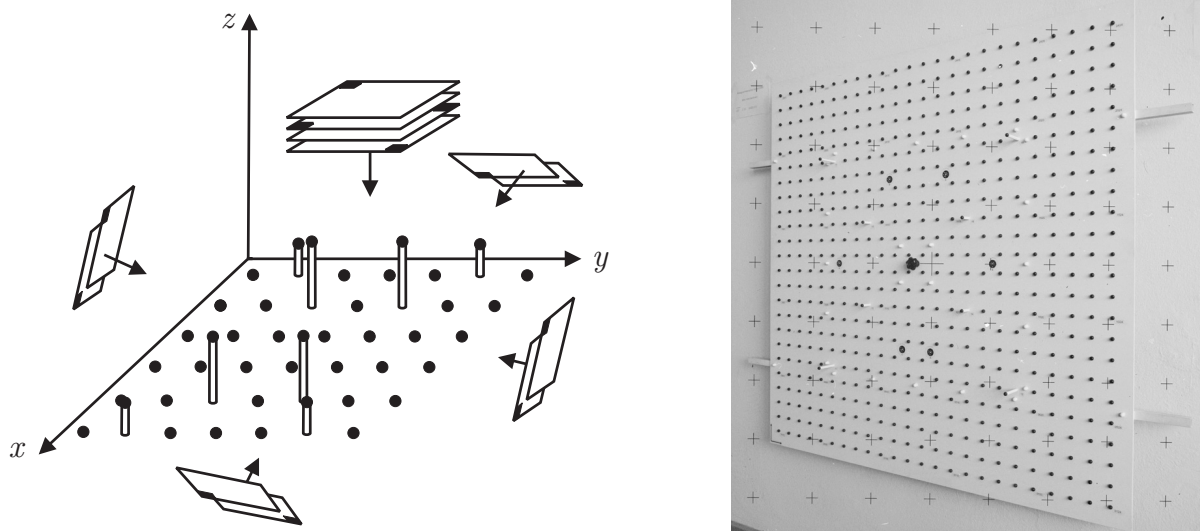
Einen Zwischenschritt zwischen der Testfeldkalibrierung und der Simultankalibrierung stellt die **on-the-job Kalibrierung** dar. Bei dieser Methode wird die eigentliche Objektaufnahme mit der Testfeldkalibrierung verbunden, indem ein geeignetes Kalibrierobjekt mit in die Objektaufnahme eingebracht wird. Dies ist der Fall, wenn das eigentliche Messobjekt nicht über derartige Strukturen verfügt, die eine Selbstkalibrierung ermöglichen.

- **Simultankalibrierung:** Die Simultankalibrierung ist eine Erweiterung der oben beschriebenen Verfahren in der Art, dass die Kalibrierung der verwendeten Messkamera mit den Aufnahmen durchgeführt wird, die zur Objektauswertung angefertigt werden. Dabei muss auf eine gute Schnittgeometrie der Strahlenbüschel,

auf eine Kantung der Kamera zwischen den verschiedenen Aufnahmen und auf eine räumliche Tiefeninformation des zu untersuchenden Objektes geachtet werden. Die innere Orientierung wird nunmehr allein durch die Erfassung der Objektform bestimmt, da für diesen Ansatz keine Informationen über die Koordinaten von Passpunkten bekannt sein müssen. Die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung erfolgt im Zuge der Auswertung durch eine Bündelausgleichung und die Schätzung der zu bestimmenden Parameter im Modell selbst. Eine Schwierigkeit bei der Anwendung dieser Kalibrierstrategie ist die Bereitstellung geeigneter Strukturen am Objekt zur genauen Messung der Bildkoordinaten.

In den letzten Jahren sind verschiedene mathematische Ansätze zur Kamerakalibrierung in der Literatur diskutiert worden, siehe z. B. [Tsai, 1986], [Fraser, 1997], [Gruen und Beyer, 2001], [Hastedt u. a., 2002] und [Rodehorst, 2004]. Die am häufigsten angewendete und für hochgenaue Aufgabenstellungen am Besten geeignete Strategie ist die Testfeldkalibrierung im Vorfeld der Messungen, vgl. Abbildung 5.15 und [VDI/VDE, 2002], oder als Simultankalibrierung im eigentlichen Messprozess integriert [Peipe und Yu, 2003].

Die rechnerische Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung beruht auf dem Aufbau eines Gleichungssystems mit den Objektkoordinaten aller Punkte und den Daten der inneren und äußeren Orientierung als Unbekannte. Die Bildkoordinaten und meist auch die Objektkoordinaten der Passpunkte werden als Beobachtungen eingeführt, das Gleichungssystem wird linearisiert und in einem iterativen Ausgleichungsprozess nach der Methode der kleinsten Quadrate gelöst.



**Abb. 5.15:** Anordnung der Messbilder über einem dreidimensionalen Testfeld zur Kalibrierung von Kameras (links) und Ausschnitt eines Testfelds (rechts).

Kameras mit Zoom-Objektiven lassen sich in der Gestalt kalibrieren, dass für verschiedene Zoom- und Fokusstellungen der Objektive eine Standardkalibrierung nach oben beschriebenen Verfahren durchgeführt wird. Anschließend lassen sich die Parameter zum späteren Feldgebrauch in einer lookup table speichern und/oder durch eine Polynomapproximation kann jeder Parameter als eine Funktion der Brennweite dargestellt werden [Mikhail u. a., 2001]. Bei Nutzung eines photogrammetrischen Auswerteprogramms lassen sich die kameraspezifischen Parameter in einer Datenbank ablegen und werden automatisch im Auswerteprozess berücksichtigt.

Werden die Parameter der inneren Orientierung exakt bestimmt und ist die äußere Orientierung, d. h. die Lage des Projektionszentrums der Kamera im Koordinatensystem der Laserscanneraufnahmen bekannt, so lassen sich die Vorteile der schnellen Geometriedatenerfassung der scannenden Systeme mit der bildhaften Erfassung auf Grundlage der Kamerabilder kombinieren und z. B. für die Erstellung von differentiellen Entzerrungen hoher Qualität nutzbringend anwenden.

## 5.9 Diskussion

In diesem Kapitel ist ein Verfahren zur Kalibrierung für scannende Instrumente, die nach dem tachymetrischen Messprinzip arbeiten, vorgestellt und anhand zweier Beispiele getestet worden. Neben der Ableitung von instrumentenspezifischen Parametern ist eine Bestimmung der Messgenauigkeiten für die einzelnen Komponenten dieser Instrumente möglich. Wie gezeigt, gelingt die Bestimmung der Instrumentenfehler in den Grenzen der Messgenauigkeit des Instrumentes selber. Als schwierig gestaltet sich hingegen aufgrund der räumlichen Einschränkung in der Größe des Kalibrierraumes die Bestimmung eines Maßstabsfaktors. Hier gilt es, die Untersuchungen auszuweiten und gegebenenfalls die Abmessungen des Kalibrierraumes zu erweitern. Des Weiteren sollten Kalibrierplatten eingesetzt werden, bei denen die Ebenheit über die gesamte Ausdehnung der Fläche garantiert ist. Diese mit einem Verfahren höchster Genauigkeit (Lasertracker, u. ä.) erfassten Flächen, würden als Referenzebenen in den Kalibrierprozess eingeführt, eine sinnvolle Bestimmung des Maßstabes ermöglichen.

Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass bei der Kombination von scannenden Instrumenten mit hochauflösenden CCD-Kameras zur Ausschöpfung des vollen Genauigkeitspotentials auch diese CCD-Kameras einem regelmäßigen Kalibrierungsprozess zu unterziehen sind. Denkbar wäre hier ein kombiniertes Testfeld zur gleichzeitigen Kalibrierung von scannenden Instrumenten und CCD-Kameras, wobei die Parameter in einem kombinierten Ausgleichungsmodell bestimmt werden könnten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit verfolgt primär zwei Ziele. Zum einen sollte eine Strategie zur Systemkalibrierung scannender polarer Messinstrumente entwickelt werden und auf Tauglichkeit hinsichtlich des Einsatzes bei der Geräteuntersuchung aktueller Laserscanner bewertet werden. Des Weiteren sollten die zur Auswertung benötigten Algorithmen mit einem höheren Automationsgrad versehen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien der Messstrahlableitungseinheiten wurde eine Kalibrierstrategie exemplarisch für die nach dem tachymetrischen Messprinzip arbeitenden scannenden Messinstrumente entwickelt. Es wurde gezeigt, dass eine Kalibrierung mit identischen Ebenen in einem Kalibrierfeld grundsätzlich möglich ist und – die Kenntnis des mechanischen und elektrischen Aufbaus vorausgesetzt – die Modellierung und Bestimmung der entsprechenden Korrekturwerte für die Instrumentenfehler abgeleitet werden können. Außerdem lassen sich im Rahmen der Kalibrierstrategie Genauigkeitsangaben für die einzelnen Komponenten der Richtungs- und Streckenmessung für scannende Instrumente bestimmen, die dem Nutzer eine von den Herstellerangaben unabhängige Beurteilung der potentiellen Genauigkeiten dieser Technologie erlauben.

In dieser Arbeit wird ein Testfeld beschrieben, welches aufgrund der baulichen Einschränkungen die Instrumentenfehler nur in einem kleinräumigen Kalibrierfeld bestimmt und deshalb auf eine Extrapolation über den gesamten Messbereich angewiesen ist. Die Bestimmung eines Maßstabsfaktors erscheint in diesem Zusammenhang nicht sinnvoll und sollte über die bekannten Verfahren, wie Kalibrierstrecken und Systemtransformationen über identische Punkte, durchgeführt werden. Um Abschätzungen für die Genauigkeiten und die Korrekturparameter auf den gesamten Messbereich auszudehnen, wären Testfelder nötig, die in ihren Abmessungen um mehrere Größenordnungen ausgedehnt werden müssten. Hier ist sicherlich ein Kompromiss zwischen sicherer Bestimmung der Instrumentenfehler und der Anlage bzw. Ausdehnung eines derartigen Testfeldes zu finden.

Die zur Umsetzung der Kalibrierung benötigten Platten müssen nicht die in der Arbeit vorgestellten Abmessungen aufweisen. Denkbar wäre hier auch der Einsatz von Würfeln, die frei im Raum zu platzieren sind. Die freie Anordnung ist jedoch dahingehend einzuschränken, dass auch Zielungen zu Objektpunkten mit steilen Visuren durchgeführt werden können. Auf diese Weise wäre eine Schnellkalibrierung möglich, ähnlich den schnellen Feldverfahren zur Überprüfung der Nullpunktkorrektur bei Tachymetern. Dabei wäre zu beachten, dass die Bestimmung des Maßstabes auf die gezeigte Weise nicht möglich ist. Um eine sichere Bestimmung des Maßstabsfaktor zu erhalten, sollte alternativ über den Einsatz von kohlefaser-verstärktem Kunststoff als Material für die Kalibrierflächen nachgedacht werden. Dieses Material verfügt zum einen über ein geringes Gewicht, andererseits ist es auch fertigungstechnisch in der Art zu bearbeiten, dass die Oberflächen absolut plan hergestellt werden können. Die auf diese Weise geschaffenen Kalibrierelemente müssten dann mit einem Messverfahren höchster Genauigkeit aufgenommen werden, anschließend modelliert und als Referenzebenen in den Kalibrierprozess eingeführt werden. Die mit ihren Kovarianzen vorliegenden Kalibrierebenen würden dann bei entsprechender Größe des Testfeldes auch die Bestimmung eines Maßstabsfaktors erlauben. Zur Aufnahme dieser Referenzebenen bieten sich bei entsprechender Signalisierung die Verfahren der Nahbereichsphotogrammetrie an, aber auch der Einsatz eines Lasertrackers wäre denkbar.

Die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleisteten Optimierungsuntersuchungen zur korrekten und sinnvollen Auswahl der Größe der Kalibrierplatten sowie entsprechende Untersuchungen zur Konfigurationsoptimierung sind noch durchzuführen. Ebenso wird eine prinzipiell denkbare Erweiterung zur Kalibrierung von hochpräzisen Messsystemen, wie z. B. für die nach dem interferometrischen Messprinzip arbeitenden Lasertracker, erst möglich werden, wenn die Kalibrierplatten nach den oben beschriebenen Vorgaben modifiziert wurden. Die Untersuchungen sollten aufgrund der Genauigkeitsunterschiede hinsichtlich der Distanzmessung und der damit verbundenen hochpräzisen Bestimmung der Richtungskomponenten gegenüber den Laserscannern nachfolgenden wissenschaftlichen Arbeiten vorbehalten bleiben. Eine Erweiterung des funktionalen Modells durch Aufnahme zusätzlicher Parameter in den Kalibrierprozess unter Kenntnis des mechanischen Aufbaus erscheint zum jetzigen Zeitpunkt jedoch ohne weiteres möglich. Zur Lösung dieser Fragestellungen ist man jedoch auf die Kooperation mit den Herstellern der scannenden Instrumente angewiesen, die den mechanischen und elektronischen Aufbau ihrer Instrumente zu diesem Zweck offen legen müssten.

Die Vorteile der scannenden Messverfahren und der photogrammetrischen Erfassung werden zunehmend kombiniert. Dies geschieht zum einen durch die Instrumentenhersteller selbst, die ihre Messgeräte mit Sensoren zur bildhaften Erfassung (CCD-Kameras) ausstatten. Zum anderen kann diese Kombination durch hybride Messsysteme geschehen, die ebenfalls durch das Zusammenspiel einer flächenhaften Erfassung durch ein polares

Messsystem und der bildhaften Auswertung die Vorteile beider Verfahren kombinieren. Um für die photogrammetrische Auswertung der eingesetzten Digitalkameras die erforderlichen Genauigkeiten einzuhalten, müssen diese ebenfalls einem Kalibrierprozess unterzogen werden. Für diese Aufgabenstellung gibt es Standardverfahren, mit denen eine Kalibrierung, d. h. eine Bestimmung der inneren Orientierung der CCD-Kamera sicher und zuverlässig vorgenommen werden kann. Die Kombination dieser Verfahren zur Bestimmung der inneren Orientierung mit der vorgeschlagenen Methode der Instrumentenkalibrierung im Testfeld ist anzustreben und auf eine vollständige Systemkalibrierung zu erweitern. Dabei müssen Anstrengungen unternommen werden, diese Kalibrierstrategie hin zu einer on-the-job Kalibrierung weiter zu entwickeln. Ebenso ist eine Verifizierung mit geeignetem Datenmaterial vorzunehmen.

