

Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn

Analyse der Konfiguration bei der Approximation
ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen
auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt am 06. Mai 2015 von

M.Sc. Christoph Holst

aus Siegburg

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Korreferenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Berndt Neuner

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juli 2015

Publikation: Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert

Erscheinungsjahr: 2015

Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren unterliegt der Bereich der Ingenieurgeodäsie einem starken Wandel, da sich diese Disziplin generell den stetig weiterentwickelnden, anwendungsbezogenen Problemstellungen widmet. Unter diesen Aspekten ist insbesondere die flächenhafte Erfassung von Objekten und ihrer Geometrien – bis hin zur ganzheitlichen Raumkontinuierlichkeit – in den Fokus der Ingenieurgeodäsie geraten. In diesem Kontext ergründet diese Dissertation, inwieweit die Konfiguration bei der Approximation von Oberflächen, die räumlich ungleichmäßig abgetastet wurden, analysiert und gegebenenfalls auch optimiert werden kann. Die zugrunde liegenden Messungen basieren auf Nivellements und terrestrischen Laserscans. Deren Oberflächenabtastung ist jeweils ungleichmäßig. Bei Nivellements liegt die Ursache in der Wirtschaftlichkeit und Siedlungsstruktur der Untersuchungsgebiete, beim terrestrischen Laserscanning (TLS) kann dies messtechnisch mit der polaren Abtastung begründet werden. In beiden Fällen dienen die Messpunkte häufig zur Approximation von Oberflächen, um flächenkontinuierliche Aussagen treffen zu können. Gängige Anwendungen sind z.B. die Analyse von Bodenbewegungen beim Nivellement oder die Deformationsanalyse beim TLS.

Obwohl bei diesen Anwendungen im Allgemeinen eine ausreichend große Anzahl an Messpunkten zur Verfügung steht, führt die ungleichmäßige Punktverteilung dennoch oftmals zu einer ungünstigen Konfiguration des Ausgleichs. Diese kann in Kombination mit dem oft nur limitiert vorhandenen Modellwissen bei der Flächenmodellierung zu verzerrten Parameterschätzungen führen. Diese Konfiguration gilt es demnach zu analysieren und ggf. auch zu optimieren. Auf Basis dieser methodischen Analysen können schwerpunktmäßig vier Aspekte herausgestellt werden:

- Anhand der Redundanzanteile sowie anhand von relativen Redundanzanteilunterschieden kann gezeigt werden, dass die ungleichmäßige Punktverteilung in Kombination mit limitiertem Modellwissen zu einer suboptimalen Konfiguration bei der Approximation von Oberflächen führt. Die Redundanzanteile vereinen sowohl die geometrische Verteilung der Messpunkte, die Objektgeometrie als auch das stochastische Modell der Beobachtungen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und der Konfiguration.
- Zur Optimierung der Konfiguration bei der Approximation flächenhafter Nivellements wird ein Algorithmus aufgestellt, der die Messpunktverteilung im Bezug zur Komplexität der Bodensenkungen objektiv bewertet. Die existierenden Messpunkte werden hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für die Approximation – auf Basis der Konfiguration – selektiert. Zusätzlich ist es in der Netzausgleichung erstmals möglich, die Positionen und die Anzahl zusätzlich benötigter Messpunkte zu bestimmen.
- Die Approximationen gescannter Oberflächen sind oft verzerrt und abhängig vom Standpunkt. Dies kann anhand einer Konfigurationsanalyse unter Betrachtung der Redundanzanteile quantifiziert und analysiert werden. Ferner kann durch eine Punktausdünnung – also durch die Herstellung einer gleichmäßigen Abtastung – eine Minimierung der Standpunktabhängigkeit erzeugt werden. Dies zeigt sich auch in Form einer verbesserten Konfiguration.
- Ein weiterentwickeltes Konzept zur scannerbasierten Deformationsuntersuchung integriert die beschriebenen Aspekte der Konfigurationsanalyse und -optimierung anhand eines konkreten Beispiels. Ferner wird der Aspekt der Scannerkalibrierung hervorgehoben und in die Deformationsanalyse integriert. Insgesamt bedeuten diese Maßnahmen einen großen Fortschritt für die Nutzung terrestrischer Laserscanner zur zuverlässigen und genauen Deformationsanalyse.

Diese Ergebnisse sind unmittelbar relevant für alle flächenhaften Approximationen mit hohen Genauigkeitsanforderungen. Im Gesamten stellt diese Dissertation also eine Grundlage zur verbesserten Analyse, Bewertung und Interpretation von Approximationen auf Basis ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen dar. Eingebettet in ebenfalls erwähnte, weiterführende methodische Untersuchungen ist diese Dissertation damit bei der für die Ingenieurgeodäsie angestrebten ganzheitlichen Raumkontinuierlichkeit von großem Nutzen.

Analysis of the configuration at approximating irregularly sampled surfaces based on levellings and terrestrial laser scans

Abstract

Since several years, the field of engineering geodesy has been subject to change. This is due to the fact that engineering geodesy generally attends to applied problem statements. Based on these aspects, especially the area-based acquisition of objects and their geometries – up to an integrated space continualization – got into focus of engineering geodesy. In this context, this dissertation fathoms the possibility of analyzing and optimizing the configuration at approximation surfaces that are spatially irregularly sampled. The underlying measurements are based on levellings and terrestrial laser scans, which both sample the surface irregularly. With levellings, the reason for the irregular sampling is caused by cost effectiveness and the settlement structure of the investigated areas. With terrestrial laser scanning (TLS), the reason is caused by its polar sampling due to its measurement technology. In both cases, the sampling points are often used for approximating surfaces in order to gain area-based conclusions. Established applications are, e.g., the analysis of ground subsidence with levellings or the area-based deformation analysis with TLS.

The configuration of approximation suffers from the irregular spatial distribution of the sampling points even if these sampling points are of sufficient quantity. In combination with limited model knowledge, this can result in biased parameter estimates when modelling surfaces. Hence, the configuration needs to be analyzed and – if necessary – also optimized. Based on these methodical analyses, four aspects can be highlighted with emphasis:

- It can be exposed that the irregular distribution of sampling points in combination with limited model knowledge results in a suboptimal configuration at approximating surfaces. This analysis rests on partial redundancies and relative differences in partial redundancies. Partial redundancies combine the geometric distribution of the sampling points, the object geometry and the stochastic model of the observations for evaluating the reliability and configuration.
- For optimizing this configuration at approximating area-based levellings, an algorithm is developed. This algorithm objectively evaluates the spatial distribution of the sampling points dependent on the complexity of the ground subsidence. Existing sampling points are selected based on their importance for the approximation – judged by the configuration analysis. Furthermore, the number and position of additionally required sampling points can be determined for the first time in geodetic network optimization.
- The parameter estimates of scanned surfaces are often biased and due to the station of the laser scanner. This can be quantified and analyzed based on a configuration analysis considering the partial redundancies. A data reduction – which equals a thinning of the point cloud to gain a regular sampling – minimizes the dependence of the parameter estimates on the laser scanner station. This can also be seen in the improved configuration.
- An advanced concept for laser scanner based deformation analyses integrates the described aspects of configuration analysis and optimization for a concrete application. In this context, also the aspect of laser scanner calibration is pointed out and integrated into this deformation analysis. These steps altogether imply an immense progress at using terrestrial laser scanners for reliable and accurate deformation analyses.

These results are instantaneously relevant for all surface-based approximations demanding high accuracy. Overall, this thesis builds up a fundament for an improved analysis, evaluation and interpretation of area-based approximations based on irregularly sampled surfaces. Embedded in other mentioned methodical aspects, this thesis is of great benefit for the integrated space continualization aspired in engineering geodesy.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1 Motivation und Zielsetzung	3
1.1 Motivation	3
1.2 Zielsetzung	5
2 Wissenschaftlicher Kontext	7
3 Geodätische und mathematische Grundlagen	9
3.1 Präzisionsnivellements	9
3.1.1 Methodik	9
3.1.2 Stochastische Analyse	10
3.1.3 Abtastung von Oberflächen	11
3.1.4 Parametrisierung abgetasteter Oberflächen	12
3.2 Terrestrisches Laserscanning	14
3.2.1 Methodik	14
3.2.2 Stochastische Analyse	15
3.2.3 Abtastung von Oberflächen	15
3.2.4 Parametrisierung abgetasteter Oberflächen	16
3.3 Flächenapproximation	17
3.3.1 Das Gauß-Markov Modell	18
3.3.2 Das Gauß-Helmert Modell	18
3.4 Konfigurationsanalyse	20
4 Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen	23
4.1 Analyse der Konfiguration auf Basis von Nivellements	24
4.2 Analyse der Konfiguration auf Basis terrestrischer Laserscans	29
5 Herausstellung der wichtigsten Aspekte	35
5.1 Konfigurationsanalyse flächenhafter Nivellements und terrestrischer Laserscans	35
5.2 Optimierung der Konfiguration zur Approximation flächenhafter Nivellements	39
5.3 Aufdeckung verzerrter Schätzungen bei der Approximation terrestrischer Laserscans	41
5.4 Weiterentwicklung bestehender Konzepte zur scannerbasierten Deformationsuntersuchung	44

6 Einbettung der Untersuchungen in weiterführende Überlegungen	49
6.1 Approximation und Konfigurationsanalyse	49
6.2 Stochastisches Modell terrestrischer Laserscans	50
6.3 Anforderungen an parametrische Flächenmodellierungen	52
6.4 Erweiterte Unsicherheitsmodellierung	52
6.5 Semantik der Punktwolke	54
6.6 Approximation natürlicher Objekte auf Basis terrestrischer Laserscans	54
7 Fazit und Ausblick	57
8 Auflistung weiterer Veröffentlichungen	59
Verzeichnisse	61
Abbildungsverzeichnis	61
Abkürzungsverzeichnis	63
Literaturverzeichnis	65

Vorwort

Die vorliegende kumulative Dissertation stellt die methodischen Untersuchungen und Ergebnisse zur Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans dar. Sie beruht auf den folgenden 13 Veröffentlichungen, von denen 8 Veröffentlichungen einer Peer-Review-Begutachtung unterzogen wurden:

- Veröffentlichung A1 (peer-review):
Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013b). Anforderungen und Grenzen von Bodenbewegungsmodellen zur Beschreibung des Bodensenkungsverhaltens im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Markscheidwesen*, 120(1-2), 13–22
- Veröffentlichung A2:
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015b). Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements. In W. Busch & S. Knospe (Hrsg.), *GeoMonitoring 2015* (S. 189–206). Clausthal-Zellerfeld
- Veröffentlichung A3 (peer-review):
Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013c). Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformations. *J. Appl. Geodesy*, 7(2), 103–113
- Veröffentlichung A4:
Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013d). Data-adaptive approximation strategy for monitoring and analysis of height changes. In *XV International ISM Congress, 16-20 September 2013 Aachen*
- Veröffentlichung A5:
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2013). Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models. In *2. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 09-10 September 2013 Nottingham, UK*
- Veröffentlichung A6 (peer-review):
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015a). Detecting and analyzing fault edges in sampled ground movements. *Appl. Geomat.* ahead of print, doi: 10.1007/s12518-014-0145-9
- Veröffentlichung B1:
Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014c). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern - eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *Allgem. Verm. Nachr.*, 121(7), 260–272
- Veröffentlichung B2 (peer-review):
Holst, C., Zeimetz, P., Nothnagel, A., Schauerte, W., & Kuhlmann, H. (2012). Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements. *J. Surv. Eng.*, 138(3), 126–135
- Veröffentlichung B3:
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2011). Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In *Schriftenreihe DVW, Band 66: Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge* (S. 161–180). Augsburg: Wißner
- Veröffentlichung B4 (peer-review):
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014b). Impact of spatial point distributions at laser scanning on the approximation of deformed surfaces. In *Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs* (S. 269–282). Zürich, Schweiz: A. Wieser

- Veröffentlichung B5 (peer-review):
Holst, C., Artz, T., & Kuhlmann, H. (2014a). Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *J. Appl. Geodesy*, 8(3), 169–183
- Veröffentlichung B6 (peer-review):
Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014a). Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *J. Appl. Geodesy*, 8(4), 295–310
- Veröffentlichung B7 (peer-review):
Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., & Kuhlmann, H. (2015). Improved area-based deformation analysis of a radio telescope’s main reflector based on terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 9(1), 1–13

Diese Veröffentlichungen werden in Kapitel 4 zusammengefasst, anschließend werden die wichtigsten Aspekte herausgestellt (Kapitel 5). Der Verfasser dieser Dissertation hat in jeder dieser Veröffentlichungen den Hauptbeitrag geleistet und insbesondere den jeweiligen methodischen Fortschritt selbst erbracht. Einen partiellen Sonderfall stellt die Veröffentlichung B1 dar: Hier zeichnet sich der Verfasser dieser Dissertation für alle methodischen Darlegungen verantwortlich, mit Ausnahme der dort beschriebenen Aspekte bzgl. des Nahbereichsscannings. Diese obliegen den Koautoren.

1. Motivation und Zielsetzung

Seit einigen Jahren unterliegt der Bereich der Ingenieurgeodäsie einem starken Wandel, da sich diese Disziplin generell den stetig weiterentwickelnden, anwendungsbezogenen Problemstellungen widmet [Kuhlmann et al., 2014]. Unter diesen Aspekten sind insbesondere zwei Anwendungsgebiete in den Fokus der Ingenieurgeodäsie geraten: die kinematische Vermessung von bewegten Plattformen aus [Eling et al., 2013; Klingbeil et al., 2014] sowie die flächenhafte Erfassung von Objekten und ihrer Geometrien [Wang, 2013; Eling, 2009] – bis hin zur ganzheitlichen Raumkontinuierisierung [Kuhlmann & Schwieger, 2014]. Die vorliegende Dissertation ist diesem zweiten Bereich zuzuordnen. Im Speziellen wird ergründet, inwieweit die Konfiguration bei der Approximation von Oberflächen, die räumlich ungleichmäßig abgetastet wurden, beurteilt, analysiert und gegebenenfalls auch optimiert werden kann. Die zugrunde liegenden Messungen basieren dabei auf Nivellements und terrestrischen Laserscans. Die Motivation dieser Untersuchungen und die Zielsetzung werden in den folgenden Abschnitten 1.1–1.2 näher erläutert.

1.1 Motivation

Nivelliere und terrestrische Laserscanner sind sowohl in ihrer Methodik, den geometrischen Messgrößen als auch in ihren Anwendungsbereichen grundlegend verschieden: Nivelliere messen einen eindimensionalen Höhenunterschied [Kahmen, 2006] und Laserscanner dreidimensionale Polarkoordinaten¹ [Deumlich & Staiger, 2002]. Dennoch werden auf Basis beider Verfahren Oberflächen abgetastet – mit Hilfe von Nivellements meistens Höhen (-änderungen) des Bodens [Pelzer & Niemeier, 1983] und mit Hilfe von terrestrischen Laserscans Formen von künstlichen [Eling, 2009] oder auch natürlichen Objekten [Paulus et al., 2013]. In beiden Fällen sind die Abtastungen der Oberflächen jeweils ungleichmäßig, sei es aus wirtschaftlichen oder äußeren Umständen (Nivellement) oder auch aus messtechnischen Gründen (Laserscanning). Dieser Sachverhalt soll an zwei Beispielen aufgezeigt werden. Diese Beispiele dienen auch im weiteren Verlauf der vorliegenden Dissertation zur Anschauung und als Datengrundlage der methodischen Untersuchungen.

Nivellements

Im Rheinischen Braunkohlenrevier werden regelmäßig Nivellements durchgeführt, um sumpfungsbedingte Bodensenkungen zu dokumentieren. Diese Dokumentation ist wichtig, da die Bodensenkungen in Ausnahmefällen zu Setzungsschäden an umliegenden Gebäuden führen können [Preusse & Schulte, 2012]. Bei der Auswertung der Nivellements zur Beurteilung der Bodenbewegungen besteht das generelle Ziel aus zwei Aspekten: Zum einen sollen bewegungshomogene Bereiche detektiert werden. Diese zeichnen sich durch weniger komplexe Bodenbewegungen aus, die nicht zu sumpfungsbedingten Setzungsschäden führen. Zum zweiten sollen Aussagen dazu getroffen werden, ob bewegungsaktive tektonische Störungen in den Gebieten vorhanden sein können, die in Setzungsschäden münden könnten. Zur Bearbeitung beider Aufgaben bietet es sich an, die nivellierten Höhenänderungen flächenkontinuierlich zu approximieren, da sich sowohl bewegungshomogene Bereiche als auch tektonische Störungen auf Basis einer räumlichen Betrachtung analysieren lassen.

Die Nivellements werden von RWE Power, Öffentlich bestellten Vermessungsingenieuren (ÖbVI) sowie von Vermessungsbehörden durchgeführt. Abb. 1.1 zeigt die Positionen der Höhenbolzen (Messpunkte), an denen Höhenänderungen zwischen zwei Messepochen nivelliert wurden, exemplarisch für ein beliebiges Gebiet (Beispielregion A) innerhalb des Rheinischen Braunkohlenreviers. Einerseits verdeutlicht diese Abbildung farbcodiert die Größenordnung der Höhenänderungen, hier für einen Epochenabstand von 15 Jahren, andererseits ist die ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche ersichtlich.

¹Diese Polarkoordinaten werden meist softwareintern direkt in kartesische Koordinaten umgerechnet.

Terrestrische Laserscans

Das Radioteleskop in Effelsberg ist mit einem Durchmesser des Hauptreflektors von 100 m eines der größten frei beweglichen Radioteleskope der Welt. Aufgrund dieser Größe und dem daraus resultierenden großen Eigengewicht des Hauptreflektors deformiert sich dieser abhängig von seiner Elevationsstellung. Eine spezielle Sonderkonstruktion, u.a. basierend auf der Segmentierung des Hauptreflektors in viele kleinteilige Flächenelemente, soll daher für eine homologe Deformation sorgen [Hachenberg, 1968]. Diese besagt, dass sich der Hauptreflektor zwar verformt, er jedoch zu jeder Elevationsstellung durch ein Rotationsparaboloid mit variierender Brennweite beschrieben werden kann. Die Prüfung dieser Annahme der homologen Verformung sowie die Quantifizierung der Brennweitenvariationen sind essentiell, um (a) den Antennengewinn² durch optimale Nachführung des Subreflektors zu steigern und (b) die auf Basis dieses Radioteleskops u.a. durchgeführten geodätischen Very Long Baseline Interferometry (VLBI) Messungen korrigieren zu können [Artz et al., 2014]. Falls zudem das elevationsabhängige Deformationsverhalten weiterer Radioteleskope bestimmt wird, könnten diese Aussagen ferner einen Beitrag zur exakteren Festlegung geophysikalischer Plattenverschiebungen und weiterer geophysikalischer Parameter leisten.

Sowohl zur Bestimmung der Brennweitenvariationen als auch zur Prüfung der homologen Verformung ist der Hauptreflektor jeweils flächenhaft abzutasten. Hierfür eignet sich das terrestrische Laserscanning. Abb. 1.2 skizziert die Messkonfiguration, wenn der Laserscanner bei einer Elevationsstellung des Radioteleskops von 90° kopfüber im Subreflektor positioniert wird. Auch hier ist die ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche offensichtlich, die die Grundlage für die anschließende flächenkontinuierliche Parametrisierung bildet.

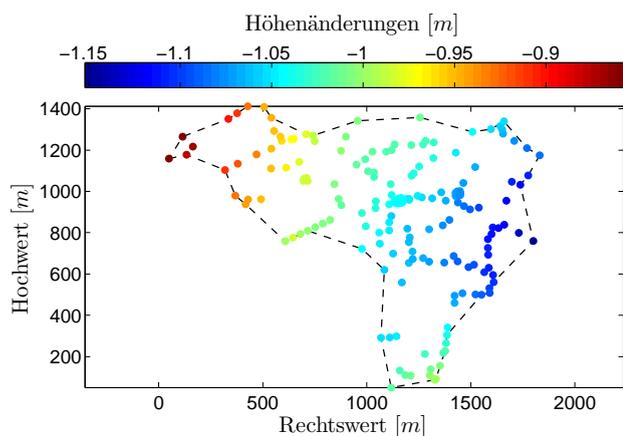


Abbildung 1.1: Punktverteilung und Höhenänderungen (farblich codiert) beim Nivellement in der Beispielregion A.

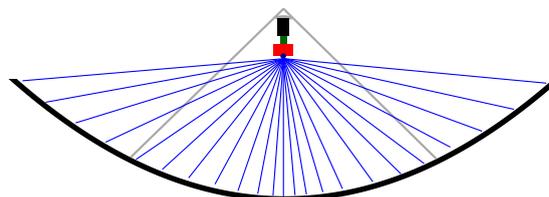


Abbildung 1.2: Punktverteilung beim Scanning des Radioteleskops Effelsberg (skizziert durch exemplarisch ausgewählte Laserstrahlen, blau liniert).

Gemeinsame Analyse der Konfiguration

Bei beiden Beispielen liegt jeweils eine ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche vor. Bei den Nivellements sind lokale Punkthäufungen oder auch Bereiche von mehreren Dekametern, in denen keine einzige Messung vorhanden ist, keine Seltenheit. Beim terrestrischen Laserscanning sind zwar nicht unbedingt Messlücken zu erwarten, aufgrund der Messgeometrie und dem Messprinzip eines Panoramalaserscanners findet aber dennoch eine messtechnikbedingt ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche statt. Zwar ist die Verteilung vom Scanner aus gesehen radial gleichmäßig, durch die Objektgeometrie folgt dennoch eine ungleichmäßige Abtastung.

²Der Antennengewinn ist eine Kombination aus Richtwirkung und Wirkungsgrad einer Antenne. Für nähere Details sei auf Baars [2007] verwiesen.

Wenngleich die Grundlagen und Voraussetzungen bei der Abtastung von Oberflächen – und auch die Oberflächen selber – auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans verschieden sind, so ist in beiden Fällen eine Analyse der Konfiguration durchzuführen, falls die abgetasteten Oberflächen flächenhaft analysiert und damit approximiert werden sollen. Diese Konfigurationsanalysen beinhalten eine Untersuchung der zugrunde liegenden Messpunktverteilung. Die Messpunktverteilung verfügt zusammen mit der Geometrie der Objektoberfläche und dem stochastischen Modell der Beobachtungen über die Konfiguration der Oberflächenapproximation. Unentdeckt ungünstige Konfigurationen können zu verzerrten, uneindeutigen und unzuverlässigen Approximationen der Objektoberfläche führen. Dies ist unabhängig von den beiden präsentierten Anwendungen des Nivellements und des terrestrischen Laserscannings. Daher ist eine Analyse der Konfiguration des Ausgleichs für die vorgestellten und viele weitere Anwendungen unerlässlich, um zuverlässige Aussagen bei Anwendungen mit hohem Genauigkeitsbedarf treffen zu können.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, das aus der geodätischen Netzausgleichung bekannte Instrument der Konfigurationsanalyse auch für die Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen einzuführen. Hierzu gehört einerseits die Beurteilung der existierenden Konfiguration. Dabei ist die Offenlegung des Einflusses der ungleichmäßigen Abtastung und der daraus resultierenden suboptimalen Konfiguration auf die Flächenapproximationen von Bedeutung. Andererseits beinhaltet dieses Ziel Untersuchungen hinsichtlich einer Optimierung der Konfiguration. Hier ist der Fragestellung nachzugehen, inwieweit mögliche Veränderungen der Konfiguration zu einer Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung bei der Approximation führen.

Aus dieser Zielsetzung folgt, dass die Überlegungen der vorliegenden Arbeit speziell für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen relevant sind. Dies gilt insbesondere für flächenhafte Deformationsanalysen, bei denen die Größenordnung tatsächlicher Deformationen mit derjenigen der Messunsicherheiten vergleichbar ist. Für Anwendungen mit geringen Genauigkeitsanforderungen, wie z.B. der Aufnahmevermessung auf Basis terrestrischer Laserscans zur Dokumentation von Gebäudegrundrissen, ist der Aspekt der Konfigurationsanalyse und -optimierung dahingegen von untergeordneter Wichtigkeit.

Methoden und Strategien zur Analyse und Optimierung von Konfigurationen sind aus der Ausgleichsrechnung [Chatterjee & Hadi, 1986; Förstner, 1987] sowie der geodätischen Netzoptimierung [Niemeier, 2008; Schmitt, 1985a; Grafarend, 1979; Grafarend & Krumm, 1985] bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt. Allerdings war hier stets die Motivation, die Auswirkung einzelner Beobachtungen auf das Ausgleichsergebnis zu untersuchen, da Beobachtungen unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit nur in geringer Überbestimmung vorlagen. Diese Sichtweise ist bei der vorliegenden Arbeit überholt, da sowohl beim Nivellement als auch beim Laserscanning eine Vielzahl an Beobachtungen vorliegen, die bei der Approximation immer zu einer immensen Überbestimmung führt. Daher stellt sich nie die Frage nach der Erhöhung der absoluten Beobachtungsanzahl, sondern vielmehr nach der Verteilung der Beobachtungen innerhalb der zu untersuchenden Oberfläche. Demnach verschiebt sich die Betrachtung einzelner Beobachtungen hin zu der Betrachtung von räumlichen Verteilungen von Beobachtungen und die Auswirkung dieser Verteilung auf das Schätzergebnis.

Diese Betrachtungen gelten nach den o.g. Ausführungen sowohl für Nivellements als auch für terrestrische Laserscans, auf deren Basis jeweils Flächenapproximationen durchzuführen sind. Im Speziellen ist das Ziel dieser Arbeit, Antworten auf die folgenden Fragen zu liefern:

- Wie kann die Konfiguration bei der Approximation auf Basis von Nivellements oder terrestrischen Laserscans ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen analysiert werden?
- Wie kann die Konfiguration optimiert werden, um die Zuverlässigkeit der Flächenapproximation flächenhaft nivellierter Höhenunterschiede zu steigern?
- Wie können Konfigurationsdefizite, die zu verzerrten Schätzungen bei der Approximation terrestrischer Laserscans von ungleichmäßig abgetasteten Oberflächen führen, aufgedeckt und verringert werden?
- Welchen Einfluss haben diese Erkenntnisse auf die Untersuchung flächenhafter Deformationen auf Basis terrestrischer Laserscans und wie können diese in die Deformationsuntersuchung integriert werden?

Diese Fragen werden im Laufe der Arbeit wieder aufgegriffen und insbesondere in Kapitel 5 beantwortet. Hier wird immer wieder der Bezug zu den ursprünglichen Beispielen der Bodenbewegungsanalyse im Rheinischen Braunkohlenrevier sowie der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg hergestellt.

Zur Aufarbeitung des relevanten wissenschaftlichen Bezugs stellt Kapitel 2 den wissenschaftlichen Kontext dar. Kapitel 3 beschreibt die Grundlagen des Nivellements, der terrestrischen Laserscans sowie der Ausgleichsrechnung und Konfigurationsanalyse. Auf diese Abschnitte wird im weiteren Verlauf immer wieder verwiesen. Die im Zuge dieser Dissertation 13 angefertigten Veröffentlichungen³ werden in Kapitel 4 kurz zusammengefasst, Kapitel 5 hebt – wie bereits beschrieben – die relevanten Aspekte hervor. Da eine Dissertation immer nur den zur Zeit der Verfassung aktuellen Stand des wissenschaftlichen Fortschritts darstellt, gibt Kapitel 6 einen Überblick über weitere Überlegungen, die im Laufe der Arbeit entstanden, aber bisher nicht näher betrachtet wurden. Die Dissertation schließt mit einem Fazit und Ausblick (Kapitel 7) sowie der Auflistung weiterer, nicht im unmittelbaren Fokus der Dissertation stehender Veröffentlichungen (Kapitel 8).

³Davon sind 8 Veröffentlichung mit Begutachtung und 5 Veröffentlichungen ohne Begutachtung.

2. Wissenschaftlicher Kontext

Konfigurationsanalysen wurden ursprünglich eingesetzt, um den Einfluss einzelner Beobachtungen auf das Ausgleichsergebnis zu untersuchen. Dies gilt sowohl für rein mathematische und statistische Analysen, wo im Speziellen die Auswirkung und der Einfluss von Hebelbeobachtungen bei der Regression eine relevante Rolle spielen [Chatterjee & Hadi, 1986; Cook, 1977, 1979; Pena, 2005], als auch für geodätische Analysen [Wicki, 1998; Baarda, 1968]. Bei letztgenannten stand vor allem die Begutachtung geodätischer Netze im Vordergrund.

Die Konfiguration geodätischer Netze war in den 1970er und 1980er Jahren ein Forschungsschwerpunkt in der Ingenieurgeodäsie. Insbesondere war die Optimierung der Konfiguration – sowohl der Genauigkeit als auch der Zuverlässigkeit – von Bedeutung, was zu einer Vielzahl an Sammelwerken [Grafarend & Sansò, 1985; Halmos & Somogyi, 1979; Pelzer, 1980, 1985] und Einzelveröffentlichungen [Seemkooei, 1998, 2001; Kavouras, 1982] führte. Diese Analysen waren stets davon getrieben, die Netzkonfigurationen aufgrund einer wirtschaftlich bedingt nur geringen Anzahl an Beobachtungen zu analysieren und ggf. zu optimieren. So entstanden Designstufen 0.–3. Ordnung, die die Datumsfixierung, die Konfiguration, das stochastische Modell oder die Optimierung bestehender geodätischer Netze betrafen [Schmitt, 1980, 1985a; Grafarend, 1979; Grafarend & Krumm, 1985; Teunissen, 1985; Niemeier, 1985].

Insbesondere Strategien zur Optimierung geodätischer Netze sind für die vorliegende Arbeit von Interesse, da auch hier das Ziel ist, bestehende Konfigurationen zu analysieren und ggf. zu optimieren. In geodätischen Netzen führt diese Optimierung gewöhnlicherweise zu einer Modifikation der Beobachtungsgewichte [Illner, 1986], zu einer Einführung zusätzlicher Beobachtungen an bestehenden Standpunkten [Silva et al., 2007] oder der Schätzung von Verschiebungsvektoren zur Variation der Messpunktpositionen [Koch, 1982]. Ein Verfahren, dass die Anzahl und Position zusätzlicher – auf Basis der Konfiguration nötiger – Messpositionen bzw. Messpunkte bestimmt, ist hingegen nicht bekannt. Ein objektives, automatisiertes Verfahren zur Messpunktverdichtung liegt demnach bisher nicht vor.

Die Beurteilung der inneren Zuverlässigkeit von Approximationen und geodätischen Netzen basiert auf verschiedenen Kenngrößen [Pelzer, 1980; Niemeier, 1985]. Für eine von diesen führte Förstner [1979] den Begriff der Redundanzanteile erstmals in der geodätischen Wissenschaft ein. Seitdem sind Redundanzanteile in allen Bereichen der Geodäsie etabliert. Dies wird dadurch ersichtlich, dass Redundanzanteile mittlerweile in einer Vielzahl von Lehrbüchern zur Deformationsanalyse oder generell zur Ausgleichung [Niemeier, 2008; Heunecke et al., 2013; Koch, 1997; Jäger et al., 2005], in vielen wissenschaftlichen Publikationen [Vennebusch et al., 2009; Wieser, 2014; Berber et al., 2009; Berber, 2006; Kavouras, 1982] sowie auch in der DIN 18709-4 [Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2010b] und der DIN 18710-1 [Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2010a] erwähnt werden. Diese Redundanzanteile ergeben sich aus der Verbindung von stochastischem Modell, Messgeometrie¹ sowie funktionalem Ausgleichungsmodell mit den zu schätzenden Parametern² (siehe Abschnitt 3.4). Redundanzanteile werden im Weiteren als ein Maß zur Beschreibung der Konfiguration angesehen.

Bisherige Konfigurationsanalysen zielten immer darauf ab, einzelne Beobachtungen auf Basis ihrer Genauigkeit und Wichtigkeit für die Ausgleichung zu beurteilen. Die im Vordergrund stehende Frage war, ob einzelne Beobachtungen zur Ausgleichung hinzugefügt werden sollten oder nicht, da jede Beobachtung im Sinne der Wirtschaftlichkeit zusätzliche Kosten bedeutet hat. Es wurden immer Redundanzanteile zwischen 0.3 und 0.7 angestrebt, um sowohl der Zuverlässigkeit als auch der Wirtschaftlichkeit gerecht zu werden [Staudinger, 1999].

Diese Motivation besteht bei der vorliegenden Dissertation nicht. Vielmehr wird von einer flächenhaften – wenn auch ungleichmäßigen – Abtastung einer Oberfläche ausgegangen, wobei die Gesamtanzahl an Beobachtungen immer ausreichend ist. Daher ist nicht diese Gesamtanzahl vordergründig von Interesse, sondern

¹Bei flächenhaften Approximationen wird der Aspekt der Messgeometrie während der vorliegenden Arbeit aufgrund der flächenhaften Abtastung immer mit der Messpunktverteilung gleichgesetzt.

²Dieser Aspekt gleicht der Objektgeometrie bei flächenhaften Approximationen, da diese das funktionale Modell des Ausgleichs mit den zu schätzenden Parametern festlegt.

die Verteilung der Beobachtungen. Nichtsdestotrotz wird in dieser Arbeit aufgezeigt, dass Konfigurationsanalysen auch bei Anwendungen mit großer Überbestimmung in der Ausgleichung sinnvoll und nötig sind, um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Approximation gewährleisten, nachvollziehen und ggf. optimieren zu können. Prinzipiell gilt, dass die Güte der Konfiguration nicht allein aufgrund einer großen Überbestimmung im Ausgleich gegeben ist.

Speziell im Bereich des terrestrischen Laserscannings (TLS) ist dieser Aspekt bisher unzureichend behandelt. Dies ist u.a. durch zwei Tatsachen zu begründen:

- Bei einer Überbestimmung im Ausgleich von vielen Tausend oder Millionen Beobachtungen schien die Analyse der Konfiguration eher von untergeordneter Bedeutung zu sein.
- Aufgrund der flächenhaften Abtastung treten Hebelbeobachtungen und damit lokal isolierte Messpunkte nicht auf. Somit ist auch der Bedarf zusätzlicher Beobachtungen für die Ausgleichung nicht vorhanden.

Das führt dazu, dass TLS-basierte Deformationsanalysen oder Approximationen die Konfiguration des Ausgleichs unbeachtet lassen, obwohl die Abtastung der Oberfläche ungleichmäßig ist [Eling, 2009; Schäfer et al., 2004; Ioannidis et al., 2006; Wang et al., 2012; Sarti et al., 2009; Dutescu et al., 2009]. Wie aber im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit gezeigt wird, stellt die Konfiguration – hier im Speziellen die Punktverteilung – gerade im Falle flächenhafter Deformationsanalysen, bei denen aufgrund unbekannter Deformationen nur beschränktes Modellwissen vorliegt, aber dennoch hohe Genauigkeitsanforderungen bestehen, einen limitierenden Faktor dar. Dennoch ist die Relevanz der Konfigurationsanalysen nicht nur auf die Untersuchung flächenhafter Deformationen zu beschränken, sondern auf generelle Flächenparametrisierungen und -modellierungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen zu beziehen: Denn das Modellwissen liegt beim Laserscanning bei fast jeder Anwendung kaum in dem Detailgrad vor, der auf Basis einer hochauflösenden Laserscannermessung erfasst werden kann. Somit ist das Modellwissen im Gegensatz zu der in der Punktwolke enthaltenen Information bei fast allen Anwendungen beschränkt. Folglich ist die Relevanz von Konfigurationsanalysen auf die meisten laserscannerbasierten Flächenanalysen übertragbar.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation an. Die Konfiguration bei der Approximation abgetasteter Oberflächen wird untersucht und es werden Rückschlüsse zur Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Parameterschätzung gezogen. Weiterhin werden Strategien zur Optimierung diskutiert und angewendet. Diese setzen an der ungleichmäßigen Abtastung der Oberflächen an, die jeweils bei den behandelten Anwendungen des Nivellements und terrestrischen Laserscannings vorliegen. Insbesondere ist die Konfiguration hinsichtlich lokaler Verdichtungen – im Falle der Nivellements – sowie einer generell ungleichmäßigen Abtastung – im Falle sowohl der Nivellements als auch der Laserscans – zu untersuchen. Beide Aspekte sind, wie in diesem Kapitel beschrieben, bei der flächenhaften Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen bisher nicht ihrer Relevanz entsprechend untersucht worden.