Des Weiteren wurden in dieser Arbeit Wege zur Automatisierung der Auswertelgorithmen aufgezeigt, um den zeitlichen Aufwand der Auswertungen außerhalb der Messzeiten zu verkürzen. Die reinen Messzeiten vor Ort, die für die Datenerfassung benötigt werden, sind aufgrund der zur Verfügung stehenden Scanner-Hardware schon so weit optimiert, dass der Nutzer den Großteil der Zeit bei der Auswertung der Daten verbringen oder für vorbereitende bzw. messungsbegleitende Maßnahmen aufwenden muss.

Üblicherweise werden zur Standpunktverknüpfung Reflektoren, Passkugeln oder Objektecken benutzt, die für eine anschließende punktweise Transformation herangezogen werden. Diese Zielzeichen können jedoch entweder verdeckt oder teilverdeckt sein oder sind durch einen erheblichen Bestückungsaufwand vor der Anwendung gekennzeichnet. Bei einigen Anwendungen müssen diese Zielzeichen sogar mit einem geodätischen Verfahren (Netzmessung) eingemessen werden. Effizientere Methoden, die mit weniger logistischem Aufwand einhergehen, sind die flächenhaften Transformationsverfahren, bei denen im Vorfeld keine Signalisierung in Form von Zielmarken oder -zeichen zu erfolgen braucht. Bei ausreichender Größe im Falle der Wahl von einfachen Ebenen gibt es keine oder nur geringe Verdeckungen. Bei Betrachtung von Punktwolken, wie sie bei Aufnahme von Objekten entstehen, fällt auf, dass in den meisten der aufgemessenen Szenen ohnehin viele Ebenen enthalten sind, die zur Transformation beliebig vieler Standpunktkoordinatensysteme herangezogen werden können. Durch den vorgestellten Prozessablauf, der durchgehend mit einer implementierten Grobfehlersuche im Beobachtungsmaterial ausgestattet ist, wird eine Automatisierung des Auswerteprozesses erreicht. Die Segmentierung und Modellierung von Ebenen erfolgt dabei automatisch aus den Messdaten. Durch das ebenfalls automatisch ablaufende Verfahren der Zuordnung von homologen Ebenen und der darauf aufbauenden Transformation entfällt das zeitaufwändige Verfahren der manuellen Bewertung und Zuordnung. Eine Erweiterung dieser automatischen Auswertestrategien auf Körper und Flächen mit anderen Regelgeometrien zur Standpunktverknüpfung sollte jedoch noch vorgenommen werden, entsprechende Algorithmen zur Detektion dieser Passkörper sind dementsprechend noch bereitzustellen.

Die derzeitigen methodischen Entwicklungen auf den Gebieten der Auswertung und Genauigkeitsanalyse scannender Messverfahren und die Entwicklungen geeigneter Kalibrierstrategien, zu denen auch die vorliegende Arbeit beitragen soll, werden die Akzeptanz der Technologie des Laserscanning noch erhöhen und das Anwendungsspektrum sinnvoll erweitern. Die Idealvorstellung bei der Aufnahme und Auswertung von Laserscannerdaten ist sicherlich ein vollautomatisch messendes Instrument, welches in Abhängigkeit von der angestrebten Genauigkeit und des aufzunehmenden Detailreichtums selbstständig die Auflösung verändert, im Messvolumen platzierte statische oder dynamische Objekte automatisch erkennt, modelliert und auf Grundlage dieser Modellierung eine Selbstkalibrierung unter der Maßgabe einer aktiven Qualitätskontrolle vornimmt. Die Tür zum Erreichen dieser Idealvorstellung ist durch die vorliegende Arbeit sicherlich erst einen kleinen Spalt geöffnet, aber frei nach dem chinesischen Philosophen KONFUZIUS (551 – 479 v. Chr.) gilt: *„Wer bei Kleinigkeiten keine Geduld hat, dem misslingt der große Plan.“*<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Entnommen aus [Rodehorst, 2004].

## Literaturverzeichnis

- [Abdel-Aziz und Karara 1971] ABDEL-AZIZ, Y.F.; KARARA, N.M.: Direct linear transformation from comparator coordinates into object coordinates in close-range photogrammetry. In: *Proc. ASP Symposium on Close-range Photogrammetry*. Illinois, 1971, S. 1 – 18.
- [Ackermann 1981] ACKERMANN, F.: Grundlagen und Verfahren zur Erkennung grober Datenfehler. In: *Schriftenreihe Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 7: Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (IV) an der Universität Stuttgart über grobe Datenfehler und die photogrammetrische Punktbestimmung*. Stuttgart, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 1981, S. 7 – 24
- [Alder 2003] ALDER, J.: *Betrachtungen zur Kalibrierung polarer Messsysteme*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2003 (unveröffentlicht)
- [Alkis u. a. 2003] ALKIS, A.; ARUN, G.; DEMIREL, H.; DÜPPE, R.-D.; HOVENBITZER, M.: Die Kleine Hagia Sophia Moschee in Istanbul, Objekterfassung zur Dokumentation des Baues sowie seiner Schäden. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 110. Jahrgang, Heft 1, 2004, S. 2 – 8
- [Anderson u. a. 1999] ANDERSON, E.; BAI, Z.; BISCHOF, C.; BLACKFORD, S.; DEMMEL, J.; DONGARRA, J.; CROZ, J. D.; GREENBAUM, A.; HAMMARLING, S.; MCKENNEY, A.; SORENSEN, D.: *LAPACK User's Guide*. 3. Auflage. Philadelphia, SIAM, 1999. URL <http://www.netlib.org/lapack/lug/> (recherchiert 10/2001)
- [Balzani u. a. 2001] BALZANI, M.; PELLEGRINELLI, A.; PERFETTI, N.; UCCELLI, F.: A terrestrial 3D laser scanner: accuracy tests. In: *Proc. CIPA 2001 XVIII<sup>th</sup> International Symposium*. Potsdam, 2001, S. 445 – 453
- [Barber u. a. 1996] BARBER, C. B.; DOBKIN, D. P.; HUHDANPAA, H.: The Quickhull Algorithm for Convex Hulls. In: *ACM Transactions on Mathematical Software*. Volume 22, Number 4, 1996, S. 469 – 483
- [de Berg u. a. 2002] DE BERG, M.; VAN KREVELD, M.; OVERMARS, M.; SCHWARZKOPF, O.: *Computational Geometry - Algorithms and Applications*. 2., rev. ed. Berlin, New York, Springer, 2002
- [Besl und McKay 1992] BESL, P. J.; MCKAY, N. D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Volume 14, Number 2, 1992, S. 239–256
- [Bill 1999] BILL, R.: *Grundlagen der Geoinformationssysteme, Band 1 und 2*. 2., völlig neu bearbeitete und erw. Auflage. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, 1999
- [Bobick 1998] BOBICK, N.: Rotating Objects Using Quaternions. In: *Game Developer*. Game Developer Media Group, 1998, <http://www.gamasutra.com> (recherchiert 2003)
- [Boehler u. a. 2003] BOEHLER, W.; BORDAS VICENT, M.; MARBS, A.: Investigation Laser Scanner Accuracy. In: *Proc. CIPA 2003 XIX<sup>th</sup> International Symposium*. Antalya (Turkey), 2003, S. 474 – 479
- [Breithaupt 2003] F. W. BREITHAUPT & SOHN GMBH & CO. KG: *Elektronisches Winkelmeßsystem*. <http://www.breithaupt.de> (Stand 10/2002)
- [Brenner 2000] BRENNER, C.: *Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 530, Dissertation, 2000
- [Bronstein und Semendjajew 1985] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJEW, K.A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 22., Auflage. Leipzig, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1985
- [Brýs und Ćmielewski 2004] BRÝS, H.; ĆMIELEWSKI, K.: Einfluss der Teilverdeckung des Messstrahlbündels auf die elektrooptische Distanzmessung in geschlossenen Räumen In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 111. Jahrgang, Heft 1, 2004, S. 12 – 19
- [Bruhnke 2003] BRUHNKE, K.-H.: *Analyse der Datenerfassung für eine ganzheitliche Immobilienbeurteilung*. Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät Universität Leipzig, Institut für Baubetriebswesen und Bauwirtschaft, 1996
- [Buchmann 1996] BUCHMANN, P.: *Entwicklung eines Meßsystems zur automatischen polaren Objekterfassung am Beispiel der Bauaufnahme*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 456, Dissertation, 1996