In einem weiteren Kontext gesehen reihen sich diese Untersuchungen ein in die generelle Transformation punktweiser Betrachtungen und Auswertemethoden hin zu flächenhaften Gegenständen. Diese Transformation beschäftigt augenblicklich weite Teile der ingenieurgeodätischen Forschung, wie anhand der einführenden Worte zum ingenieurgeodätischen Ziel der ganzheitlichen Raumkontinuierlichkeit und den in Heunecke et al. [2013, S. 653 ff.] genannten aktuellen Entwicklungen zur flächenhaften Erfassung von Deformationen deutlich wird. Daher versteht sich diese Arbeit auch als ein einzelner Aspekt im Kontext vieler weiterer Bestrebungen, die den messtechnischen und modellmäßigen Übergang vom einzelnen Messpunkt auf flächenhafte Abtastungen forcieren.

3. Geodätische und mathematische Grundlagen

Die vorliegende Dissertation hebt schon im Titel hervor, dass verschiedene Bereiche aus der Ingenieurgeodäsie und der in dieser Disziplin verwendeten Mess- und Auswertemethoden Grundlage für die Untersuchungen sind. Der Titel verweist sowohl auf eine Konfigurationsanalyse, die Approximation von Oberflächen als auch auf die ingenieurgeodätischen Instrumente Nivellier und terrestrischer Laserscanner. Die Grundlagen, die sich hinter diesen Begriffen verbergen und im weiteren Verlauf der Dissertation die Basis für weiterführende Analysen bilden, werden im vorliegenden Kapitel näher beschrieben.

Abschnitt 3.1 wiederholt die Grundlagen von Präzisionsnivellements und Abschnitt 3.2 diejenigen von terrestrischen Laserscans. Die beiden geodätischen Instrumente Nivellier und terrestrischer Laserscanner unterscheiden sich grundlegend sowohl in ihren Funktionalitäten, dem Messprinzip sowie ihren stochastischen Eigenschaften. Die jeweiligen Herausstellungen der Prinzipien zur Abtastung von Oberflächen bilden dabei die Motivation für die späteren Konfigurationsanalysen.

Die Grundlage für Konfigurationsanalysen bildet die Ausgleichsrechnung. Im vorliegenden Fall spezifiziert sich diese zur Approximation abgetasteter Oberflächen, also zur Flächenapproximation. Eine Analyse der Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Approximation führt bei geodätischen Netzen, Formanalysen und allen weiteren Parameterschätzungen auf die Analyse der Konfiguration. Daher werden in Abschnitt 3.3 die nötigen Grundlagen der Flächenapproximation erläutert.

Konfigurationsanalysen haben aus geodätischer Sicht ihren Ursprung in der Analyse geodätischer Netze. Die Optimierung dieser geodätischen Netze bildete lange Zeit – etwa in den 1970er und 1980er Jahren – einen Hauptschwerpunkt ingenieurgeodätischer Forschungsarbeit. Die in der damaligen Zeit gelegten Grundlagen werden in dieser Arbeit verwendet, um sie auf die vorliegenden Anwendungen zu übertragen. Abschnitt 3.4 thematisiert daher die Grundlagen der Konfigurationsanalyse, sowohl bezogen auf ihren Ursprung in geodätischen Netzen als auch im Bezug zur Flächenapproximation.

3.1 Präzisionsnivellements

Nivelliere dienen der Messung von Höhenunterschieden zwischen zwei oder mehreren Punkten. Methodisch gesehen besteht das zugrunde liegende Verfahren nur aus der Differenzbildung von zwei Höhenablesungen, wobei die Position der gemessenen Höhenunterschiede prinzipiell beliebig gewählt werden kann. Durch Messung von Höhenunterschieden in mehreren Epochen ist zusätzlich eine zeitliche Variation der Höhendifferenzen analysierbar. Dafür wird die Differenz zwischen gemessenen Höhen (-unterschieden) an identischen Höhenbolzen gebildet. Diese zeitlichen Höhenänderungen bilden die Grundlage für die späteren Betrachtungen.

Die Genauigkeit des berechneten Höhenunterschieds richtet sich dabei sowohl nach dem verwendeten geodätischen Equipment als auch nach der Messstrategie. Zur Erzielung höchster Genauigkeiten wird daher auf Präzisionsnivellements zurückgegriffen. Auf diese Aspekte der Methodik, der Genauigkeit von Präzisionsnivellements sowie der Abtastung von Oberflächen wird in den folgenden Abschnitten 3.1.1–3.1.3 detaillierter eingegangen. Die darauf basierende Strategie zur Parametrisierung der Höhenänderungen thematisiert anschließend Abschnitt 3.1.4.

3.1.1 Methodik

Mit Hilfe von Nivellements kann der räumliche Höhenunterschied h_{AB} zwischen zwei Punkten A und B bestimmt werden:

$$h_{AB} = h_B - h_A. \quad (3.1)$$

Dieser Höhenunterschied ist aufgrund der Horizontierung des Nivelliers am Schwerefeld, dem Geoid, ausgerichtet. Daher entspricht der nivellierte Höhenunterschied der Differenz der lotrechten Abstände beider Punkte von einer horizontalen Ziellinie (siehe Abb. 3.1) [Kahmen, 2006, S. 401].

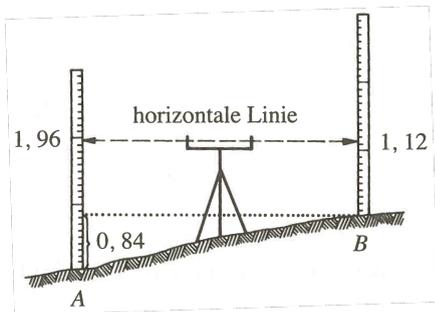


Abbildung 3.1: Methodik des Nivellements zur Bestimmung des Höhenunterschieds $h_{AB} = 1.96 \text{ m} - 1.12 \text{ m} = 0.84 \text{ m}$ zwischen zwei Punkten A und B [Kahmen, 2006, S. 401].

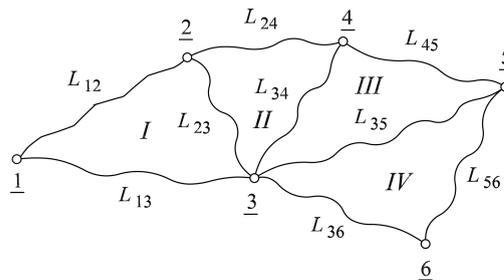


Abbildung 3.2: Nivellementnetz bestehend aus 6 Punkten und mehreren Nivellementzügen [Niemeier, 2008, S. 182].

Für gewöhnlich wird auf diese Weise der Höhenunterschied zwischen zwei lagemäßig bekannten Höhenbolzen bestimmt. Liegen diese Höhenbolzen weit auseinander, so sind mehrere Zwischenstandpunkte einzuführen, zu denen jeweils der Höhenunterschied gemessen wird. Diese Aneinanderreihung von Nivellements führt zu einem Nivellementzug, der mehrere Kilometer Länge annehmen kann. Daher ist die Abtastung von Oberflächen mit Nivellements erst einmal linienhaft. Durch Kombination verschiedener Nivellementzüge entsteht ein Nivellementnetz [Wolf, 1979, S. 52] (Abb. 3.2).

Sind höchste Genauigkeitsansprüche an die Bestimmung der Höhenunterschiede gestellt, wird ein Präzisionsnivellement durchgeführt. Dies beruht sowohl auf der Verwendung von Präzisionsnivellieren (Nivelliere höchster Genauigkeit [Deumlich & Staiger, 2002, S. 274 ff.]) und Präzisionsnivellierlatten (Speziallatten für Präzisionsnivellements [Deumlich & Staiger, 2002, S. 281]) als auch auf aufwendigeren Mess- und Auswertestrategien [Kahmen, 2006, S. 443 f.]. Die Datumsfixierung zur Bestimmung absoluter Höhen kann durch die Einbeziehung mindestens einer Absoluthöhe, z.B. der gegebenen Höhe H_A des Startpunktes, erfolgen:

$$H_B = H_A + h_{AB}. \tag{3.2}$$

Die ausgeglichenen Höhen und zugehörigen Genauigkeiten werden dann über einen epochenweisen Netzausgleich, in den die gemessenen Höhenunterschiede und die Absoluthöhen einfließen, geschätzt (siehe z.B. Niemeier [2008, S. 129 ff.] oder Wolf [1979, S. 52 ff.]).

Zur Bestimmung zeitlicher Höhenänderungen – der eigentlichen Beobachtungsgröße für die späteren Analysen – werden in mehreren Epochen nivellierte Höhen (hier: Epochen t_1 und t_2) voneinander subtrahiert:

$$\Delta h_{B,t_1t_2} = H_{B,t_2} - H_{B,t_1}. \tag{3.3}$$

Somit liegen zeitliche Höhenunterschiede Δh_i^1 , die die Bodenbewegungen an n diskreten Messpunkten $[x, y]_i$, $i = 1, \dots, n$ darstellen, in verschiedenen Epochenunterschieden vor. Voraussetzung hierfür ist die Annahme, dass die Höhen während der Messung einzelner Nivellementzüge innerhalb einer Epoche konstant sind. Diese Annahme kann bei den vorliegenden Untersuchungsgebieten getroffen werden.

3.1.2 Stochastische Analyse

Bei der Abschätzung der Genauigkeit in Form der Standardabweichung $\sigma_{\Delta h}$ der zeitlichen Höhenänderungen Δh_i müssen neben der Genauigkeit des Präzisionsnivellements auch die Unsicherheiten der Punktvermarkungen mit berücksichtigt werden. Generell ist es – z.B. nach Deumlich & Staiger [2002, S. 274] und Witte

¹Im folgenden wird lediglich die Kurzform Δh_i für die zeitlichen Höhenunterschied verwendet, ohne Angabe der Messzeitpunkte, z.B. t_j und t_k .

& Schmidt [2004, S. 282] – möglich, mit Nivellieren höchster Genauigkeit eine mittlere Nivelliergenauigkeit von $\leq 0.5 \text{ mm}$ auf 1 km Doppelnivellement zu erzielen. Dies beinhaltet allerdings nur die Messgenauigkeit für das räumliche Nivellement, also noch nicht die Ermittlung zeitlicher Höhenunterschiede aus räumlichen Nivellements mehrerer Epochen.

Daher wird im Folgenden in Summe eine Standardabweichung von

$$\sigma_{\Delta h} = 1 \text{ mm} \quad (3.4)$$

für die äußere Genauigkeit (Messgenauigkeit und Punktsicherheit) der aus zwei Epochen berechneten Höhenunterschiede – die bereits aus einer vorherigen Netzausgleichung resultieren [Wolf, 1975, S. 127 ff.] – angenommen. Diese Annahme beruht auf theoretischen Überlegungen. Die Größenordnung kann aber auch empirisch durch eine hohe Anzahl an durchgeführten Messungen und zugehöriger Epochenvergleichen verschiedener Gebiete bestätigt werden [Zeimet & Kuhlmann, 2011].

Aus dieser Annahme folgt das stochastische Modell der als Beobachtung verwendeten Höhenänderungen mit der Kovarianzmatrix der Beobachtungen Σ_{ll}

$$\Sigma_{ll} = \sigma_{\Delta h}^2 \mathbf{Q}_{ll} = \sigma_{\Delta h}^2 \mathbf{I}, \quad (3.5)$$

wobei \mathbf{I} der Einheitsmatrix und \mathbf{Q}_{ll} der Kofaktormatrix der Beobachtungen gleicht. Daher wird – wie in Holst et al. [2013c] beschrieben – angenommen, dass keine Korrelationen zwischen den Beobachtungen vorliegen, alle Beobachtungen gleich genau sind und die Messabweichungen normalverteilt sind. Diese Annahmen sind zwar begründbar, auf Basis von vielen ausgewerteten Regionen lässt sich jedoch auch feststellen, dass räumlich benachbarte Höhenmessungen eine gewisse Korrelation aufweisen: Denn liegen in Untersuchungsgebieten viele dicht gehäufte Nivellements vor, so ist die aus der Ausgleichung resultierende Genauigkeit in vielen Fällen besser als 1 mm (siehe Gl. 3.4). Über eine Integration von Korrelationen räumlich benachbarter Höhenmessungen könnte zukünftig also nachgedacht werden.

3.1.3 Abtastung von Oberflächen

Nivellements werden entlang linienhafter Züge durchgeführt. Wie aus Abb. 3.2 sowie aus Beispielregion A (Abb. 1.1) ersichtlich, kann durch die Messung vieler Nivellementzüge eine eher flächenhafte Abtastung der Oberfläche erreicht werden. Dies ist auch anhand von Beispielgebiet B in Abb. 3.3 ersichtlich. Dennoch liegen die Messungen der Höhenänderungen nur an vereinzelt, räumlich ungleichmäßig verteilten Orten vor. Daraus folgt, dass die Abtastung von Oberflächen zwar flächenhaft durchgeführt werden kann, die Verteilung der Messpunkte aber ungleichmäßig bezogen auf die Abstände benachbarter Messpunkte ist (siehe Abb. 3.3). Zudem variiert der Abstand benachbarter Punkte generell zwischen Gebieten mit durchweg höherer Abtastung und denjenigen mit durchgehend geringer Abtastung. Es ergeben sich räumliche Punktabstände zwischen einigen Metern bis in den Hundertmeterbereich. Zwei Tatsachen sind die wesentlichen Ursachen für diese unregelmäßige Abtastung der Oberfläche mit Nivellements in den begutachteten Gebieten:

- Wirtschaftlichkeit: Das Nivellement ist ein zeitintensives Messverfahren. Daher bedeutet jeder zusätzliche Messpunkt ein Mehr an wirtschaftlichem Aufwand.
- Siedlungsstruktur: Höhenbolzen werden zu größtem Teil an Bauwerken befestigt. Daher liegen die Messpunkte entlang von Straßenzügen, sodass dünn besiedelte Bereiche innerhalb von Ortschaften auch geringer abgetastet sind.

Dennoch können diese räumlich unregelmäßig gemessenen Höhenunterschiede zur flächenhaften Analyse der Höhenänderungen herangezogen werden. Wie später gezeigt wird, müssen dabei allerdings Kriterien bzgl. der Konfiguration des zugrunde liegenden Beobachtungsnetzes vorliegen, die die Abstände und räumliche Homogenität der Messpunkte im Bezug zur Komplexität der Bodenbewegungen betreffen. Nur unter diesen Umständen kann eine zuverlässige flächenkontinuierliche Analyse erfolgen.

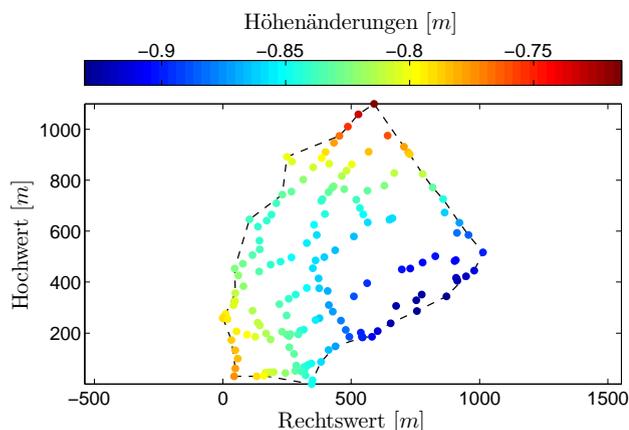


Abbildung 3.3: Punktverteilung und Höhenänderungen (farblich codiert) beim Nivellement in der Beispielregion B.

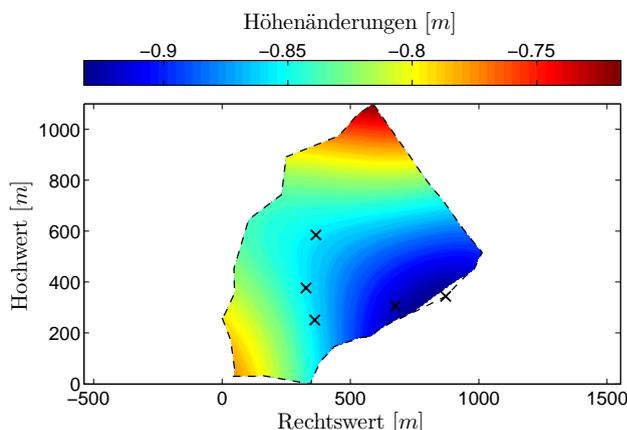


Abbildung 3.4: Modellfläche basierend auf approximiertem, bivariatem Polynom von Beispielregion B (schwarze Kreuze = detektierte Ausreißer).

3.1.4 Parametrisierung abgetasteter Oberflächen

Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben ist, besteht das Ziel bei der Dokumentation sumpfungsbedingter Bodensenkungen sowohl in der Detektion bewegungshomogener Bereiche als auch in der Detektion tektonischer Störungen, sodass auf dieser Basis jeweils eine Risikoeinschätzung zum Auftreten von sumpfungsbedingten Setzungsschäden erfolgen kann. Zur Erreichung beider Ziele ist eine flächenhafte Parametrisierung der nivellierten Höhenunterschiede aufgrund der räumlichen Ausprägung bewegungshomogener Bereiche als auch tektonischer Störungen sinnvoll. Im Falle eines bewegungshomogenen Bereiches ist zu erwarten, dass der überwiegende Großteil der gemessenen Höhenunterschiede durch eine relativ einfache Flächenparametrisierung zu beschreiben ist. Im Falle tektonischer Störungen ist von linienhaft abweichenden Strukturen von der Flächenparametrisierung auszugehen, da diese Störungen eine scharfe Diskontinuität gegenüber der sonst eher gleichmäßigen Bodenbewegung aufweisen. Auf weitere methodische Einzelheiten bei der Detektion tektonischer Störungen sei an dieser Stelle auf Kapitel 4 sowie Veröffentlichungen A5 und A6 [Holst & Kuhlmann, 2013, 2015a] verwiesen.