- [Buhrow 2002] BUHROW, T.: *Genauigkeitsuntersuchungen von Laserscannermessungen am Beispiel des I-SiTE 3D Laser Imaging Systems*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2002 (unveröffentlicht)
- [Büngener 1995] BÜNGENER, W.: *Prüfung und Beurteilung der Positions- und Schrittwinkelabweichungen von Hybrid-Schrittmotoren*. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Dissertation, 1995
- [Cheok u. a. 2002] CHEOK, G.; LEIGH, S.; RUKHIN, A.: *Calibration Experiments of a Laser Scanner*. Technical Report NISTIR 6922, U. S. Department of Commerce Technology Administration (Building and Fire Research Laboratory), National Institute of Standards and Technology, 2002
- [Cyra Technologies, Inc. 2003] CYRA TECHNOLOGIES, INC.: *Cyclone*. Version 4.1, <http://www.cyra.com> (recherchiert 09/2003)
- [Dam u. a. 1998] DAM, E. B.; KOCH, M.; LILLHOLM, M.: *Quaternions, Interpretation and Animation*. Department of Computer Science, University of Copenhagen, 1998, Technical Report DIKU-TR-98/5
- [Deumlich und Staiger 2002] DEUMLICH, F.; STAIGER, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. 9., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2002
- [Dijkmann und van den Heuvel 2002] DIJKMANN, S. T.; VAN DEN HEUVEL, F. A.: Semi Automatic Registration of Laser Scanner Data. In: *ISPRS - Congress, Commission V, Close-Range Imaging, Long-Range Vision*. Corfu (Greece), 2002, S. 12 – 17
- [DIN 1986] DIN 18709-2: *Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen – Teil 2: Ingenieurvermessung*. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 1986
- [DIN 1998] DIN 18710-1: *Ingenieurvermessung, Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Entwurf Oktober 1998)*. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., 1998
- [Drixler 1993] DRIXLER, E.: *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 409, Dissertation, 1993
- [Faugeras und Luong 2001] FAUGERAS, O.; LUONG, Q.-T.: *The Geometry of Multiple Images*. Cambridge, London, The MIT Press, 2001
- [Farin und Hansford 1998] FARIN, G. E.; HANSFORD, D.: *The Geometry Toolbox for Graphics and Modeling*. Natick, Massachusetts, A K Peters, 1998
- [Fischler und Bolles 1981] FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. In: *Communications of the ACM*, 1981, Volume 24, Number 6, S. 381 – 395
- [Foley u. a. 1995] FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FOLEY, S. K.; HUGHES, J. F.: *Computer graphics: principles and practice*. 2nd ed. in C, Boston, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1995
- [Forsyth und Ponce 2003] FORSYTH, D. A.; PONCE, J.: *Computer Vision, A Modern Approach*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2003
- [Förstner 1981] FÖRSTNER, W.: Statistische Grundlagen für die Zuverlässigkeit von Ausgleichungsergebnissen. In: *Schriftenreihe Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 7: Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (IV) an der Universität Stuttgart über grobe Datenfehler und die photogrammetrische Punktbestimmung*. Stuttgart, Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, 1981, S. 25 – 39
- [Fraser 1997] FRASER, C. S.: Digital camera self-calibration. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 52, Number 4, 1997, S. 149 – 159
- [Fröhlich 1996] FRÖHLICH, C. L.: *Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung*. Technische Universität München, Dissertation, 1996
- [Gartner, Inc. 2003] GARTNER, INC.: *Gartner's Hype Cycle*. Stamford, CT, <http://www.gartner.com> (recherchiert 03/2004)
- [Gielsdorf 1998] GIELSDORF, F.: *Datenmodellierung für Gleisnetze und Schaffung eines einheitlichen Raumbezugssystems*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 491, Dissertation, 1998
- [Gielsdorf und Gründig 2002] GIELSDORF, F.; GRÜNDIG, L.: Geometrical Modeling for Facility Management Systems Applying Surface Parameters. In: *Proc. XXII<sup>th</sup> FIG International Congress*. Session 27, published on CD, Washington DC, 2002
- [Gordon u. a. 2001] GORDON, S.; LICHTI, D.; STEWART, M.; TSAKIRI, M.: Metric performances of a high-resolution lasers scanner. In: *Videometrics and Optical Methods for 3D Measurement*. Proc of SPIE Volume 4309, San Jose, 2001, S. 174 – 184
- [Gründig 1988] GRÜNDIG, L.: *Datenverwaltungskonzepte für typische Aufgaben aus der Ingenieur-geodäsie*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 336, Dissertation, 1988