Zur Parametrisierung der zeitlichen Höhenänderungen, die an diskreten Positionen gemessen wurden, wird ein flächenhaftes Modell herangezogen. Darauf aufbauend kann bei optimaler Modellierung eine Aussage zum generellen Senkungsverhalten im gesamten Untersuchungsgebiet getroffen werden. Dies kann exemplarisch anhand der eindimensionalen Abbildung 3.5 erläutert werden. Die an verschiedenen Gebäuden vermarkten Nivellementbolzen sind in rot dargestellt, die gemessenen Höhenänderungen zwischen zwei Zeitpunkten mit roten Pfeilen. Aus diesen Höhenänderungen lässt sich eine mathematische Modellfläche entwickeln, die in schwarz angedeutet ist. Diese Skizze ist vereinfacht dargestellt: Es müssen deutlich mehr Höhenunterschiede gemessen sein als zur Berechnung der Fläche notwendig sind. Liegen dann alle gemessenen Höhenunterschiede bis auf die unvermeidlichen Beobachtungsabweichungen auf der Fläche, ist es sehr unwahrscheinlich, dass andere, nicht beobachtete Punkte nicht auf dieser Fläche liegen. Daher ist bei einem optimal entwickelten Flächenmodell davon auszugehen, dass alle Bodenbewegungen im gesamten Untersuchungsgebiet erfasst werden [Holst et al., 2013c,d].

Zur Parametrisierung der Höhenänderungen Δh_i wird ein bivariates Polynom verwendet [Lancaster & Salkauskas, 1986]. Dieses Flächenpolynom $P(x_i, y_i)$ lässt sich mathematisch durch

$$P(x_i, y_i) = \sum_{k=0}^{a_x} \sum_{m=0}^{a_y} p_{k,m} x_i^k y_i^m; \quad k + m \leq a \quad (3.6)$$

definieren [Rawiel, 2001], falls die Ordnungen in x - und y -Richtung des Polynoms a_x und a_y gleich groß sind: $a = a_x = a_y$. Die Koordinaten x_i und y_i definieren dabei die zweidimensionalen Koordinaten der

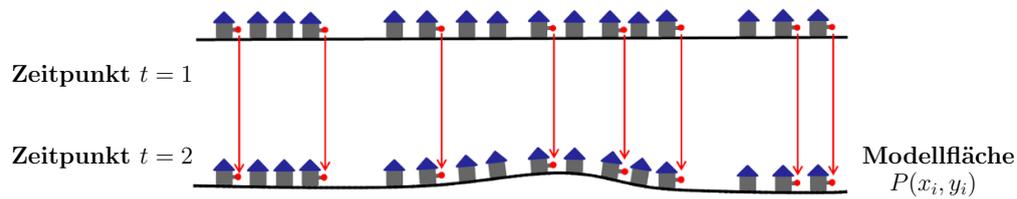


Abbildung 3.5: Skizze zur flächenhaften Modellbildung bei der Approximation nivellierter Höhenunterschiede (eindimensional dargestellt).

Höhenbolzen, an denen die Höhenänderungen beobachtet sind. Während diese Koordinaten gegeben sind, besteht bei einer Approximation mit einem Flächenpolynom die Aufgabe in der Bestimmung der Parameter

$$\mathbf{p} = [p_{0,0}, p_{0,1}, \dots, p_{0,a_y}, p_{1,0}, p_{1,1}, \dots, p_{a_x,0}]^T \quad (3.7)$$

unter der Annahme, dass die Ordnungen a_x und a_y gegeben sind. Falls alle Parameter signifikant sind und $a = a_x = a_y$ gilt, wird die maximale Anzahl u_{\max} der Parameter über $u_{\max} = (a + 1) \cdot (a + 2)/2$ bestimmt [Lancaster & Salkauskas, 1986]. Aus den entsprechenden Modellparametern \mathbf{p} lassen sich Informationen über das Bodenbewegungsverhalten, z.B. bzgl. einer Absenkung, Neigung oder Krümmung, ableiten.

Neben bivariaten Polynomen existieren noch viele weitere flächenhafte Parametrisierungen, die grundsätzlich zur Approximation der nivellierten Höhenänderungen herangezogen werden könnten. Die Wahl von Polynomen erweist sich für den Fall der sumpfungsbedingten Bodensenkungen jedoch als vorteilhaft aus Sicht der zugrunde liegenden Messpunktverteilung im Gegensatz zu anderen, für ähnliche Anwendungen verwendete Verfahren. Für Einzelheiten sei auf Kapitel 4 sowie Veröffentlichung A2 [Holst & Kuhlmann, 2015b] verwiesen.

Durch Punktverwechslungen, schlechte Vermarkungen oder lokal abweichende Phänomene können einzelne gemessene Höhenänderungen vom großräumigen Senkungsverhalten im Untersuchungsgebiet abweichen. Die zugehörigen Messpunkte werden folgend als auffällige Punkte bezeichnet. Ein Punkt gilt dabei als auffällig, falls seine absolute Abweichung vom Modell außerhalb des Konfidenzbereichs von $2.58 \cdot \sigma_{\Delta h} = 2.58 \text{ mm}$ liegt (Gl. 3.4). Dieser Ausreißertest basiert damit auf einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99.0% [Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), 2010b].

Aus dieser gewählten Parametrisierung folgt, dass zum einen die Komplexität des bivariaten Polynoms an die Komplexität des Bodensenkungsverhaltens anzupassen ist, indem die Ordnungen a_x und a_y geeignet gewählt werden. Je komplexer die Bodenabsenkung, desto größer ist auch die Parameteranzahl. Zum anderen sind auffällige Punkte zu detektieren und von der Modellentwicklung auszuschließen. Diese und weitere Überlegungen führen dazu, dass das konkrete Polynommodell datenadaptiv zu entwickeln ist. Bestandteile dieser datenadaptiven Modellentwicklung sind dann im Gesamten die Festlegung der Polynomordnungen, die Elimination nichtsignifikanter Parameter zur Vermeidung einer Überparametrisierung, die Detektion auffälliger Punkte und die Prüfung des endgültigen Polynommodells. Einzelheiten zu dieser Prüfung anhand von fünf Kriterien sind in den Veröffentlichungen A1 und A3 [Holst et al., 2013b,c] zu finden, wie auch in Kapitel 4 beschrieben wird.

Das Ergebnis der Flächenparametrisierung für die bereits eingeführte Testregion B zeigt Abb. 3.4. Neben dem ausgewerteten Polynom sind fünf detektierte auffällige Punkte dargestellt. Bei der Modellentwicklung werden alle Kriterien eingehalten, sodass von einer erfolgreichen Approximation auszugehen ist. Dies führt ferner zu der Annahme bewegungshomogener Bodensenkungen. Dies geht einher mit einem nur sehr geringen Risiko sumpfungsbedingter Setzungsschäden. Daraus folgt auch, dass kein Grund zur Annahme einer schädigungsrelevanten tektonischen Störung vorhanden ist. Diese Einschätzung beruht auf den Methoden, die auch im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelt wurden. Daher sei an dieser Stelle auf Kapitel 4 sowie die Veröffentlichungen A5 und A6 [Holst & Kuhlmann, 2013, 2015a] verwiesen.

3.2 Terrestrisches Laserscanning

Beim TLS wird die Umgebung mit einer Vielzahl von dreidimensionalen Punkten abgetastet. Das dahinter stehende Messprinzip hängt von der Bauart des Laserscanners ab, wobei Kamera-, Hybrid- und Panoramascanner unterschieden werden [Zogg, 2008]. Die weitere Arbeit beschränkt sich auf Panoramascanner, da diese eine komplette horizontale sowie nahezu komplette vertikale Abtastung der Umgebung ermöglichen.

Die für die Dissertation relevanten Aspekte der Methodik (Abschnitt 3.2.1) und der Stochastik terrestrischer Laserscans (Abschnitt 3.2.2) werden im folgenden näher erläutert. Des Weiteren wird auf die daraus resultierende Abtastung von Oberflächen eingegangen (Abschnitt 3.2.3), sodass Abschnitt 3.2.4 final die Strategie zur Parametrisierung von Laserscans vorstellt.

3.2.1 Methodik

Zur dreidimensionalen Erfassung der Umgebung mit Hilfe eines terrestrischen (Panorama-) Laserscanners wird ein Laserstrahl in einer Laserdiode erzeugt und mit Hilfe eines rotierenden monogonen Spiegels vertikal mit dem Winkel β abgelenkt. Durch eine zusätzliche horizontale Rotation um die Stehachse des Scanners erfolgt eine horizontale Ablenkung mit dem Winkel t [Gordon, 2008; Rietdorf, 2005] (siehe Abb. 3.6). Die Schrittweiten $\Delta\beta$ und Δt der Winkelstellungen bestimmen dabei über $\beta = \beta_0 + \Delta\beta$ und $t = t_0 + \Delta t$ die Auflösung bzw. die Anzahl an Messpunkten m bei einem kompletten Panoramascan.

Der Laserstrahl wird auf der auftreffenden Oberfläche diffus reflektiert und in das Empfangssystem des Scanners zurück gelenkt. Dieses Prinzip wird genutzt, um die Länge der zurückgelegten Strecke s über eine Laufzeitmessung oder Phasenvergleichsmessung [Eling, 2009] zu berechnen. Daher werden pro gemessenem Punkt \mathbf{x}_j drei Polarbeobachtungen s_j, β_j, t_j abgelesen, die ein Beobachtungstriplet $\mathbf{l}_j = [s, \beta, t]_j^T$ bilden. Über dreidimensionales polares Anhängen folgt daraus die kartesische Koordinate

$$\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_j \cdot \sin \beta_j \cdot \cos t_j \\ s_j \cdot \sin \beta_j \cdot \sin t_j \\ s_j \cdot \cos \beta_j \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Zugrunde liegt hier ein rechtshändiges Koordinatensystem [Holst et al., 2014a] (Abb. 3.7). Die Anzahl $j = 1, \dots, m$ gemessener kartesischer Punkte \mathbf{x}_j bzw. Polarbeobachtungen $\mathbf{l}_j = [s, \beta, t]_j^T$ wird mit m bezeichnet, woraus sich $i = 1, \dots, n$ mit $n = 3 \cdot m$ originäre Polarbeobachtungen s, β, t ergeben.

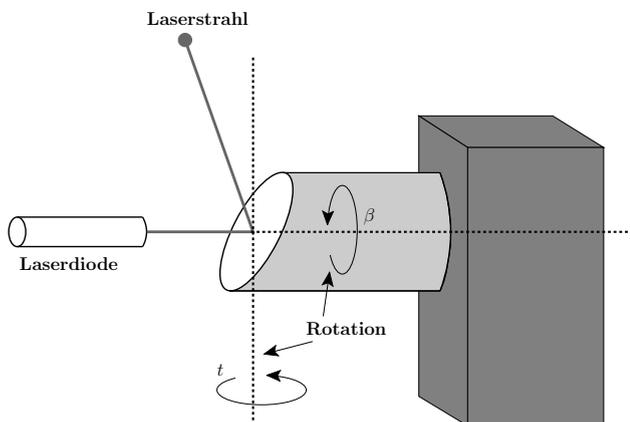


Abbildung 3.6: Prinzip der Strahlableitung beim TLS mit horizontaler Rotation um t und vertikaler Rotation um β (in Anlehnung an Eling [2009]).

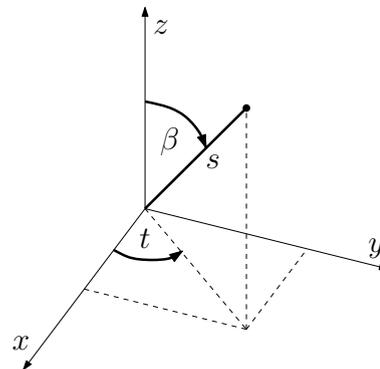


Abbildung 3.7: Polarbeobachtungen s, β, t und kartesische Koordinaten x, y, z im Scannersystem.

3.2.2 Stochastische Analyse

Die aus dem vorgestellten Messprinzip resultierenden Polarbeobachtungen sowie die endgültigen kartesischen Koordinaten unterliegen verschiedenen zufälligen und systematischen Abweichungen, die damit das stochastische Modell beim TLS festlegen. Die systematischen Abweichungen lassen sich dabei in vier Kategorien untergliedern [Soudarissanane et al., 2011; Zogg, 2008]:

- Scannerinterne Abweichungen (z.B. Streckenmessung, Strahlableitung)
- Atmosphärenbedingte Abweichungen (z.B. Temperatur, Luftdruck)
- Messkonfigurationsbedingte Abweichungen (z.B. Einfallswinkel)
- Oberflächenbedingte Abweichungen (z.B. Rauigkeit, Reflektivität, Farbe)

Diese Abweichungen beeinflussen eine Laserscannermessung systematisch, da der Laserstrahl z.B. immer mit der Oberfläche interagiert [Schäfer, 2014] und die Streckenmessung vom Einfallswinkel abhängt [Zámečnicková & Neuner, 2014]. Die Größenordnung der resultierenden Effekte übersteigt aufgrund verbesserter Strecken- und Winkelgenauigkeiten der originären Messwerte mittlerweile diejenige der zufälligen Abweichungen [Holst & Kuhlmann, 2014a; Holst et al., 2014d].

Aus diesem Sachverhalt folgt, dass systematische Effekte, die in der Mess- und Auswertekette unberücksichtigt bleiben, eine Laserscannermessung (signifikant) beeinflussen können. Als Genauigkeitsmaß für Laserscannermessungen geben Hersteller meist eine Standardabweichung an, die sowohl die zufälligen Abweichungen als auch die scannerinternen berücksichtigt, da über diese eine Aussage unabhängig von Atmosphäre, Messkonfiguration und Oberfläche getroffen werden kann. So gilt z.B. für den Laserscanner Leica HDS 6100 bei optimalen Oberflächenbedingungen eine Genauigkeit von $\sigma_{s,j} \leq 3 \text{ mm}$ bei $s_j \leq 50 \text{ m}$ und $\sigma_\beta = \sigma_t = 125 \text{ } \mu\text{rad} \approx 8 \text{ mgon}$ [Leica Geosystems, 2011] sowie für den Laserscanner Leica ScanStation P20 eine Genauigkeit von $\sigma_{s,j} \leq 0.7 \text{ mm}$ bei $s_j \leq 50 \text{ m}$ und $\sigma_\beta = \sigma_t = 40 \text{ } \mu\text{rad} \approx 2.5 \text{ mgon}$ [Leica Geosystems, 2014].

Obwohl diese Genauigkeiten und die resultierenden Abweichungen aufgrund der erwähnten systematischen Effekte nicht unkorreliert sind, werden sie meist als unkorreliert angenommen. Dies ist zum einen mit einer Vereinfachung der Modellierung zu begründen, zum anderen auch mit dem fehlenden Wissen über die tatsächliche Korrelationsstruktur sowie deren Größenordnung. Erste Ansätze versuchen dem entgegenzuwirken [Koch et al., 2010; Koch & Kuhlmann, 2009]. In Abschnitt 6.2 werden diese Aspekte wieder aufgegriffen.

Aus diesen Grundlagen heraus ergibt sich das stochastische Modell beim TLS aus der Kovarianzmatrix der Beobachtungen eines Beobachtungstriplets $\Sigma_{ll,j}$ bzw. derjenigen der kompletten Punktwolke Σ_{ll} zu

$$\Sigma_{ll} = \begin{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{s,1}^2 & & \\ & \sigma_\beta^2 & \\ & & \sigma_t^2 \end{bmatrix}}_{\Sigma_{ll,1}} & & \\ & \ddots & \\ & & \Sigma_{ll,m} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Aufgrund der Vernachlässigung von Korrelationen ist nur die Hauptdiagonale gefüllt. Die Streckengenauigkeit wird meist streckenabhängig modelliert, wobei für den Laserscanner Leica HDS 6100 $\sigma_{s,j} = 0.5 \text{ mm} + 0.1 \text{ mm/m}$ [Holst et al., 2012] und für den Laserscanner Leica ScanStation P20 $\sigma_{s,j} = 1.0 \text{ mm} + 0.02 \text{ mm/m}$ [Holst et al., 2015] angenommen werden kann. Durch das Varianzfortpflanzungsgesetz (VFG) [Koch, 1997; Niemeier, 2008] gelingt eine Fortpflanzung dieses stochastischen Modells auf die kartesischen Koordinaten Σ_{xx} , wobei die einzelnen Submatrizen $\Sigma_{xx,j}$ dann nicht mehr unkorreliert sind.

3.2.3 Abtastung von Oberflächen

Die im vorherigen Kapitel beschriebene Methodik eines terrestrischen Laserscanners legt die räumliche Abtastung von Oberflächen bereits fest. So beschreibt Abb. 3.8 die Abtastung einer Ebene mit Hilfe eines

Laserscannern in Abhängigkeit des Standpunktes, Abb. 1.2 die bereits beschriebene Abtastung des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg. Diese relativen Punktabstände resultieren aus der Position des Laserscanners (der Messgeometrie) und der Form des abgetasteten Objekts. Gemeinsam bestimmen diese Punkte (zusammen mit dem stochastischen Modell) die Konfiguration der Messungen [Holst et al., 2014a] (siehe auch Abschnitt 3.4). Die absolute Punktdichte hängt von den Winkelinkrementen $\Delta\beta$ und Δt ab, mit denen die Oberfläche abgetastet wird.

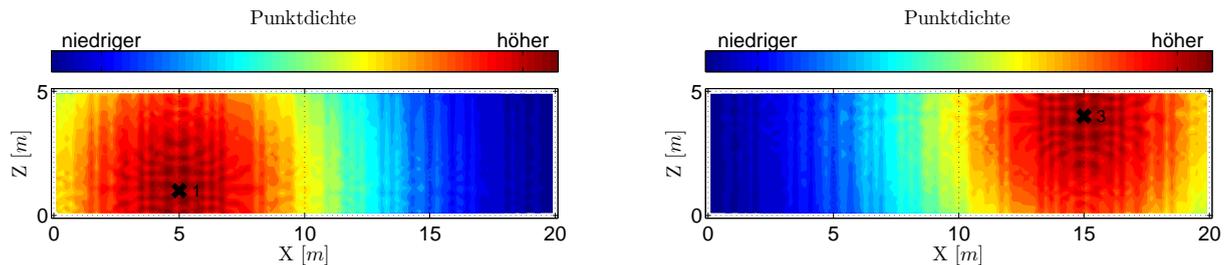


Abbildung 3.8: Relative Punktdichte nach Abtastung mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners von den Standpunkten 1 und 3 in 10 m Entfernung zur Ebene; Simulation auf Basis einer gescannten Ebene (schwarzes Kreuz = Projektion des Scannerstandpunktes in Ebene).