- [Gruen und Beyer 2001] GRUEN, A.; BEYER, H. A.: System Calibration Through Self-Calibration. In: GRUEN, A. (Hrsg.); HUANG, T. S. (Hrsg.): *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. Berlin, New York, Springer, 2001, S. 163 – 194
- [Haralick und Shapiro 1993] HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G.: *Computer and Robot Vision*. Boston, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1992
- [Hartley und Zisserman 2001] HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A.: *Multiple view geometry in computer vision*. reprinted (with corr.), Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2001
- [Hastedt u. a. 2002] HASTEDT, H.; LUHMANN, T.; TECKLENBURG, W.: Image-Variant Interior Orientation and Sensor Modelling of High-Quality Digital Camera. In: *ISPRS - Congress, Commission V, Close-Range Imaging, Long-Range Vision*. Corfu (Greece), 2002, S. 27 – 32
- [Heckel u. a. 2001] HECKEL, B.; UVA, A. E.; HAMMANN, B.; JOY, K. I.: Surface Reconstruction Using Adaptive Clustering Methods. In: BRUNETT, G. (Hrsg.); BIERI, H. (Hrsg.); FARIN, G. (Hrsg.): *Geometric Modeling*. Wien, New York, Springer, 2001, S. 199 – 218
- [Hoffmann 1989] HOFFMANN, C. M.: *Geometric and solid modeling: an introduction*. San Mateo, Morgan Kaufmann Publisher, Inc., 1989
- [Horn 1987] HORN, B. K. P.: Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: *Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision*. Bd. 4. Washington, D.C., OSOA, 1987, S. 629 – 642
- [Hoschek und Lasser 1992] HOSCHEK, J.; LASSER, D.: *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Stuttgart, Teubner, 1992
- [Hovenbitzer 2003] HOVENBITZER, M.: *Zur Automation berührungsloser 3D-Objekterfassung im Nahbereich*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 556, Dissertation, 2003
- [Höpcke 1980] HÖPCKE, W.: *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 1980
- [i3mainz 2004] I3MAINZ, FACHHOCHSCHULE MAINZ: *Testprogramm für terr. Laserscanner*. Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik, Fachhochschule Mainz, <http://www.scanning.fh-mainz.de> (recherchiert 04/2004)
- [Ingensand u. a. 2003] INGENSAND, H.; RYF, A.; SCHULZ, T.: Performances and experiences in terrestrial laserscanning. In: *Proc. Optical 3D Measurement Techniques VI*. Zürich, 2003, S. 236 – 243
- [Ivarone und Martin 2003] IVARONE, A.; MARTIN, E.: Calibration verification facilities for long-range laser scanners. In: *Proc. Optical 3D Measurement Techniques VI*. Zürich, 2003, S. 268 – 278
- [Jacobs 2004] JACOBS, G.: 3D Laser Scanning: An Ultra-fast, High-Definition, Reflectorless Topographic Survey. In: *Professional Surveyor*. Frederick, Professional Surveyors Publishing Co., Inc., Volume 24, Number 5, May 2004, S. 38 – 43
- [Jähne 1993] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin, New York, Springer Verlag, 1993
- [Joeckel und Stober 1999] JOECKEL, R.; STOBER, M.: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage, 1999
- [Johansson 2002] JOHANSSON, M.: Explorations into the Behaviour of Three Different High-Resolution Ground-Based Laser Scanners in the Built Environment. In: *Proc. of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*. Corfu (Greece), 2002, S. 33 – 38
- [Juretzko 2001] JURETZKO, M.: The System TOTAL for reordering the geometry and image data of historic buildings and monuments. In: *Proc. CIPA 2001 XVIII<sup>th</sup> International Symposium*. Potsdam, 2001, S. 611 – 613
- [Kahlen 2001] KAHLEN, H.: *Facility Management - Bd. 1: Entstehung, Konzeptionen, Perspektiven*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2001
- [Kahmen 1997] KAHMEN, H.: *Vermessungskunde*. 19., überarbeitete Auflage, Berlin, New York, Walter de Gruyter, 1997
- [Kampmann und Renner 2004] KAMPMANN, G.; RENNER, B.: Vergleich verschiedener Methoden zur Bestimmung ausgleichender Ebenen und Geraden. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 111. Jahrgang, Heft 2, 2004 S. 65 – 67
- [Kehne 1989] KEHNE, G.: *Beiträge zum Einsatz tachymetrischer Verfahren bei der Bauaufnahme*. Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 9, Dissertation, 1989

- [Kern 2003] KERN, F.: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscannerdaten*. Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 19, Dissertation, 2003
- [Kogoj 2001] KOGOJ, D.: Reflektorlose Distanzmessung. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 108. Jahrgang, Heft 5, 202, S. 186 – 190
- [Kraus 1994] KRAUS, K.: *Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren*. Bonn, Ferd. Dümmler Verlag, 1994
- [Krüger u. a. 2000] KRÜGER, T.; MILEV, I.; GRÜNDIG, L.: Ein automatisiertes System zur lasergestützten Tunnelprofilaufnahme. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 125. Jahrgang, Heft 11, 2000, S. 387 – 390
- [Kuipers 2002] KUIPERS, J. B.: *Quaternions and Rotation Sequences - A Primer with Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality*. Princeton and Oxford, Princeton University Press, 2002
- [Lange 2003] LANGE, A.: *Entwicklung eines Algorithmus zur strukturierten Verarbeitung von Daten polarer Messsysteme*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2003 (unveröffentlicht)
- [Leica Geosystems 2003] LEICA GEOSYSTEMS: *DISTO - Produktvorstellung*. <http://www.leica-geosystems.com> (recherchiert 01/2003)
- [Leica Geosystems 2004] LEICA GEOSYSTEMS: *3D Laser Scanner (HDS)*. <http://www.leica-geosystems.com> (recherchiert 02/2004)
- [Lemmens 2002] LEMMENS, M.: Product Survey on High-end Total Stations. In: *GIM International*. AC Lemmer, GITC bv. Volume 16, Number 10, 2002, S. 68 – 73
- [Lenk 2001] LENK, U.: *2.5D-GIS und Geobasisdaten - Integration von Höheninformationen und Digitalen Stadtmodellen*. München, DGK Reihe C, Heft Nr. 546, Dissertation, 2001
- [Lichti u. a. 2000] LICHTI, D. D.; STEWART, M. P.; TSAKIRI, M.; SNOW, A. J.: Calibration and Testing of a Terrestrial Laser Scanner. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume XXXIII, Part B5, Amsterdam, 2000, S. 485 – 492
- [Lindner 1993] LINDNER, H.: *Physik für Ingenieure*. 14. Auflage. Leipzig, Köln, Fachbuchverlag GmbH, 1993
- [Linkwitz 1976] LINKWITZ, K.: Über einige Ausgleichungsprobleme und ihre Lösung mit Hilfe von Matrizen-Eigenwerten. In: ACKERMANN, F. (Hrsg.): *Wissenschaftliche Beiträge aus dem Kreise der Schüler von Ernst Gotthardt anlässlich seiner Emeritierung am 31. März 1976*. München, DGK Reihe B, Heft Nr. 216, 1976, S. 111 – 126
- [Luhmann 2003] LUHMANN, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie*. 2., überarbeitet Auflage. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2003
- [Maas 1997] MAAS, H.-G.: *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Habilitationsschrift, ETH Zürich, 1997
- [Matlab 2002] THE MATHWORKS, Inc.: *Matlab (Release 12) - Programmbeschreibung*. Version 6, 2002
- [Matsuba und Roehl 1996] MATSUBA, S.; ROEHL, B.: *Using VRML : [the most complete reference] / written by Stephen Matsuba and Bernie Roehl*. Indianapolis, Que Publishing, 1996
- [Meisenheimer 2002] MEISENHEIMER, H.-D.: *Vermessungsinstrumente aktuell*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, aktualisierte Auflage, 2002
- [Merzinger und Wirth 1995] MERZINGER, G.; WIRTH, T.: *Repetitorium der Höheren Mathematik*. 3. Auflage. Springe, Binomi Verlag, 1995
- [Mikhail u. a. 2001] MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C.: *Introduction to Modern Photogrammetry*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001
- [Möser u. a. 2000] MÖSER, M. u.a.: Grundlagen. In: MÖSER, M. (Hrsg.); MÜLLER, G. (Hrsg.); SCHLEMMER, H. (Hrsg.); WERNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie*. 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, 2000
- [Neptan/GPS 2002] TECHNET GMBH: *Neptan/GPS - dreidimensionale Netzausgleichung*. Release 3, Version 3.7, Berlin, 2002
- [Niemeier und Wild 1995] NIEMEIER, W.; WILD, P.: Einsatz von Laserscanner für die Erfassung von Gebäudegeometrien. In: SCHRADER, B. (Redaktion): *Gebäudeinformationssysteme*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer GmbH, DVW-Schriftenreihe 19 / 1995, S. 155 – 168
- [Niemeier 2002] NIEMEIER, W.: *Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York, Walter de Gruyter, 2002

- [Niemeier u. a. 2002] NIEMEIER, W.; THOMSEN, S.; SCHÄFER, M.: 3-D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscanner. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie und Laserscanning - Anwendungen für As-Built-Dokumentation und Facility Management*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2002, S. 15 – 26
- [Pavelka und Dolansky 2003] PAVELKA, K.; DOLANSKY, T.: Using of Non-Expensive 3D Scanning Instruments for Cultural Heritage Documentation. In: *Proc. CIPA 2003 XIX<sup>th</sup> International Symposium*. Antalya (Turkey), 2003, S. 534 – 536
- [Peipe und Yu 2003] PEIPE, J.; YU, Q.: Untersuchungen zur Stabilität und metrischen Qualität einer digitalen 5 Megapixel Messkamera. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2003, S. 51 – 56
- [Pfeifer u. a. 2000] PFEIFER, N.; KRAUS, K.; SCHWARZ, R.; ULLRICH, A.: Nahbereichs-Laser-Scanner für die Innenraum-Aufnahme. In: SCHNÄDELBACH, K. (Hrsg.); SCHILCHER, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 2000, S. 114 – 121
- [Pictran 2002] TECHNET GMBH: *Pictran - Programmbeschreibung*. Release 4, Berlin, 2002
- [Pomaska 2002] POMASKA, G.: *Internet-Präsentation von Bauprojekten*. Berlin, Bauwerk Verlag GmbH, 2002
- [Richter 2004] RICHTER, A.: *Genauigkeitsuntersuchungen zur Streckenmessung auf verschiedene Oberflächen mit dem Laserscanner der Technischen Universität Berlin (LATUB)*. Seminararbeit, Technische Universität Berlin, 2004 (unveröffentlicht)
- [Riegl u. a. 2003] RIEGL, J.; STUDNICKA, N.; ULLRICH, A.: Merging and processing of laser scan data and high-resolution digital images aquired with a hybrid 3D laser sensor. In: *Proc. CIPA 2003 XIX<sup>th</sup> International Symposium*. Antalya (Turkey), 2003, S. 511 – 516
- [Rietdorf u. a. 2003] RIETDORF, A.; GIELSDORF, F.; GRÜNDIG, L.: Combination of hand measuring methods and scanning techniques for CAFM - data acquisition. In: *Proc. FIG Working Week 2003*. Technical Session 26.2, published on CD, Paris, 2003
- [Rietdorf u. a. 2004] RIETDORF, A.; GIELSDORF, F.; ALDER, J.: Konzept zur Kalibrierung von scannenden Messinstrumenten. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2004, S. 64 – 71
- [Rodehorst 2004] RODEHORST, V.: *Photogrammetrische 3D-Rekonstruktion im Nahbereich durch Autokalibrierung mit projektiver Geometrie*. Berlin, Wissenschaftlicher Verlag Berlin, Dissertation, 2004
- [Rousseuw und Leroy 1987] ROUSSEEUW, P. J.; LEROY, A. M.: *Robust Regression and Outlier Detection*. New York, John Wiley & Sons, 1987
- [Rüeger 1996] RÜEGER, J. M.: *Electronic distance measurement: an introduction*. Berlin, Springer Verlag, 1996
- [Runne 1993] RUNNE, H.: *Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren*. Braunschweig, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 11, Dissertation, 1993
- [Runne u. a. 2001] RUNNE, H.; NIEMEIER, W.; KERN, F.: Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings. In: GRÜN, Armin (Hrsg.); KAHMEN, Heribert (Hrsg.): *Optical 3D Measurement Techniques V*. Wien, 2001, S. 41 – 48
- [Russell und Norvig 2003] RUSSELL, S.; NORVIG, P.: *Artificial Intelligence, A Modern Approach*. 2nd ed., Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 2003
- [Santala und Joala 2003] SANTALA, J.; JOALA, V.: On the Calibration of a Ground-based Laser Scanner. In: *Proc. FIG Working Week 2003*. Technical Session 12.4, published on CD, Paris, 2003
- [Scherer 2001a] SCHERER, M.: Ein System zur berührungslosen Erfassung geometrischer und bildhafter Bauwerksdaten. In: WEFERLING, U. (Hrsg.); HEINE, K. (Hrsg.); WULF, U. (Hrsg.): *Von Handaufmass bis High-Tech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung*. Mainz, Verlag Philipp von Zabern, 2001, S. 88 – 94
- [Scherer 2001b] SCHERER, M.: About the synthesis of different methods in surveying. In: *Proc. CIPA 2001 XVIII<sup>th</sup> International Symposium*. Potsdam, 2001, S. 423 – 429
- [Schlemmer 2004] SCHLEMMER, H.: Einführung in die Technologie des Laserscannings. In: *Ingenieurvermessung 2004, 14<sup>th</sup> International Conference on Engineering Surveying: Tutorial Laserscanning*. Zürich, 2004

- [Schlüter 2002] SCHLÜTER, M.: *Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner – mechanisch, optisch, interferometrisch*. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF)*, Beiträge zur 22. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF. Münster, 2002, S. 187 – 194
- [Schlüter 1998] SCHLÜTER, O.: *VRML: Sprachmerkmale, Anwendungen, Perspektiven*. Cambridge [u.a.], O'Reilly, 1998
- [Schörlin 1995] SCHÖRLIN, F.: *Mit Schrittmotoren steuern, regeln und antreiben*. Poing, Franzis-Verlag GmbH, 1995
- [Schulz und Ingensand 2004a] SCHULZ, T.; INGENSAND, H.: Laserscanning – Genauigkeitsbetrachtungen und Anwendungen. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2004, S. 90 – 97
- [Schulz und Ingensand 2004b] SCHULZ, T.; INGENSAND, H.: Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Applications for High Precision Scanning. In: *Proc. FIG Working Week 2004*. Technical Session 26.1, published on CD, Athens, 2004
- [Schuster und Förstner 2003] SCHUSTER, H.-F.; FÖRSTNER, W.: Segmentierung, Rekonstruktion und Datenfusion bei der Objekterfassung mit Entfernungsdaten - ein Überblick. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2003, S. 3 – 10
- [Schwarz 2001] SCHWARZ, W.: Geodätische Laborkalibrierung. In: HEISTER, H.; STAIGER, R. (Redaktion): *Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer GmbH, DVW-Schriftenreihe 42 / 2001, S. 44 – 69
- [Stahlberg 1997] STAHLBERG, C.: Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachfehler auf die Winkelmessung. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 122. Jahrgang, Heft 5, 1997, S. 225 – 235
- [Staiger 2001] STAIGER, R.: Motivation und Strategie zur Prüfung Geodätischer Instrumente. In: HEISTER, H. (Redaktion); STAIGER, R. (Redaktion): *Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer GmbH, DVW-Schriftenreihe 42 / 2001, S. 8 – 23
- [Staiger 2002] STAIGER, R.: Laser Scanning in an Industrial Environment. In: *Proc. XXII<sup>th</sup> FIG International Congress*. Technical Session 6.6, published on CD, Washington DC, 2002
- [Staiger 2003] STAIGER, R.: Terrestrial Laser Scanning - Technology, Systems and Applications. In: *Proc. 2<sup>nd</sup> FIG Regional Conference*. Technical Session 12, Marrakech (Morocco), 2003
- [Staiger und Ettl 2003] STAIGER, R.; ETTL, M.: Untersuchungen des Laserscanners IMAGER 5003 von Zoller & Fröhlich. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF)*. Band 12, Münster, 2003, S. 293 – 300
- [Stempfhuber u. a. 2000] STEMPFHUBER, W.; SCHNÄDELBACH, K.; MAURER, W.: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymeter. In: SCHNÄDELBACH, K. (Hrsg.); SCHILCHER, M. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 2000*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 2000, S. 144 – 154
- [Stölting und Kallenbach 2002] STÖLTING, H.-D.; KALLENBACH, E.: *Handbuch Elektrische Kleinantriebe*. 2. Auflage. München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2002
- [Thienelt 2003] THIENELT, M.: *Entwicklung eines Algorithmus zur verketteten 3D-Systemtransformation mittels identischer Ebenen*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, 2003 (unveröffentlicht)
- [Tsai 1986] TSAI, R. Y.: An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1986, S. 364 – 374
- [Ullrich u. a. 2001] ULLRICH, A.; REICHERT, R.; SCHWARZ, R.; RIEGL, J.: Time-of-flight-based 3D imaging sensor with true-color channel for automated texturing. In: GRÜN, A. (Hrsg.); KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3D Measurement Techniques V*. Wien, 2001, S. 2 – 9
- [Ullrich u. a. 2003] ULLRICH, A.; SCHWARZ, R.; KARGER, H.: Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera lasers-scanner system. In: GRÜN, A. (Hrsg.); KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3D Measurement Techniques VI*. Zürich, 2003, S. 298 – 305
- [VDI/VDE 2002] VDI/VDE: *VDI/VDE-Richtlinie 2634: Optische 3D-Messsysteme, Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung*. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2002