Aus Abb. 3.8 wird deutlich, dass die Abtastung von Oberflächen auf Basis von terrestrischen Laserscannern ungleichmäßig ist. Die Ursachen sind im Unterschied zur beschriebenen ungleichmäßigen Abtastung von Nivellements nicht mit Aspekten der Wirtschaftlichkeit oder äußeren Umständen zu begründen (siehe Abschnitt 3.1.3), sondern vielmehr mit der Messmethodik beim TLS selber: Die im Scannersystem ursprünglich gleichmäßige Oberflächenabtastung durch die Polarelemente führt zu einer ungleichmäßigen Punktverteilung auf dem Objekt im kartesischen Raum. Ausnahmen hiervon ergeben sich nur bei speziellen Mess- und Objektgeometrien: Bei der Abtastung einer Kugel mit Hilfe eines Scanners, der sich im Zentrum der Kugel befindet, liegt eine gleichmäßige Oberflächenabtastung im kartesischen Raum vor. Dies gilt allerdings nur für den horizontalen Punktabstand, der vertikale Punktabstand variiert auch hier.

3.2.4 Parametrisierung abgetasteter Oberflächen

Die Parametrisierung der mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners abgetasteten Oberfläche erfolgt immer aufgaben- und objektspezifisch. So haben sich verschiedene Formen der Modellierung etabliert, die punkt-, punktwolken-, oberflächen-, geometrie- oder parameterbasiert arbeiten [Ohlmann-Lauber & Schäfer, 2011]. Falls die genaue Geometrie der Oberfläche nicht oder nur unzureichend bekannt ist, werden in diesem Sinne oft oberflächenbasierte Ansätze gewählt, die die Oberfläche durch Freiformflächen² [Grimm-Pitzinger & Rudig, 2005b,a; Harmening & Neuner, 2014] oder Vermaschungs- bzw. Interpolationsverfahren [Alba et al., 2006a,b; Schäfer et al., 2004; Ohlmann-Bartusel, 2009; Ohlmann-Lauber, 2012] darstellen. Rein geometriebezogene Ansätze stellen die Oberfläche z.B. mit Hilfe lokaler [Eling, 2009; Chmelina et al., 2012] oder globaler [Ioannidis et al., 2006; van Gosliga et al., 2006; Lindenbergh et al., 2009] Approximationen dar. Stehen Aussagen bzgl. geometrischer Parameter im Vordergrund, so werden parametrische Modelle herangezogen [Schneider, 2006; Lindenbergh & Pfeifer, 2005].

Bei den Analysen der vorliegenden Dissertation stehen sowohl geometrie- als auch parameterbasierte Modelle bzw. Aussagen im Vordergrund. Das zu analysierende Objekt ist der Hauptreflektor des Radioteleskops Effelsberg [Holst & Kuhlmann, 2011, 2014a; Holst et al., 2012, 2014c, 2015]. Dieser Hauptreflektor lässt sich geometrisch als Rotationsparaboloid parametrisieren [Hachenberg, 1968]. Auf Basis dieser Parametrisierung können dann sowohl geometriebezogene Untersuchungen (flächenhafte Abweichungen von der bestfit Approximation) als auch parameterbezogene Untersuchungen (Schätzwerte der relevanten Parameter) durchgeführt werden³.

²z.B. Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) [Grimm-Pitzinger & Rudig, 2005b,a] oder B-Spline Flächen [Harmening & Neuner, 2014].

³Gleiches gilt für die in Holst et al. [2014a]; Holst & Kuhlmann [2014b] beschriebene Approximation gescannter Ebenen. Diese wird in Abschnitt 5.1 wieder aufgegriffen.

Die parametrischen Grundlagen dieser Deformationsuntersuchung werden an dieser Stelle kurz wiederholt. Die Form eines Rotationsparaboloids wird allein durch die Brennweite f beschrieben, woraus die Gleichung

$$\frac{X_j^2 + Y_j^2}{4 \cdot f} - Z_j = 0 \quad (3.10)$$

folgt. Hierbei sind $[X, Y, Z]$ die Koordinaten, die das Rotationsparaboloid in seiner Normallage beschreiben [Holst & Kuhlmann, 2011; Holst et al., 2012]. Zur Transformation dieser Normallage in eine von diesem Koordinatensystem unabhängige räumliche Ausrichtung, z.B. in das lokale Koordinatensystem $[x, y, z]$ des Laserscanners, ist eine dreidimensionale Helmert-Transformation [Niemeier, 2008, S. 346 ff.] durchzuführen, wobei 5 Transformationsparameter ausreichen:

$$\mathbf{X}_j = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \mathbf{R}_y(\varphi_y) \cdot \mathbf{R}_x(\varphi_x) \cdot \mathbf{x}_j + \mathbf{X}_v. \quad (3.11)$$

Die Rotationsmatrizen (mit zugehörigen Winkeln φ_x und φ_y) sind durch $\mathbf{R}_y(\varphi_y)$ und $\mathbf{R}_x(\varphi_x)$ gegeben, der Translationsvektor mit \mathbf{X}_v . Letztendlich ist ein Rotationsparaboloid in beliebiger Lage und Form demnach durch 6 Parameter

$$\mathbf{p} = [X_v, Y_v, Z_v, \varphi_x, \varphi_y, f]^T \quad (3.12)$$

beschrieben, wobei einzig die Brennweite f über die Form des Rotationsparaboloids entscheidet.

3.3 Flächenapproximation

Auf Basis der flächenhaft abgetasteten Oberfläche wurden Parametrisierungen eines bivariaten Polynoms (Abschnitt 3.1.4) und eines Rotationsparaboloids (Abschnitt 3.2.4) vorgestellt. In beiden Fällen gilt es jeweils, die Parameter \mathbf{p} aus Gl. (3.7) bzw. Gl. (3.12) in einem Ausgleich zu schätzen. Dieser Ausgleich führt bei Annahme zufälliger Messabweichungen auf eine kleinste-Quadrate-Schätzung (kQS), bei der es die Messabweichungen \mathbf{v} gemäß $\mathbf{v}^T \boldsymbol{\Sigma}_l^{-1} \mathbf{v}$ zu minimieren gilt [Koch, 1997; Mikhail & Ackermann, 1976].

Eine kQS kann in verschiedenen Modellen gelöst werden. In der Geodäsie üblich ist eine Lösung über den Ausgleich nach vermittelnden Beobachtungen – auch Gauß-Markov Modell (GMM) genannt – oder über den Allgemeinfeld der Ausgleichsrechnung – auch Gauß-Helmert Modell (GHM) genannt –, der eine Verallgemeinerung des GMM darstellt [Wolf, 1975; Niemeier, 2008; Koch, 1997]. Beide Modelle sind jeweils auf ein Error-in-Variables (EIV) Modell zurückzuführen. Deren Lösung ist auch über das Total Least-Squares Verfahren möglich, wie in geodätischer Literatur beschrieben [Neitzel, 2010; Schaffrin & Wieser, 2008; Neitzel & Petrovic, 2008]. Die Orthogonale Distanzregression (ODR) – oder ihre Verallgemeinerung Generalisierte Orthogonale Distanzregression (GODR) [Helfrich & Zwick, 1993, 1995, 1996; Ahn et al., 2001, 2002; Ahn, 2008; Forbes, 2006a,b] – wird in der Geodäsie hingegen bisher nur selten zur Lösung von Ausgleichungen verwendet, was in Abschnitt 6.1 aufgegriffen wird.

Wie gezeigt wird, lassen sich die Parameter des bivariaten Polynoms aus Gl. (3.6) mit Hilfe eines GMM schätzen, da sich die Parameter \mathbf{p} von den Beobachtungen $l_i = \Delta h_i$ funktional trennen lassen. Bei den Parametern des Paraboloids \mathbf{p} aus Gl. (3.12) und der zugehörigen funktionalen Beschreibung aus Gl. (3.10), (3.11) und (3.8) und den zugehörigen Beobachtungen $\mathbf{l}_j = [s, \beta, t]_j^T$ ist dies nicht möglich, weshalb das GHM zur Schätzung verwendet wird. Nichtsdestotrotz ist es möglich, das GHM als Verallgemeinerung des GMM in den vorliegenden Fällen wieder in das GMM zu überführen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die nötigen Grundlagen des GMM (Abschnitt 3.3.1) und des GHM (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Das Gauß-Markov Modell

Das lineare GMM baut auf dem funktionalen Modell⁴

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = f(\mathbf{p}) = \mathbf{A}\mathbf{p} \quad (3.13)$$

auf, wobei \mathbf{l} die Beobachtungen, \mathbf{v} die Verbesserungen, \mathbf{p} die Parameter und f die lineare funktionale Beziehung – woraus die Designmatrix \mathbf{A}

$$\mathbf{A} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} \quad (3.14)$$

hervorgeht – beschreibt [Niemeier, 2008, S. 137 ff.]. Da die Designmatrix \mathbf{A} die Information über die geometrische Konfiguration des Ausgleichs beinhaltet, wird sie auch Konfigurationsmatrix genannt [Heunecke et al., 2013, S. 174]. Auf Basis dieses funktionalen Modells und dem zugehörigen stochastischen Modell Σ_{ll} ergeben sich die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{p}}$ und die zugehörige Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$ durch die Minimierung der Kostenfunktion $\mathbf{v}^T \Sigma_{ll}^{-1} \mathbf{v}$ [Niemeier, 2008, S. 137 ff.]:

$$\hat{\mathbf{p}} = \left(\mathbf{A}^T \Sigma_{ll}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma_{ll}^{-1} \mathbf{l} \quad (3.15)$$

$$\Sigma_{\hat{p}\hat{p}} = \left(\mathbf{A}^T \Sigma_{ll}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1}. \quad (3.16)$$

Die geschätzten Residuen $\hat{\mathbf{v}}$, die einer Normalverteilung folgen sollten, und ihre zugehörige Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{v}\hat{v}}$ sind durch

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{p}} - \mathbf{l} \quad (3.17)$$

$$\Sigma_{\hat{v}\hat{v}} = \Sigma_{ll} - \underbrace{\mathbf{A} \Sigma_{\hat{p}\hat{p}} \mathbf{A}^T}_{\Sigma_{ii}} \quad (3.18)$$

gegeben.

3.3.2 Das Gauß-Helmert Modell

Liegen funktionale Modelle vor, bei denen die Parameter \mathbf{p} und die Beobachtungen \mathbf{l} nicht nach Gl. (3.13) getrennt werden können, wird das GHM zur Parameterschätzung verwendet [Mikhail & Ackermann, 1976]. In diesem Fall findet eine implizite funktionale Modellierung nach

$$f(\mathbf{l} + \mathbf{v}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (3.19)$$

Anwendung [Niemeier, 2008, S. 173]. Da die zugehörigen funktionalen Beziehungen zumeist – wie auch in der kombinierten funktionalen Beziehung aus Gl. (3.10), (3.11) und (3.8) – nichtlinear sind, findet zudem eine Taylorreihenentwicklung zur iterativen Schätzung von Parameterzuschlägen $\Delta\hat{\mathbf{p}}$ mit $\hat{\mathbf{p}} = \Delta\hat{\mathbf{p}} + \hat{\mathbf{p}}_0$ statt, wobei $\hat{\mathbf{p}}_0$ die Parameter der vorherigen Iteration darstellen [Mikhail & Ackermann, 1976, S. 276 ff.]. Die damit einhergehende Linearisierung der funktionalen Beziehung führt auf

$$\mathbf{B} \cdot (\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}) + \mathbf{A} \cdot (\mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}}_0) + f(\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{p}}_0) = \mathbf{0}, \quad (3.20)$$

wobei die geschätzten Residuen $\hat{\mathbf{v}}$ auch iterativ berechnet werden [Neitzel, 2010]. Die Jacobi-Matrizen – Designmatrix \mathbf{A} und Bedingungsmatrix \mathbf{B} – werden dabei sowohl an der Stelle der geschätzten Parameter der letzten Iterationsstufe $\hat{\mathbf{p}}_0$ als auch an den iterativ verbesserten Beobachtungen $\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}}$ linearisiert:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{p}}_0}; \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{l}} \right|_{\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{p}}_0}. \quad (3.21)$$

⁴Für die Lösung nichtlinearer Modelle siehe auch Niemeier [2008]; Mikhail & Ackermann [1976].

Basierend auf Gl. (3.20) und (3.21), durch die Definition der Widersprüche $\hat{\mathbf{w}}$ mit [Lenzmann & Lenzmann, 2004]

$$\hat{\mathbf{w}} = -\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{v}} + f(\mathbf{1} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{p}}_0) \quad (3.22)$$

und der Lagrange Multiplikatoren mit \mathbf{k} können die Normalgleichungen

$$\begin{bmatrix} \Sigma_{\bar{l}} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ \Delta \hat{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{w}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

aufgestellt werden. Hier hat bereits die Substitution von $\mathbf{B}\Sigma_{ll}\mathbf{B}^T$ mit

$$\Sigma_{\bar{l}} = \mathbf{B}\Sigma_{ll}\mathbf{B}^T \quad (3.24)$$

stattgefunden. Diese Normalgleichungen werden gelöst, um die Parameterzuschläge $\Delta \hat{\mathbf{p}}$ und die Verbesserungen $\hat{\mathbf{v}}$ iterativ zu schätzen, um abschließend die final geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{p}}$ und deren zugehörige Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{p}\hat{p}}$ zu ermitteln [Mikhail & Ackermann, 1976, S. 276 ff.].

Diese Umsetzung zur Schätzung von Parametern im nichtlinearen GHM gleicht der strengen Lösung, da sowohl eine Linearisierung an den Parametern als auch an den Beobachtungen durchgeführt wird [Lenzmann & Lenzmann, 2004; Neitzel, 2010; Mikhail & Ackermann, 1976]. Bei der nichtstrengen Lösung können verzerrte Parameterschätzungen resultieren [Holst et al., 2012; Lenzmann & Lenzmann, 2004; Neitzel, 2010], wie auch Veröffentlichung B2 [Holst et al., 2012] zeigt.

Dieses GHM kann in ein GMM überführt werden [Cothren, 2004; Koch, 1987]. Diese Überführung ist streng und damit umkehrbar [Mikhail & Ackermann, 1976]. Eine Überführung ist immer dann sinnvoll, wenn Ausgleichungsaufgaben mit einer sehr hohen Anzahl an Beobachtungen zu lösen sind, denn durch die Überführung reduziert sich die Dimension der Normalgleichungen. Allgemein ist die Voraussetzung für eine derartige Transformation, dass die Bedingungsmatrix \mathbf{B} (Gl. 3.21) vollen Rang aufweist: $\text{rank}(\mathbf{B}) = m$. Dies ist immer dann erfüllt, wenn keine Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Da dies beim TLS nie der Fall sein kann, stellt diese Voraussetzung in der vorliegenden Anwendung keine Limitation dar.

Die Überführung – auch quasivermittelnder Ausgleich oder quasivermittelnde Beobachtungen genannt [Wolf, 1968, S. 105 f.] – basiert auf der Substitution

$$\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{B}\mathbf{v}. \quad (3.25)$$

Diese führt zu der bereits beschriebenen Varianzfortpflanzung nach dem VFG von $\Sigma_{ll} = \Sigma_{vv}$ nach $\Sigma_{\bar{l}}$ (Gl. 3.24). Durch die Definition von $\Delta \bar{\mathbf{l}} = -\hat{\mathbf{w}}$ als verkürzte substituierte Beobachtungen können die Parameterzuschläge und die zugehörigen Kovarianzmatrix nach

$$\Delta \hat{\mathbf{p}} = \left(\mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{l}}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{l}}^{-1} \Delta \bar{\mathbf{l}} \quad (3.26)$$

$$\Sigma_{\hat{p}\hat{p}} = \left(\mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{l}}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \quad (3.27)$$

berechnet werden. Diese Kovarianzmatrix $\Sigma_{\bar{l}}$ (Gl. 3.24) gleicht einer Hauptdiagonalmatrix, da Σ_{ll} (Gl. 3.9) auch lediglich auf der Hauptdiagonalen besetzt ist. Daher sind auch die substituierten Beobachtungen $\bar{\mathbf{l}}$ analog zu den originären \mathbf{l} nicht korreliert.

Diese Überführung bewirkt gleichzeitig eine Reduktion der Beobachtungsanzahl von n nach m , da eine substituierte Beobachtung \bar{l}_j und ihre zugehörige Kovarianzmatrix $\sigma_{\bar{l},j}^2 = [\Sigma_{\bar{l}}]_{j,j}$ das komplette Beobachtungstriplet $\mathbf{l}_j = [s, \beta, t]_j^T$ und seine Kovarianzmatrix $\Sigma_{ll,j}$ (Gl. 3.9) repräsentiert. Gleiches gilt für die Verbesserungen \mathbf{v} und die zugehörige Substitution $\bar{\mathbf{v}}$ (Gl. 3.25). Geometrisch interpretiert bedeutet dies, dass die Beobachtungen und die Verbesserungen in den Bedingungsraum transformiert werden.

Aus diesen Herleitungen folgt für die geschätzten substituierten Verbesserungen und der zugehörigen Kovarianzmatrix

$$\hat{\mathbf{v}} = \Delta \bar{\mathbf{l}} - \mathbf{A} \Delta \hat{\mathbf{p}} \quad (3.28)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} - \mathbf{A} \Sigma_{\hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}} \mathbf{A}^T, \quad (3.29)$$

wobei diese Berechnungen auf der gewöhnlichen Schätzung in einem nichtlinearen GMM beruhen [Koch, 1987]. Eine Rückführung der Verbesserungen auf diejenigen, die die Abweichung zwischen originären Beobachtungen \mathbf{l} und geschätztem Modell darstellen, ist über

$$\hat{\mathbf{v}} = \Sigma_{\mathbf{l}} \mathbf{B}^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} \hat{\mathbf{v}} \quad (3.30)$$

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = \Sigma_{\mathbf{l}} \mathbf{B}^T \left(\Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} - \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} \mathbf{A} \Sigma_{\hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}} \mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} \right) \mathbf{B} \Sigma_{\mathbf{l}} \quad (3.31)$$

möglich, siehe Koch [1997, S. 232] bzw. Mikhail & Ackermann [1976, S. 219]. Diese Verbesserungen dienen der iterativen Aktualisierung der Beobachtungen mit $\mathbf{l} + \hat{\mathbf{v}}$, zur Bildung der Jacobi-Matrizen aus Gl. (3.21) sowie zur Berechnung der Widersprüche aus Gl. (3.22). Daher erfolgt die Überführung des GHM in das GMM in jeder Iteration.