- [Weisstein 1999] WEISSTEIN, E. W.: *The CRC Concise Encyclopedia of Mathematics*. Boca Raton, Chapman & Hall / CRC, 1999
- [Welsch u. a. 2000] WELSCH, W.; HEUNECKE, O.; KUHLMANN, H.: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: MÖSER, M. (Hrsg.); MÜLLER, G. (Hrsg.); SCHLEMMER, H. (Hrsg.); WERNER, H. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, 2000
- [Wendt und Weisensee 2003] WENDT, A.; WEISENSEE, M.: Registrierung und Integrierung von Punktwolken. In: LUHMANN, T. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2003*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH & Co. KG, 2003, S. 133 – 142
- [Witte und Schmidt 2000] WITTE, B.; SCHMIDT, H.: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer, 4., neubearbeitete Auflage, 2000
- [Wolf 1980] WOLF, H.: Hypothesentest im Gauß-Helmert-Modell. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)*. Karlsruhe, Herbert Wichmann Verlag GmbH, 87. Jahrgang, Heft 7, 1980, S. 277 – 284
- [Wunderlich 2001] WUNDERLICH, T. A.: Operational and Economic Prospects of Terrestrial Laser Scanning. In: GRÜN, A. (Hrsg.); KAHMEN, H. (Hrsg.): *Optical 3D Measurement Techniques V*. Wien, 2001, S. 18 – 25
- [Zoller+Fröhlich 2004] ZOLLER+FRÖHLICH GMBH: *Technische Daten IMAGER*. <http://www.zf-laser.com> (recherchiert 05/2004)

# Abbildungsverzeichnis

1.1	GARTNER's Hype Cycle [Gartner, Inc., 2003]	8
1.2	Verarbeitungsschritte im Rahmen der Messwerterfassung, Auswertung und Kalibrierung	9
2.1	Messprinzip eines polaren Messsystems	11
2.2	Schematisches Prinzip Impulslaufzeitverfahren	12
2.3	Schematisches Prinzip Phasendifferenzverfahren	13
2.4	Definition der gemessenen Richtungen beim tachymetrischen Messprinzip	14
2.5	Definition der gemessenen Richtungen in Kugelkoordinaten	15
2.6	Schematischer Aufbau und geometrische Bedingungen des tachymetrischen Messprinzips	16
2.7	Rotierende Bewegung eines Spiegel zur bildgebenden Abtastung	16
2.8	Oszillierende Bewegung zweier Spiegel zur bildgebenden Abtastung	17
2.9	Punktwolke bei der Datenerfassung mit einem scannenden Instrument	18
2.10	Unterscheidung der Laserscanner nach dem Messprinzip	19
2.11	Unterscheidung der Laserscanner nach dem Gesichtsfeld [Runne u. a., 2001]	20
2.12	Strahldivergenz und Auflösungsvermögen, nach [Schlemmer, 2004]	20
2.13	Abhängigkeit des Abtastmusters von Entfernung und Ausrichtung des Objektes	21
2.14	Räumliche Verteilung der Messpunkte bei der Abtastung mit scannenden Messverfahren	22
2.15	Prototyp des Messsystems POMES	23
2.16	Schematischer Aufbau eines Schrittmotors, nach [Schörlin, 1995]	24
3.1	Tachymetrische Datenaufnahme versus scannende Messwerterfassung	26
3.2	Umkreiskriterium der DELAUNAY-Triangulation, nach [Hoschek und Lasser, 1992]	28
3.3	VORONOI-Diagramm und DELAUNAY-Triangulation	29
3.4	Ausschnitt einer DELAUNAY-Triangulierung auf der Einheitskugel	30
3.5	Schematische Darstellung zum Vorgehen bei der Segmentierung	32
3.6	Spatprodukt dreier Vektoren	33
3.7	Visualisierung der Dreiecksanten	34
3.8	Fehlerfreie und fehlerhafte Zuordnung einer Kante	35
3.9	Ausgeglichene Ebene durch Punkte $P_i$	37
3.10	Ebenenparameter Abstand nach HESSEScher Normalform	38
3.11	Visualisierung mittel VRML-Darstellung	39
3.12	Schnittpunkte der Normalenvektoren mit der Einheitskugel und Differenzvektoren	41
3.13	Darstellung der Normalenvektoren in der projektiven Ebene $\mathbb{P}^2$	43
3.14	Darstellung der Homographie in der projektiven Ebene $\mathbb{P}^2$	44
4.1	Informationsverluste durch Abschattungen und Hinterschneidungen	47
4.2	Geometrische Anschauung Quaternion	49
4.3	Verfahren zur Verknüpfung verschiedener Instrumentenstandpunkte	51
4.4	Zielzeichen bei der Nutzung von Laserscannern	52
4.5	Verknüpfung mittels korrespondierender Flächen, nach [Runne u. a., 2001]	53
4.6	Geometrischer Zusammenhang Systemtransformation (2D)	54
4.7	Ablauf der Transformation mittels identischer Ebenen	55
4.8	Schematische Darstellung der verketteten 3D-Ebenen transformation	61
4.9	Instrumentenstandpunkte und Ebenen zur Transformation mittels identischer Ebenen	62
4.10	Netzaufbau der tachymetrischen Vergleichsmessung	64
4.11	Darstellung der Restklaffen nach erfolgter Transformationen	65
5.1	Versuchsaufbau Streckenmessgenauigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Auftreffwinkel	68
5.2	Teilverdeckung des Messstrahlbündels bei der Distanzmessung	69
5.3	Aufbau und Messungen auf einer EDM-Vergleichsstrecke (ohne Maßstabsangabe)	70