3.4 Konfigurationsanalyse

Die bisherigen Beschreibungen der Ausgleichungsmodelle beschränken sich auf die Schätzung der Parameter $\hat{\mathbf{p}}$ sowie der zugehörigen Genauigkeit in Form der Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}}$. Betrachtungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit sind bisher nicht erfolgt. Die Zuverlässigkeitsanalyse stellt neben der Genauigkeitsanalyse die zweite große Säule zur Qualitätsbeurteilung geodätischer Netze oder generellen Ausgleichungsaufgaben dar. Während die Aussagen zur Genauigkeit auf Analysen der Kovarianzmatrix der geschätzten Parameter $\Sigma_{\hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}}$ beruhen, zielen Aussagen zur Zuverlässigkeit auf die Kovarianzmatrix der geschätzten Verbesserungen $\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$ ab [Niemeier, 2008, S. 270 ff.].

Eine zentrale Größe von Zuverlässigkeitsanalysen stellen die Redundanzanteile r_i dar [Niemeier, 2008; Förstner, 1987]. Diese beschreiben die Kontrollierbarkeit und die Zuverlässigkeit jeder einzelnen Beobachtung l_i . Die Berechnung erfolgt über

$$r_i = \left[\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} \Sigma_{\mathbf{l}}^{-1} \right]_{i,i}; \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.32)$$

Somit lässt sich sowohl für jeden beobachteten Höhenunterschied (Abschnitt 3.1) als auch für jedes beobachtete Polarelement beim TLS (Abschnitt 3.2) eine Zuverlässigkeit berechnen. Redundanzanteile liegen im Intervall von $[0, 1]$, falls die Beobachtungen unkorreliert sind. Ein Wert nahe 1 bedeutet dabei sehr gute Kontrollierbarkeit – die einzelne Beobachtung hat demnach nur einen geringen Einfluss auf die Parameterschätzung –, ein Wert nahe 0 eine schlechte Kontrollierbarkeit, da diese einzelne Beobachtung sehr stark auf die Schätzung einwirkt.

Das Einsetzen von Gl. (3.18) und Gl. (3.16) in Gl. (3.32) führt zu

$$r_i = \left[\left(\Sigma_{\mathbf{l}} - \mathbf{A} \left(\mathbf{A}^T \Sigma_{\mathbf{l}}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \right) \Sigma_{\mathbf{l}}^{-1} \right]_{i,i}. \quad (3.33)$$

Daraus lässt sich erkennen, dass Redundanzanteile im linearen GMM ausschließlich von der Konfigurationsmatrix \mathbf{A} und der Kovarianzmatrix der Beobachtungen $\Sigma_{\mathbf{l}}$ abhängen. Beim GHM ist zusätzlich noch die Bedingungsmatrix \mathbf{B} über Gl. (3.31) integriert. Insgesamt sind Redundanzanteile und damit die Kontrollierbarkeit einer Beobachtung also prinzipiell von drei Faktoren abhängig:

- 1) **Punktverteilung:** Diese ist integriert in \mathbf{A} (Gl. 3.14) beim GMM und sowohl in \mathbf{A} als auch in \mathbf{B} (Gl. 3.21) beim GHM.

2) **Objektgeometrie:** Diese ist auch in **A** und **B** enthalten.

3) **Stochastisches Modell:** Die Genauigkeiten der einzelnen Beobachtungen sind in Σ_{ll} (Gl. 3.5 bzw. Gl. 3.9) enthalten.

Die Änderung einer dieser drei Faktoren wirkt sich demnach unmittelbar auf die Redundanzanteile aus, was somit zu Variationen in der Zuverlässigkeit des Ausgleichs und den resultierenden Parameterschätzungen führt.

Die Konfiguration einer Approximation wird auf dieser Basis im weiteren Verlauf der Arbeit als ein Resultat der Größen 1), 2) und 3) angesehen. Dies führt zu den Redundanzanteilen. Demnach basieren die Analysen nicht nur auf einer Untersuchung der geometrischen Konfiguration des Ausgleichs – die allein in **A** (und **B**) enthalten wäre –, sondern der Begriff der Konfiguration wird um die stochastische Betrachtung von Σ_{ll} erweitert. Es findet also im Gesamten eine Untersuchung sowohl geometrischer Messkonfigurationen – hier insbesondere der Messpunktverteilung – als auch die Einbeziehung stochastischer Gegebenheiten statt. Für die späteren Analysen wird sich aber zeigen, dass die geometrische Messkonfiguration einen höheren Anteil als das stochastische Modell an der Konfigurationsbeurteilung der Approximation hat.

Nach Gl. (3.32) liegen für jede Beobachtung $i = 1, \dots, n$ Redundanzanteile vor. Für Oberflächen, die mit Hilfe von Nivellements nach Abschnitt 3.1 abgetastet werden, gleicht dies pro Messpunkt einem Redundanzanteil, da sowohl die Beobachtungsanzahl als auch die Messpunktanzahl gleich n ist. Für Oberflächen, abgetastet auf Basis von terrestrischen Laserscans, gleicht dies pro Messpunkt drei Redundanzanteilen – jeweils einer für Strecke s , Vertikalwinkel β und Horizontalrichtung t –, da die Anzahl an Beobachtungen n dreimal so groß ist wie die Anzahl an Messpunkten m (siehe Abschnitt 3.2). Die drei einzelnen Redundanzanteile pro Punkt können aber addiert werden, sodass sich auch im Fall terrestrischer Laserscans pro Messpunkt $j = 1, \dots, m$ ein einzelner Redundanzanteil ergibt:

$$\bar{r}_j = r_{3j-2} + r_{3j-1} + r_{3j} = r_{s,j} + r_{\beta,j} + r_{t,j} \quad (3.34)$$

Die resultierenden Redundanzanteile \bar{r}_j sind identisch mit

$$\bar{r}_j = \left[\Sigma_{vv}^{-1} \Sigma_{ll}^{-1} \right]_{j,j}; \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.35)$$

die aus der Überführung des GHM in das GMM resultieren. Somit ist es möglich – unabhängig vom Ausgleichsalgorithmus und vom oberflächenabtastenden Sensor (Nivellement oder TLS) – jeweils ein Redundanzanteil pro Messpunkt zu berechnen. Die Gesamtredundanz r gleicht jeweils:

$$r = \sum_i r_i = \sum_j \bar{r}_j. \quad (3.36)$$

Zur Vereinfachung wird im Folgenden auf Redundanzanteile nur noch mit r_i verwiesen, unabhängig von der zugrunde liegenden Ausgleichung und vom abtastenden Instrument. Der Index i gibt dann den jeweiligen Messpunkt an.

Komplementär zu den Redundanzanteilen verhalten sich die Einflussfaktoren h_i [Niemeier, 2008, S. 293]:

$$h_i = 1 - r_i. \quad (3.37)$$

Sie beschreiben im vorliegenden Fall den Einfluss, den ein Messpunkt auf die Parameterschätzung hat. Je höher der bei unkorrelierten Beobachtungen im Intervall von $[0, 1]$ liegende Wert ist, desto größer ist der Einfluss. Diese Einflussfaktoren werden im Laufe der vorliegenden Arbeit auch zur Analyse verwendet, um die Sichtweise zwischen der Kontrollierbarkeit eines Messpunktes (ausgedrückt durch die Redundanzanteile) und dem Einfluss eines Messpunktes (ausgedrückt durch die Einflussfaktoren) einfacher wechseln zu können.

Durch die punktweise Betrachtung der Redundanzanteile⁵ beim Laserscanning geht die Differenzierung zwischen den Redundanzanteilen der originären Polarbeobachtungen eines Punktes verloren. Dies ist mathematisch – wie bereits beschrieben – zulässig und für die vorliegende Arbeit sinnvoll, da die Konfiguration

⁵Bei generellen Betrachtungen, die sowohl für Redundanzanteile r_i als auch für Einflussfaktoren h_i gelten, wird im folgenden aus Gründen der Lesbarkeit nicht explizit auch auf die Einflussfaktoren hingewiesen.

in Abhängigkeit der ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche thematisiert wird. Für Untersuchungen, bei denen der unterschiedliche Einfluss einzelner Beobachtungselemente im Fokus steht, wäre diese Überführung der Redundanzanteile pro Polarbeobachtung in Redundanzanteile pro Messpunkt über Gl. (3.34) hingegen nicht sinnvoll. Denkbar wäre in diesem abweichenden Kontext z.B. die getrennte Analyse von Strecken- und Winkelmessung.

4. Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen

Im vorliegenden Kapitel werden diejenigen Veröffentlichungen kurz zusammengefasst, die die Basis für diese kumulative Dissertation bilden. Abb. 4.1 ordnet diese Veröffentlichungen gemäß ihres Inhalts, ihrer wissenschaftlichen Bedeutung sowie ihres Beitrags zur vorliegenden Dissertation ein. Die wissenschaftliche Relevanz wird dabei anhand der Einteilung in Veröffentlichungen mit Peer-Review-Begutachtung und Veröffentlichungen ohne Peer-Review-Begutachtung vorgenommen. Die inhaltliche Auseinandersetzung mit den Veröffentlichungen erfolgt in den Abschnitten 4.1 (Nivellements) und 4.2 (terrestrische Laserscans).

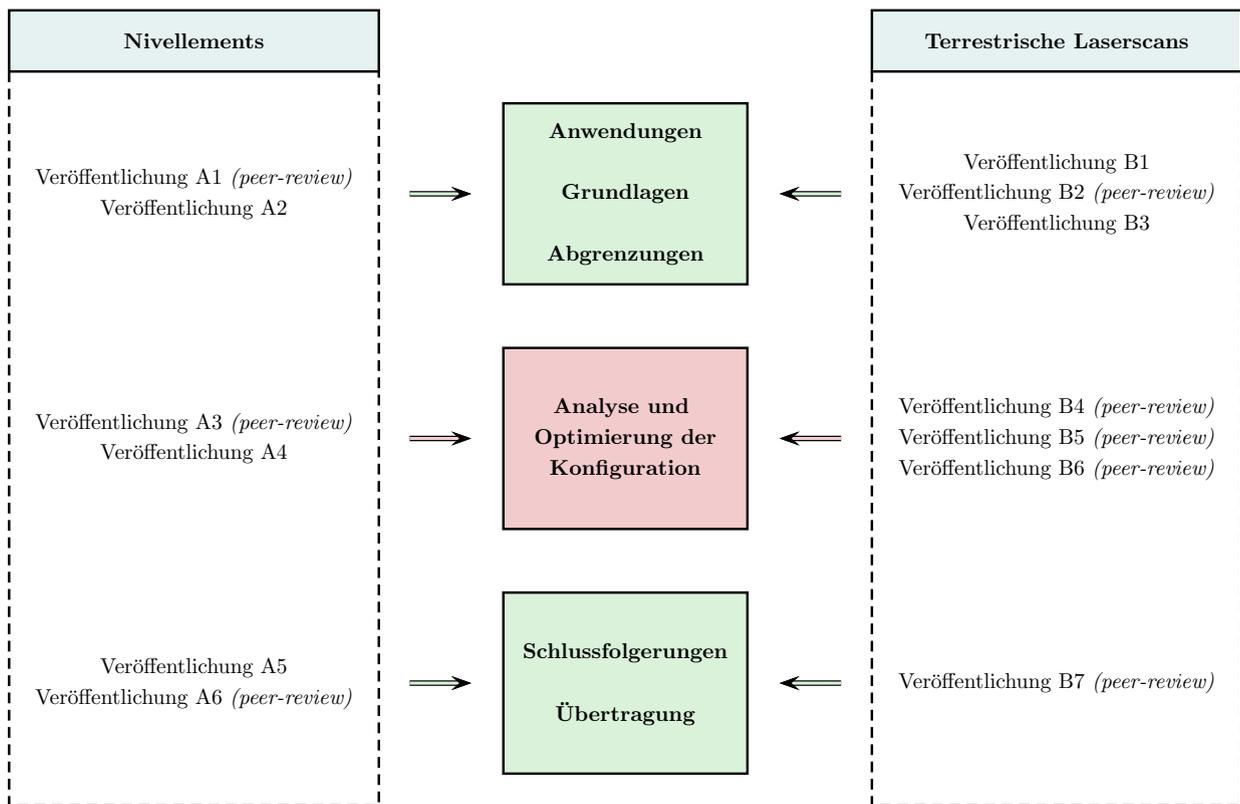


Abbildung 4.1: Inhaltliche Zuordnung der relevanten Veröffentlichungen zur Verdeutlichung ihres jeweiligen Beitrags an der vorliegenden Dissertation sowie Kennzeichnung der Veröffentlichungen mit Peer-Review-Begutachtung.

Während die Veröffentlichungen A1 und A2 die Grundlagen zur flächenhaften Parametrisierung der Nivellements darlegen, die verwendeten Methoden gegenüber anderen Ansätzen abgrenzen und erste Schritte zur Konfigurationsanalyse präsentieren, thematisieren die Veröffentlichungen B1, B2 und B3 die Grundlagen zur flächenhaften Parametrisierung terrestrischer Laserscans, inkl. Genauigkeits-, Geometrie- und erster methodischer Betrachtungen. Sowohl die Veröffentlichungen A1-A2 also auch B1-B3 beziehen sich dabei jeweils auf die beiden bereits eingeführten Anwendungen der flächenhaften Auswertung sumpfbedingter Bodensenkungen sowie der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg (siehe Abschnitt 1.1).

Der größte methodische Fortschritt dieser Dissertation basiert auf den Veröffentlichungen A3 und A4 sowie B4, B5 und B6. Hier wird explizit auf die Analyse und Optimierung der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen eingegangen und es werden die methodischen Weiterentwicklungen

motiviert, beschrieben und erstmals detailliert publiziert. Insbesondere die in diesen Veröffentlichungen behandelten Hauptaspekte der vorliegenden Dissertation werden in Kapitel 5 erneut aufgegriffen und ausführlich dargelegt.

Die aus diesen methodischen Fortschritten erzielten Ergebnisse werden in den Veröffentlichungen A5 und A6 sowie B7 herangezogen, um sie im Falle der Nivellements auf weitere Problemstellungen zu übertragen bzw. um ein erweitertes Konzept zur laserscannerbasierten Deformationsanalyse aufzustellen. Aber auch in diesen Veröffentlichungen werden zusätzlich methodische Weiterentwicklungen zur flächenhaften Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen aufgezeigt (siehe auch Kapitel 5).

4.1 Analyse der Konfiguration auf Basis von Nivellements

Veröffentlichung A1 (peer-review)

- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013b). Anforderungen und Grenzen von Bodenbewegungsmodellen zur Beschreibung des Bodensenkungsverhaltens im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Markscheidwesen*, 120(1-2), 13–22

Die vorliegende Veröffentlichung thematisiert die Grundlagen der flächenhaften Approximation nivellierter Höhenänderungen zur Beschreibung der sumpfungsbedingten Bodensenkungen für Untersuchungsgebiete im Rheinischen Braunkohlenrevier (siehe auch Abschnitte 1.1 und 3.1). Speziell wird auf die datenadaptive Modellentwicklung zur Realisierung der Flächenparametrisierung eingegangen. Fokussiert wird hier das Ziel der Detektion bewegungshomogener Bereiche. Somit liefert diese Veröffentlichung eine Einführung in die Thematik, indem die mathematischen Grundlagen dargelegt werden. Ferner wird auf einzelne Beispiele verwiesen, sowie als Randaspekt auf die Analyse und Optimierung der Konfiguration des Ausgleichs eingegangen. Diese Konfigurationsbetrachtungen werden in Holst et al. [2013c] (Veröffentlichung A3) methodisch hergeleitet und ausführlicher beschrieben.

Zunächst werden die theoretische Entwicklung der Bodenbewegungsmodelle vorgestellt. Anschließend wird die Umsetzung anhand von Beispielen demonstriert und die Anforderungen und Grenzen der Bodenbewegungsmodelle werden dargestellt. Relevant für die vorliegende Dissertation ist die Formulierung von fünf Kriterien, die jeweils eingehalten werden müssen, damit die Flächenapproximation aus Sicht der Ausgleichsrechnung erfolgreich ist:

1. Anzahl auffälliger Punkte vs. Gesamtanzahl der Punkte:
Die Anzahl dieser auffälligen Punkte¹ sollte im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Punkte sehr gering sein, da ansonsten von einem Modellfehler auszugehen ist.
2. Anzahl Parameter vs. Gesamtanzahl der Punkte:
Zur Gewährleistung einer zuverlässigen Parameterschätzung mit einer hohen Sicherheitswahrscheinlichkeit muss die Gesamtanzahl der Messpunkte signifikant größer sein als die Anzahl der Parameter. Wenn zur Beschreibung komplexer Bodensenkungen im Untersuchungsgebiet eine hohe Anzahl an signifikanten Parametern nötig ist, muss entsprechend der Komplexität auch die Gesamtanzahl der zur Verfügung stehenden Punkte groß sein. Die Anzahl an Parametern wird dabei auf eine Minimalanzahl beschränkt, was durch die iterative Eliminierung nichtsignifikanter Parameter unter Berücksichtigung ihrer Korrelationen nach Schwintzer [1984] garantiert wird.
3. Räumliche Verteilung der auffälligen Punkte:
Auffällige Punkte lassen auf einen Modellfehler schließen, wenn sie gehäuft in einem räumlich begrenzten Bereich auftreten. In diesem Fall ist das Modell nicht geeignet gewählt.

¹Zur Definition auffälliger Punkte siehe Abschnitt 3.1.4.

4. Verteilung der Modellabweichungen:

Damit die Bestimmung eines Flächenpolynoms als optimal angesehen werden kann, müssen die Abweichungen zwischen dem entwickelten Modell und den tatsächlich gemessenen Höhenunterschieden normalverteilt sein, d.h. der Mittelwert ist Null und die Streuung um den Mittelwert ist rein zufällig und folgt keinen Mustern, die auf systematische Abweichungen hindeuten würden.