5.4	Winkeldefinitionen und Achsfehler, nach [Stahlberg, 1997] . . . . .	72
5.5	Nullpunktkorrektur und Achsexzentrizitäten, am Beispiel des POMES . . . . .	73
5.6	Modellierung der Instrumentenfehler . . . . .	74
5.7	Simulierte Ebenen zur Erzeugung fiktiver Beobachtungen . . . . .	81
5.8	Realisierung eines Testfeldes mit Kalibrierplatten (Ausschnitt) . . . . .	82
5.9	Projizierte Targets auf der Oberfläche einer Testfeld-Kalibrierplatte (Messbild) . . . . .	83
5.10	Abweichungen von der ausgeglichenen Ebene . . . . .	83
5.11	Höhenlinienmodell zweier Kalibrierplatten . . . . .	84
5.12	Ablaufplan einer Kalibrierung, nach [Rietdorf u. a., 2004] . . . . .	85
5.13	Laserscanner ZOLLER+FRÖHLICH Imager 5003 . . . . .	88
5.14	Parameter der inneren Orientierung, nach [Luhmann, 2003] . . . . .	91
5.15	Anordnung der Messbilder zur Kalibrierung von Kameras und Testfeld . . . . .	92



## Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifizierung von Laserscannern, nach [Staiger, 2003] und [Schulz und Ingensand, 2004b] . . . . .	22
3.1	Räumliche Koordinaten zur Bestimmung einer ausgeglichenen Ebene . . . . .	37
3.2	Ergebnisse Spektralzerlegung und Ausgleichung mit Bedingung . . . . .	38
4.1	Transformationsergebnisse – Rotationsparameter . . . . .	62
4.2	Transformationsergebnisse – Translationsparameter . . . . .	62
4.3	Anzahl Ebenen Datensatz 2 . . . . .	63
4.4	Vergleich des Ebenenparameters $d_{glo}$ . . . . .	63
4.5	Ergebnisse alternativer Transformationsverfahren I – „Tachymeter“ . . . . .	64
4.6	Ergebnisse alternativer Transformationsverfahren II – „Kugeln“ . . . . .	65
5.1	Oberflächenmaterialien von Objekten im Wohn- und Arbeitsumfeld . . . . .	68
5.2	Parameterschätzung bei der Simulation von Instrumentenfehlern . . . . .	81
5.3	Untersuchungen zur Ebenheit ausgewählter Testfeld-Kalibrierplatten . . . . .	84
5.4	Statistik Parameterschätzung Kalibrierung POMES . . . . .	86
5.5	Ausgegliche Parameter der Kalibrierung des polaren Messsystems POMES . . . . .	87
5.6	Standpunktabhängiger Höhenindexfehler bei der Kalibrierung des POMES . . . . .	87
5.7	Genauigkeit der Ebenenparameter bei der Kalibrierung des polaren Messsystems POMES . . . . .	87
5.8	Statistik Parameterschätzung Kalibrierung ZOLLER+FRÖHLICH <i>Imager 5003</i> . . . . .	89
5.9	Ausgegliche Parameter Kalibrierung ZOLLER+FRÖHLICH <i>Imager 5003</i> . . . . .	89

## Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Geodäsie und Ausgleichsrechnung des Institutes für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Fakultät Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin. Dem Leiter des Fachgebietes, meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Lothar Gründig, gilt mein ganz besonderer Dank. Er hat diese Arbeit von Anfang an unterstützt, fachlich begleitet und immer gefördert. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke für die Übernahme des Koreferates und für die Unterstützung anlässlich meines Forschungsaufenthaltes an der Universität der Bundeswehr in Neubiberg bedanken. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Olaf Hellwich für die Übernahme seiner Gutachtertätigkeit. Prof. Dr.-Ing. Dieter Lelgemann danke ich als Vorsitzendem des Promotionsausschusses.

Ebenfalls gilt mein Dank allen ehemaligen Kollegen am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der Technischen Universität Berlin. In vielen Gesprächen und Diskussionen, im Besonderen mit Dr.-Ing. Frank Gielsdorf und Dr.-Ing. Volker Rodehorst, sind viele Ideen geboren worden, sind Anregungen zu dieser Arbeit entstanden und haben damit ein fruchtbares und gewinnbringendes Arbeitsklima in den letzten Jahren entstehen lassen. Dieser Dank gilt ebenso Dipl.-Ing. Björn Beckert als meinem langjährigen direkten Zimmernachbarn sowie Dr.-Ing. Kerstin Groth für ihren unerschütterlichen Optimismus und ihre Ratschläge.

Weiterhin gilt mein Dank allen Studenten und Studentinnen, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten ihren Teil zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben, sowie Herrn Rainer Eichenberg, technischer Mitarbeiter und Werkstattmeister des Institutes für Geodäsie und Geoinformationstechnik, der immer und sofort seine goldenen Händchen beim Bau von Geräten und Hilfsmitteln eingesetzt hat und somit ebenfalls seinen Beitrag zur vorliegenden Arbeit lieferte. Bei Dipl.-Ing. Thorsten Schulz bedanke ich mich für seine Mithilfe bei diversen Messungen und für den einhergehenden Gedankenaustausch. Dipl.-Ing. Carsten Hatger danke ich für das Korrekturlesen einiger Passagen und den damit verbundenen Diskussionen.

Nicht vergessen möchte ich an dieser Stelle, allen Entwicklern der freien Software MikTeX 2.1 und der diversen ebenfalls frei verfügbaren Zusatzpakete meine Hochachtung auszusprechen, ohne deren Tätigkeit diese Arbeit nicht in dieser Form zustande gekommen wäre.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir im Laufe meiner Ausbildung immer Unterstützung gewährt haben, und natürlich bei meiner lieben Frau Anette, die es in zahlreiche Perioden verstanden hat, mich zu motivieren, und mir die nötige familiäre Unterstützung gegeben hat, diese Arbeit zu Ende zu bringen.

## Lebenslauf

Andreas Rietdorf

Geboren	7. November 1971 in Magdeburg
Familienstand	verheiratet mit Anette Rietdorf
Schulbildung	09/1978 – 06/1988: Polytechnische Oberschule „Salvador Allende“, Magdeburg  09/1988 – 07/1991: Abitur
Berufsausbildung	09/1988 – 07/1991: Ausbildung zum Maschinenschlosser mit gleichzeitigem Erwerb des Abiturs in der SKET Schwermaschinenbau Magdeburg GmbH als Rechtsnachfolger des VEB Schwermaschinenbau „Ernst Thälmann“, Magdeburg
Wehrdienst	07/1991 – 06/1992: Grundwehrdienst
Studium	10/1992 – 10/1994: Studium des Vermessungswesens an der Technischen Universität Braunschweig mit Ablegung des Vordiploms  10/1994 – 08/1998: Hauptstudium an der Universität Hannover im Studiengang Vermessungswesen mit dem Erlangen des Diplom-Ingenieur Vermessungswesen
Berufstätigkeit	11/1998 – 03/2004: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Geodäsie und Ausgleichsrechnung am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin  09/2004: Gründung der SOLVing3D GmbH als Ingenieurbüro in Hannover gemeinsam mit Dr.-Ing. Bernd-Michael Wolf als geschäftsführende Gesellschafter