5. Empirische Standardabweichung:

Die äußere Genauigkeit der gemessenen Höhenunterschiede wird wie in Gl. (3.4) beschrieben mit $\sigma_{\Delta h} = 1 \text{ mm}$ angenommen. Die empirische Standardabweichung $\hat{\sigma}_{\Delta h}$, berechnet aus den Verbesserungen zwischen gemessenen und geschätzten Höhenunterschieden (Gl. 3.17), darf nicht signifikant von dieser äußeren Genauigkeit abweichen. Dies wird anhand eines Globaltests geprüft [Niemeier, 2008].

Anhand dieser Kriterien wird folglich jeweils überprüft, ob die flächenhafte Approximation der Höhenänderungen erfolgreich ist. Bei Einhaltung aller Kriterien können Untersuchungsgebiete ferner als bewegungshomogen im Bezug zu ihren Bodenbewegungen eingestuft werden. Diese Einstufung ist eines der in Abschnitt 1.1 benannten Ziele bei der flächenhaften Analyse sumpfungsbedingter Bodensenkungen auf Basis von Nivellements. Die Tauglichkeit dieser Kriterien kann ferner anhand einer Vielzahl untersuchter Regionen erwiesen werden.

Veröffentlichung A2

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015b). Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements. In W. Busch & S. Knospe (Hrsg.), *GeoMonitoring 2015* (S. 189–206). Clausthal-Zellerfeld

Zur flächenhaften Approximation der nivellierten Höhenänderungen werden – wie in der vorherigen Studie und Abschnitt 3.1 beschrieben – Bodenbewegungsmodelle basierend auf bivariaten Polynomen verwendet. Dennoch weisen Polynome Nachteile gegenüber in anderen Studien verwendeten mathematischen Modellen auf. Dies ist zum einen der nicht immer vorteilhaften großen Steifigkeit der Polynome zu verdanken. Es lassen sich also nicht beliebig komplexe Bodenbewegungen modellieren. Zum anderen besitzen die Polynomparameter keine universelle geometrische Aussagekraft. Aus diesem Grund untersucht diese Veröffentlichung, inwiefern weniger steife mathematische Modelle eine verbesserte Analyse und Aussagekraft liefern könnten. Hierbei scheinen zwei verschiedene Ansätze besonders von Interesse zu sein:

1. Die Nutzung lokal begrenzter Polynome, sodass eine lokale Modellierung und damit flexiblere Anpassung an die Beobachtungen möglich ist. Hierfür werden Splines verwendet [Hayes & Halliday, 1974; Heunecke et al., 2013; Niemeier, 2008].
2. Der Übergang einer rein deterministischen Approximation auf eine deterministisch-stochastische Approximation. Der deterministische Anteil wird hierbei immer noch durch Polynome beschrieben, die Flexibilität wird durch Hinzunahme eines stochastischen Signals modelliert. Zur Bestimmung dieses stochastischen Signal wird die in den Beobachtungen enthaltene räumliche Kovarianzinformation parametrisiert. Der daraus resultierende Ansatz gleicht der Kollokation [Moritz, 1978; Koch, 1994; Mikhail & Ackermann, 1976; Niemeier, 2008; Heunecke et al., 2013]²).

Prinzipiell sind beide mathematischen Modelle geeignet, um flächenhafte Approximationen durchzuführen. Dies hat sich schon in vielen Anwendungen mit ähnlichen Untersuchungen gezeigt [Nuckelt, 2007; Wälder, 2008]. Auf die hier vorliegende konkrete Anwendung bezogen zeigt sich jedoch, dass sowohl Splines als auch die Kollokation weniger geeignet zur Parametrisierung der flächenhaften Höhenänderungen sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die gegebene Messpunktverteilung in den Untersuchungsgebieten sehr ungleichmäßig ist. Sie variiert sowohl zwischen verschiedenen Gebieten als auch innerhalb der Gebiete sehr stark.

²In Koch [1994, S. 239 ff.] wird auf die Kollokation als Modell der Prädiktion und Filterung verwiesen, in Niemeier [2008, S. 420 ff.] als Prädiktion nach kleinsten Quadraten.

Zusätzlich führt die Aufgabe der automatisierten Detektion auffälliger Punkte zu Schwierigkeiten bei der Modellentwicklung, insbesondere wenn sich die auffälligen Punkte am Gebietsrand befinden. Hier kann die Flexibilität der Splines und der Kollokation zu unerwünschten Effekten führen. Dies bewirkt in vielen Fällen positiv oder negativ falsche Detektionen auffälliger Punkte.

Ferner ist die hohe Flexibilität der Splines nur durch eine sehr hohe Anzahl zu schätzender Parameter zu erkaufen. Diese hohe Parameteranzahl stünde in Konflikt mit den in der Veröffentlichung A1 beschriebenen Kriterien zur Einstufung einer erfolgreichen Approximation. Bei der Kollokation kann die Parameteranzahl gegenüber den Polynomen zwar größtenteils verringert werden. Dies gelingt aber nur durch zusätzlichen Nutzereingriff in die Modellierung, der die Objektivität des Ansatzes mindert. Dieser Nutzereingriff beinhaltet die Aufspaltung der Höhenänderungen in einen deterministischen und stochastischen Anteil. Die aus dieser Aufspaltung resultierende räumliche Kovarianzinformation der nivellierten Höhenänderungen ist jedoch nicht vergleichbar zwischen verschiedenen Epochenunterschieden oder Untersuchungsgebieten. Daher können auf dieser Basis auch nicht – wie gehofft – Parameter mit einer höheren geometrischen Aussagekraft, die zwischen verschiedenen Epochenunterschieden oder Untersuchungsgebieten übertragbar sind, gewonnen werden.

Insgesamt ergibt sich daraus, dass die Steifigkeit der Polynome bei der vorliegenden Aufgabenstellung von Vorteil ist. Zwar sind die Bodenbewegungen mit Polynomen nicht beliebig komplex modellierbar. Dafür erhöht die Steifigkeit die Zuverlässigkeit des Ausgleichs aber gerade in Bereichen mit einer ungünstigen Messkonfiguration aufgrund einer geringen und ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche. Abschließend kann die Polynomapproximation auf Basis dieser Untersuchungen als geeignetes mathematisches Modell zur Detektion bewegungshomogener Bereiche eingestuft werden. Diese Einschätzungen basieren demnach auf Analysen hinsichtlich der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen und stehen damit in direktem Zusammenhang mit den weiteren Untersuchungen der vorliegenden Dissertation.

Veröffentlichung A3 (peer-review)

- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013c). Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformations. *J. Appl. Geodesy*, 7(2), 103–113

Wie bereits herausgefunden, ist die Zuverlässigkeit der flächenhaften Approximation nivellierter Höhenänderungen unmittelbar von der Konfiguration des zu Grunde liegenden geodätischen Netzes abhängig (siehe Abschnitt 3.4). Diese Konfiguration wird dabei im vorliegenden Fall nur durch die Objektgeometrie und die räumliche Verteilung der Messpunkte vorgegeben, da das stochastische Modell konstant ist (siehe Gl. 3.5). Da die räumliche Verteilung der Messpunkte in den untersuchten Regionen allerdings nicht gleichmäßig ist, muss die darauf basierende Konfiguration im ersten Schritt analysiert werden. Im zweiten Schritt ist ggf. eine Optimierung notwendig, die Möglichkeiten zur Verbesserung der Konfiguration aufzeigen kann. Diese Studie stellt den methodischen Ansatz zur Analyse und Optimierung der Konfiguration bei der Approximation flächenhaft nivellierter Höhenunterschiede erstmals vor. Damit bildet sie einen Schwerpunkt für die vorliegende Dissertation.

Resultierend aus diesen Untersuchungen ist es erstmals möglich, die Anzahl und Position zusätzlicher Nivellementpunkte objektiv bestimmen zu können. Gleichzeitig werden existierende Messpunkte hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für die optimale Konfiguration untersucht. Es findet somit eine Zuweisung eines jeden Messpunkts statt, wobei er im Sinne der Konfiguration entweder als relevant (er sollte erhalten werden) oder als weniger relevant (er kann theoretisch eliminiert werden) eingestuft wird. Diese Analysen basieren auf der Kombination des Abtasttheorems, bekannt aus der Zeitreihenanalyse, mit den in Abschnitt 3.4 bereits beschriebenen Redundanzanteilen r_i aus Gl. (3.32), die die Konfiguration und die Zuverlässigkeit des Ausgleichs mit einbeziehen.

Die Schwierigkeit bestand hier in der Kombination von Abtasttheorem und Redundanzanteilen, sodass eine objektive Beurteilung und Optimierung der Konfiguration stattfinden kann. Da das Abtasttheorem der entwickelten Optimierungsstrategie folgend abhängig von der Ordnung des Polynoms ist und die Redundanzanteile hingen auf der Parameteranzahl aufbauen, ist diese Kombination nicht trivial. Diese Aspekte werden ausführlicher in den Abschnitten 5.1 und 5.2 beschrieben, da sie den Grundstein sowohl zur generellen Konfigurationsanalyse flächenhafter Approximationen (Abschnitt 5.1) als auch zur Optimierung der Konfiguration (Abschnitt 5.2) legen.

Veröffentlichung A4

- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013d). Data-adaptive approximation strategy for monitoring and analysis of height changes. In *XV International ISM Congress, 16-20 September 2013 Aachen*

Als Resultat der vorherigen Studie kann ein Nivellementnetz hinsichtlich der Zuverlässigkeit zur flächenhaften Approximation gemessener Höhenänderungen analysiert werden. Existierende Messpunkte können als relevant oder weniger relevant gekennzeichnet werden, wobei diese Einschätzung auf der Konfiguration des Ausgleichs fußt. Der Umgang mit den nichtrelevanten Punkten wird in der vorliegenden Veröffentlichung thematisiert. Es wird aufgezeigt, dass diese Punkte als unabhängige Kontrollbeobachtungen in den Auswerteprozess mit einfließen können: Da sie nicht zur Parameterschätzung des bivariaten Polynoms dienen, ist eine Verifizierung des Modells mit Hilfe dieser Beobachtungen möglich. Des Weiteren werden zusätzliche Verfahren zur Verbesserung der Konfiguration aufgezeigt, u.a. das Einfügen von Zwillingpunkten in den Randbereichen. Diese Zwillingpunkte gleichen Nivellementpunkten, die in direkter Nachbarschaft bereits existierender Nivellementpunkte gesetzt werden. Somit kann die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Auswertung weiter gestützt werden. Diese Aspekte werden ausführlicher in Abschnitt 5.2 aufgegriffen.

Diese methodischen Weiterentwicklungen werden anhand von Beispielen verifiziert. Es wird gezeigt, dass die Aufteilung in für die Approximation relevante und irrelevante Beobachtungen mit anschließender Verifizierung zulässig und zielführend ist, wenn die ursprüngliche Konfiguration des Ausgleichs ausreichend ist. Demnach kann eine lokale Häufung an Beobachtungen den Nachteil fehlender Beobachtungen an anderen Positionen des Gebietes nicht kompensieren. Sind allerdings genug Beobachtungen für einen zuverlässigen Ausgleich vorhanden – beurteilt mit Hilfe des Optimierungsansatzes – stellt die Generierung unabhängiger Kontrollbeobachtungen eine weitere Methode dar, die entwickelten Bodenbewegungsmodelle hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu verifizieren.

Veröffentlichung A5

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2013). Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models. In *2. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 09-10 September 2013 Nottingham, UK*

Die bisher beschriebene Modellierung der Bodenbewegungen mit bivariaten Polynomen ist nur zweckmäßig, wenn sie nur die Bereiche homogener Bodenbewegung unter Annahme einer Glattheitsbedingung beschreibt. Deren Detektion stellte bisher das Ziel bei der flächenhaften Analyse sumpfbewegter Bodenbewegungen dar (siehe Abschnitt 1.1). Bei der vorliegenden Studie steht hingegen die Detektion bewegungsaktiver tektonischer Störung als zweites in Abschnitt 1.1 benanntes Ziel im Vordergrund. Diese tektonischen Störungen können bei einem ungünstigen Aufbau der unteren Gesteinsschichten aus den Sumpfbewegungsmaßnahmen resultieren [Preusse & Schulte, 2012]. Im ungünstigsten Fall, wenn sich z.B. ein Gebäude direkt über einer solchen tektonischen Störung befindet, kann es ferner zu Setzungsschäden kommen.

Da bivariate Polynome lediglich homogene Bodenbewegungen beschreiben können, ist nun eine Abgrenzung zu tektonischen Störungen nötig. Tektonische Störungen weisen einen linienhaften und im Bezug zur Umgebung gesehen hohen Bodenbewegungsgradienten auf. Diese Eigenschaften werden in der vorliegenden Veröffentlichung genutzt, um eine Abgrenzung der homogenen Bewegungsbereiche von einer potentiell vorhandenen tektonischen Störung durchzuführen. Denn falls tatsächlich eine tektonische Störung im Untersuchungsgebiet vorhanden sein sollte, ist eine zuverlässige und statistisch gesehen zulässige Flächenapproximation der Höhenänderungen mit bivariaten Polynomen nur nach Abgrenzung dieser tektonischen Störung von den bewegungshomogenen Bereichen durchführbar.

Zur Detektion tektonischer Störungen werden Methoden aus der Bildverarbeitung verwendet und auf die vorliegende Aufgabenstellung übertragen. Das Ziel ist dabei die Definition verschiedener Subregionen innerhalb des kompletten Untersuchungsgebietes. Eine dieser Subregionen soll denjenigen Bereich erfassen, in dem die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer tektonischen Störung am größten ist. Die umliegenden Subregionen definieren die Bereiche bewegungshomogener Bodenbewegung. Jede nivellierte Höhenänderung ist darauf basierend einer Subregion zuzuordnen. Insgesamt besteht das Verfahren aus vier Schritten:

1. Interpolation: Zuerst werden die an den ungleichmäßig verteilten Höhenbolzen nivellierten Höhenunterschiede auf ein festes Raster interpoliert [Sandwell, 1987; Keys, 1981].
2. Faltung: Anschließend kann der über Faltung mit Hilfe des Sobel-Operators [Ziou & Tabbone, 1998; Solomon & Breckon, 2010] berechnete Gradient Aufschluss über die Bewegungsänderungen benachbarter Interpolationen geben. Linienhafte Strukturen in diesem Gradientenbild deuten dann auf tektonische Störungen hin.
3. Zuordnung: Die originären Messpunkte werden den einzelnen Subregionen auf Basis von Zusammenhangskomponenten (engl.: connected components, Ritter & Wilson [2001]) zugeordnet.
4. Trennung: Da diese Zuordnung die Subregionen hauptsächlich aufgrund von Messabweichungen noch nicht exakt trennt, ist über die Bildung der konvexen Hülle, hier in Form der α -Shapes [Edelsbrunner, 1995], letztendlich die finale Trennung des Untersuchungsgebietes in verschiedene Subregionen abgeschlossen.

Diese Abgrenzung allein dient lediglich der Detektion von Subregionen, in den die größte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer tektonischen Störung gegeben ist. Es wird nur zwischen bewegungshomogenen Bodenbewegungen und denjenigen mit hohem Gradienten linienhafter Struktur unterschieden. Die Abgrenzung ist daher frei von jeglicher Wertung, es findet noch keine qualitative Analyse bzgl. der Signifikanz der tektonischen Störung statt. Daher sind noch weitere Schritte unerlässlich, um die Schadensrelevanz einer tektonischen Störung beurteilen zu können. Dies geschieht in der vorliegenden Veröffentlichung nur rudimentär und wird in der folgenden Veröffentlichung A6 [Holst & Kuhlmann, 2015a] aufgegriffen.

Veröffentlichung A6 (peer-review)

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015a). Detecting and analyzing fault edges in sampled ground movements. *Appl. Geomat.* ahead of print, doi: 10.1007/s12518-014-0145-9

Aufbauend auf der vorherigen Studie zur Detektion von tektonischen Störungen werden an dieser Stelle Methoden untersucht, die eine Analyse der detektierten tektonischen Störung ermöglichen. Diese soll letztendlich zu der Aussage führen, ob eine tektonische Störung aufgrund ihrer Größe und Ausprägung schadensrelevant ist oder nicht. Zur Beurteilung der Schadensrelevanz kann dabei ein Grenzwert von 2 km für den Krümmungsradius der tektonischen Störung angegeben werden. Wird dieser unterschritten, so können die vorliegenden Krümmungen zu Setzungsschäden an Gebäuden führen, sofern diese sich in unmittelbarer Nähe der tektonischen Störung befinden.

Zur Analyse dieser Schadensrelevanz werden in der vorliegenden Veröffentlichung drei Methoden entwickelt und ihre Eignung anhand von Simulationen und realen Messungen verifiziert. Diese Methoden setzen sich zum Ziel, Kriterien zu finden, um eine unschädliche von einer schädlichen tektonischen Störung im Sinne des eingeführten Krümmungsradius unterscheiden zu können. Dies geschieht jeweils auf Basis der vorher durchgeführten Einteilung des Untersuchungsgebietes in verschiedene Subregionen.

Über Flächenapproximationen werden zum einen Krümmungsradien für die Subregion mit der wahrscheinlichsten tektonischen Störung auf Basis der Differentialgeometrie [Pressley, 2001] berechnet. Zum anderen wird die Größenordnung des Höhenversatzes, den die potentielle tektonische Störung verursacht, automatisch abgeschätzt. Beide Verfahren sind zielführend, ermittelt anhand von simulierten Messungen. Bei realen Messungen scheitern sie aber an der ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche: Es ist keine flächenhafte Approximation möglich, die jeweils zur Berechnung von Krümmungsradien oder zur Quantifizierung der tektonischen Störung nötig wäre.

Daher kann die Analyse der möglichen tektonischen Störung und die Beurteilung ihrer Schadensrelevanz nur auf Basis eines heuristischen Ansatzes durchgeführt werden. Dieser endet in der Analyse von Ausreißern von der Flächenapproximation: Die Subregion, in der die tektonische Störung am wahrscheinlichsten liegt, wird bezüglich enthaltener Ausreißer von der Approximation analysiert. Eine Beurteilung dieser Ausreißer

hinsichtlich ihrer Größenordnung und räumlichen Verteilung im Untersuchungsgebiet gibt anschließend Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit, dass tatsächlich eine relevante tektonische Störung vorhanden ist. Somit deuten linienhaft verteilte Ausreißer auf eine tektonische Störung hin. Dieses Resultat stützt des Weiteren die in Veröffentlichung A1 [Holst et al., 2013b] formulierten Kriterien zur Detektion bewegungshomogener Bereiche. Diese Kriterien besagen unter anderem, dass bewegungshomogene Bereiche nur vorliegen, falls keine systematische Struktur in den Residuen sowie den auffälligen Punkten vorhanden ist. Somit sind bewegungshomogene Bereiche und tektonische Störungen methodisch trennbar. Dennoch basiert diese Trennung nur auf Basis einer augenscheinlichen Untersuchung der Ausreißer.

Schlussendlich wird demnach ein heuristischer Ansatz zur Einstufung der Schadensrelevanz einer detektierten tektonischen Störung verfolgt. Dieser bewertet das mögliche Auftreten einer tektonischen Störung anhand der Ausreißer von der Ausgleichung. Ein Signifikanztest, der die Schadensrelevanz der tektonischen Störung bewertet, ist aus diesem Verfahren nicht abzuleiten. Die Konfiguration des Beobachtungsnetzes lässt eine derartige Aussage aufgrund der nur ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche nicht zu.

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung einer geeigneten Methode zur Detektion und Analyse potentieller tektonischer Störungen steht also in direktem Zusammenhang zur ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche. Dies führte dazu, dass Methoden zur Kantendetektion, wie sie im Bereich der Bildverarbeitung schon seit vielen Jahren existieren, nicht unmittelbar übernommen werden konnten. Vielmehr mussten diese Methoden geeignet mit denjenigen der Ausgleichsrechnung verknüpft werden. Doch auch bei dieser Kombination gelingt weder eine scharfkantige Abgrenzung potentieller tektonischer Störungen von den Bereichen homogener Bodenbewegungen noch eine probabilistische Bewertung der potentiellen tektonischen Störung. Daher stellt dieses Verfahren insgesamt eine praktikable, aber keine zufriedenstellende Lösung dar.

4.2 Analyse der Konfiguration auf Basis terrestrischer Laserscans

Veröffentlichung B1

- Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014c). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern - eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *Allgem. Verm. Nachr.*, 121(7), 260–272

Wie bereits im Abschnitt 1.1 beschrieben ist, steht die flächenhafte Erfassung auf Basis von terrestrischen Laserscannern immer mehr im Fokus der Ingenieurgeodäsie. Dies geht einher mit der vermehrten Analyse flächenhafter Deformationen. Dies wird in der vorliegenden Veröffentlichung thematisiert, indem die generellen Schritte flächenhafter Deformationsanalysen aufgezeigt, analysiert und angewendet werden. Hierbei werden zudem Anwendungen und Methoden bei der Auswertung von Deformationen auf Basis von terrestrischen Laserscannern im mittleren Entfernungsbereich mit denjenigen von Nahbereichslaserscannern verglichen.

Auf Basis einer Vielzahl an Veröffentlichungen und anhand von zwei ausführlich diskutierten Beispielen ist ersichtlich, dass eine laserscannerbasierte flächenhafte Deformationsanalyse prinzipiell aus fünf Schritten besteht: (1) Formulierung der Problemstellung, (2) Datenerfassung (inkl. Planung und Durchführung), (3) Vorverarbeitung (inkl. Ausreißereliminierung und Registrierung), (4) Auswertung (evtl. mit den einzelnen Teilschritten der Klassifikation, Modellbildung und Formanalyse) sowie (5) Interpretation. Jeder dieser Teilschritte wird anhand der verwendeten Methoden detaillierter beschrieben und mit Literaturquellen verschiedener Anwendungen belegt. Daher ist diese Veröffentlichung als eine Aufarbeitung aktueller Arbeiten im Bereich flächenhafter Deformationsanalysen zu verstehen, auf die im Folgenden aufgebaut werden kann.

Zusätzlich werden weitergehende Fragestellungen aufgezeigt, die generell für eine laserscannerbasierte Deformationsuntersuchung zu klären sind. Dies betrifft die Wahl des Algorithmus zur Parameterschätzung, getrennt nach dem bereits in Abschnitt 3.3 eingeführten GHM sowie der Orthogonalen Distanzregression (ODR, siehe auch Abschnitt 6.1). Des Weiteren werden erste Ansätze zur Einbeziehung der Konfiguration des Ausgleichs und die aus einer ungünstigen Konfiguration folgenden verzerrten Parameterschätzungen benannt. Eine Hinterfragung des stochastischen Modells von Laserscannermessungen, das zumeist von unkorrelierten Messungen ausgeht (siehe Abschnitt 3.2.2 sowie Gl. 3.9), weist auf einen dritten Themenbereich hin, den es in Zukunft realistischer zu gestalten gilt (siehe auch Abschnitt 6.2).

Veröffentlichung B2 (peer-review)

- Holst, C., Zeimet, P., Nothnagel, A., Schauerte, W., & Kuhlmann, H. (2012). Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements. *J. Surv. Eng.*, 138(3), 126–135

Die vorliegende Veröffentlichung thematisiert erstmals ausführlich die flächenhafte Deformationsuntersuchung des 100 m Radioteleskops Effelsberg aus dem Jahr 2010, wie in Abschnitt 1.1 beschrieben. Zur Bestimmung dieser gravitationsabhängigen Deformationen des Hauptreflektors wird ein Messkonzept basierend auf dem terrestrischen Laserscanner Leica HDS 6100 vorgestellt. Hierbei wird der Hauptreflektor in sieben verschiedenen Elevationsstellungen zwischen 90° und 7.5° abgescannt. Der Laserscanner ist kopfüber im Subreflektor montiert, sodass er gemeinsam mit dem Radioteleskop vertikal rotiert.

Zur Analyse der Verformungen wird der Hauptreflektor als Rotationsparaboloid parametrisiert, wobei die Variation der Brennweite zu verschiedenen Elevationsstellungen Aufschluss über die Verformungen geben kann (siehe Abschnitt 3.2.4). Zusätzlich können systematische Residuen von dieser Approximation auf lokale Deformationen des Radioteleskops hinweisen. Aufgrund einer fehlenden Referenz sind die einzelnen Flächenparametrisierungen dabei völlig unabhängig voneinander, das geodätische Datum ist nicht fixiert. Zur Parameterschätzung dient hier die ODR [Helfrich & Zwick, 1993; Ahn et al., 2002], die in der geodätischen Literatur zwar bekannt ist [Niemeier, 2008, S. 399 ff.], bisher aber kaum eingesetzt wird. Die Parameterschätzungen werden verglichen mit denjenigen des nichtstrengen GHM. Dieser Vergleich offenbart verzerrte Schätzungen auf Basis des nichtstrengen GHM im Gegensatz zur erwartungstreuen Schätzung auf Basis der ODR. Spätere Untersuchungen in Diehl [2013] zeigen jedoch, dass die Verwendung des strengen GHM nach Abschnitt 3.3.2 zu Schätzungen führt, die mit denjenigen der ODR identisch und daher ebenfalls erwartungstreu sind. Weitere diesbezügliche Ausführungen sind in Abschnitt 6.1 zu finden.

In einem mehrstufigen Ausgleich – basierend auf einer Segmentierung und Ausreißereliminierung wie in Veröffentlichung B1 [Holst et al., 2014c] beschrieben – werden die Brennweitenvariationen in Abhängigkeit der Elevationsstellung des Radioteleskops geschätzt. Die Brennweite verringert sich um ca. 12.6 mm zwischen 90° und 7.5° Elevationsstellung. Die resultierenden Residuen deuten nicht auf lokale Deformationen des Hauptreflektors hin. Aufgrund von Residuen mit einer Streuung im Bereich von ca. ± 10 mm betrifft diese Aussage allerdings nur Deformationen in dieser Größenordnung.

Veröffentlichung B3

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2011). Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In *Schriftenreihe DVW, Band 66: Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge* (S. 161–180). Augsburg: Wißner

Basierend auf den identischen Datensätzen und Auswertungen zur Deformationsanalyse des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg werden in dieser Veröffentlichung weitere Untersuchungen durchgeführt. Im Speziellen betrifft dies die Messgeometrie und die äußeren Rahmenbedingungen, die die Qualität der Laserscannermessungen signifikant beeinflussen. Es wird ein Zusammenhang zwischen dem Einfallswinkel, der aus der Messgeometrie folgt, und den resultierenden Residuen vom Ausgleich sowie der Intensität des reflektierten Laserstrahls hergestellt. Aus diesen Betrachtungen bestätigt sich die Annahme, dass der Standpunkt des Laserscanners im Subreflektor im Sinne der Geometrie eine gute Wahl darstellt.

Des Weiteren werden die Oberflächeneigenschaften im Zusammenspiel mit der Sonneneinstrahlung untersucht. Prinzipiell ist die Intensität des reflektierten Signals in konstant hohen Bereichen. Eine geringe Intensität ist flächendeckend nur bei denjenigen Bereichen des Hauptreflektors auszumachen, die während der Messung direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt waren. In diesen Bereichen ist auch eine signifikante Erhöhung des Messrauschens auszumachen. Daher ist eine Analyse von lokalen Oberflächendeformationen in diesen Bereichen nur mit geringerer Genauigkeit möglich.

Veröffentlichung B4 (peer-review)

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014b). Impact of spatial point distributions at laser scanning on the approximation of deformed surfaces. In *Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs* (S. 269–282). Zürich, Schweiz: A. Wieser

Diese Studie überträgt die in Veröffentlichung A3 [Holst et al., 2013c] beschriebenen Betrachtungsweisen zur Analyse der Konfiguration flächenhafter Approximationen von Nivellements auf terrestrische Laserscans. Daher beginnen mit der vorliegenden Veröffentlichung die methodischen Weiterentwicklungen zur Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis terrestrischer Laserscans. In Abschnitt 5.3 werden die hier durchgeführten Betrachtungen wieder aufgegriffen. Inhaltlich bezieht sich der vorliegende Beitrag zuerst auf simulierte zweidimensionale Beispiele einer Laser-scannermessung. In Veröffentlichung A7 [Holst et al., 2015] werden die Erkenntnisse schlussendlich wieder auf das Realbeispiel der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg übertragen.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, ist die Abtastung von Oberflächen mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners zwar gleichmäßig bezogen auf ein polares Koordinatensystem, die resultierenden kartesischen Koordinaten weisen jedoch eine ungleichmäßige Punktverteilung und Punktdichte auf. Diese ist abhängig von der Messdistanz und dem Einfallswinkel. Diese ungleichmäßige Abtastung führt zu einer suboptimalen Konfiguration, die im Falle einer unzureichend bekannten Modellfläche verzerrte Schätzungen begünstigt. Die Modellfläche ist immer dann unzureichend bekannt, wenn Deformationen oder Objektdetails vorliegen, bei denen weder Formen, Größenordnungen noch Positionen bekannt sind. Dies ist beim TLS fast immer der Fall, da das Modellwissen kaum in dem Detailgrad vorliegt, der auf Basis einer hochauflösenden Laserscannermessung erfasst werden kann. Daher wirken sich die durch die suboptimale Konfiguration vorliegenden verzerrten Parameterschätzungen nur scheinbar lediglich auf Deformationsuntersuchungen aus. Vielmehr sind sie auf die meisten laserscannerbasierten Flächenanalysen übertragbar.

Mit Hilfe einer Konfigurationsanalyse, insbesondere der Zunahme von Redundanzanteilen r_i nach Gl. (3.32) sowie von Einflussfaktoren h_i nach Gl. (3.37), wird dieser Sachverhalt im vorliegenden Beitrag analysiert. Dies geschieht aufbauend auf den bisherigen methodischen Analysen mit Redundanzanteilen, die bei der Optimierung von Höhennetzkonfigurationen erzielt wurden (siehe Veröffentlichung A3, Holst et al. [2013c]).

Im ersten Schritt kann gezeigt werden, dass sich der direkte Einfluss unbekannter Deformationen auf die Parameterschätzung, der zu verzerrten Schätzungen führt, anhand der Einflussfaktoren quantifizieren lässt. Da die Einflussfaktoren von der Konfiguration und damit von der Messpunktverteilung direkt abhängen (siehe Abschnitt 3.4), verändert sich der Einfluss der Deformationen auf die Parameterschätzung bei Simulation unterschiedlicher Laserscannerstandpunkte und den daraus resultierenden unterschiedlichen Messpunktverteilungen und Beobachtungsvarianzen nach Gl. (3.9). Über Einflussfaktoren – bzw. im Umkehrschluss auch über Redundanzanteile – lässt sich somit herausarbeiten, inwiefern fehlendes Modellwissen auf die Parameterschätzung wirkt und inwiefern die Variation dieses Einflusses von der Konfiguration des Ausgleichs abhängt.

Im zweiten Schritt werden diese Erkenntnisse genutzt, um die Konfiguration zu optimieren, sodass der Einfluss der unbekanntem Deformation auf die Parameterschätzung verringert wird. Als Verfahren wird die Ausdünnung der Punktwolke vorgeschlagen. Diese erfolgt zumeist mit dem Ziel der Bildung einer gleichmäßigen Punktverteilung [Lee et al., 2001a; Mandow et al., 2011], einer krümmungsbezogenen Punktverteilung [Lee et al., 2001b; Budak et al., 2012; Shi et al., 2011] oder einer zufälligen Punktverteilung [Zainuddin et al., 2009]. Bei Implementierung einer Ausdünnung zur Erzeugung einer nahezu gleichmäßigen Punktverteilung – hierbei werden demnach Messpunkte aus der originalen Punktwolke anhand ihrer Position eliminiert – verändert sich folglich die Konfiguration und damit auch der Einfluss der unbekanntem Deformation. Dieser Einfluss, der erneut anhand der Einflussfaktoren quantifiziert wird, ist nach der Punktausdünnung konstant, unabhängig vom Standpunkt des Laserscanners. Dies führt dazu, dass auch die Ergebnisse der Parameterschätzungen nicht mehr variieren, wenn der Standpunkt des Laserscanners gewechselt wird. Dies konnte anhand einer zweidimensionalen Simulation auf Basis zwei verschiedener Standpunkte festgestellt werden.

Schlussendlich zeigt diese Veröffentlichung, dass sich Redundanzanteile bzw. Einflussfaktoren zur Konfigurationsanalyse eignen. Dies gilt im Speziellen, falls der Einfluss fehlenden Modellwissens auf die Parameterschätzung beziffert werden soll oder die Ursache verzerrter Parameterschätzungen zu ergründen ist. Ferner kann anhand dieser Analyse eine Optimierung der Konfiguration, z.B. durch eine Punktausdünnung, dokumentiert werden. Diese Dokumentation stellt heraus, dass die Punktausdünnung auf ein nahezu gleichmäßiges Raster zu einer Optimierung der Konfiguration des Ausgleichs führt, sodass die Parameterschätzungen nicht mehr von der ursprünglich ungleichmäßigen Punktverteilung – bedingt durch den Standpunkt des Laserscanners – abhängen. Somit liefert die in diesem Beitrag dargelegte Analyse der Konfiguration und der darauf basierende Ansatz zur Optimierung einen Beitrag zur Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerung bei der Approximation deformierter bzw. nicht detailliert bekannter Flächen.

Die Schwierigkeit bei diesen Analysen bestand darin, die Redundanzanteile zielführend zu deuten und daran anschließend einen Bezug zwischen Messpunktverteilung, unbekannter Deformation und Einfluss der Konfiguration herzustellen. Letztendlich konnte durch diese Verknüpfung der Grundstein für die weiteren, in den Veröffentlichungen B5-B7 [Holst et al., 2014a; Holst & Kuhlmann, 2014a; Holst et al., 2015] gesammelten Erkenntnisse gelegt werden.

Veröffentlichung B5 (peer-review)

- Holst, C., Artz, T., & Kuhlmann, H. (2014a). Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *J. Appl. Geodesy*, 8(3), 169–183

Angelehnt an die vorherige Studie greift dieser Beitrag ebenfalls den Einfluss unbekannter – und damit nichtparametrisierter – Deformationen auf die Approximation gescannter Oberflächen auf: Die Flächenparameter sind verzerrt, sie unterliegen also einem Bias gegenüber dem wahren Wert. Dieser Bias ist allerdings nicht konstant, sondern variiert bei Veränderung der Messgeometrie und damit der gesamten Konfiguration des Ausgleichs. Verschiedene Ansätze – neben der bereits vorgestellten Strategie zur Ausdünnung der Punktwolke – werden zur Reduzierung dieses variierenden Bias verifiziert. Diese Untersuchungen werden anhand von Simulationen einer dreidimensionalen Abtastung einer Ebene durchgeführt, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Laserscannerstandpunkten.

Die Untersuchungen basieren auf einer Interpretation und Analyse der Konfiguration des Ausgleichs in Form der Redundanzanteile. Neben der Konfiguration der originären Ausgleichung wird herausgestellt, inwiefern Manipulationen am Ausgleich zu einer Beeinflussung und gegebenenfalls zu einer Optimierung der Konfiguration des Ausgleichs führen können. Die Manipulationen beziehen sich dabei auf die in Veröffentlichung B4 [Holst & Kuhlmann, 2014b] bereits eingeführte Punktausdünnung, sowie auf die Einfügung räumlicher Korrelationen zwischen den Messpunkten und auf die Balancierung des Ausgleichs nach Linke [2000]. Räumliche Korrelationen benachbarter Messpunkte werden dabei über Einführung einer Korrelationsmatrix integriert [Koch, 1997], eine Balancierung des Ausgleichs mit dem Ziel einer Homogenisierung aller Redundanzanteile geschieht über die Integration von Balancierungsfaktoren [Linke, 2000].

Die aufgrund dieser Manipulationen auf die Parameterschätzung resultierenden Effekte lassen sich unmittelbar an den Redundanzanteilen ablesen. Darauf basierend ist ersichtlich, dass der Bias in der kQS quantitativ nicht reduziert werden kann. Es ist lediglich möglich, durch eine Ausdünnung der Punktwolke oder durch die Einführung räumlicher Korrelationen zwischen den Messpunkten eine größere Konstanz des Bias zu erzeugen. Somit ist der Einfluss der unbekanntenen Deformation nach der Manipulation der Konfiguration zwar nicht eliminiert, aber er ist unabhängig von der originären Messgeometrie und damit Messpunktverteilung basierend auf dem Laserscannerstandpunkt. Somit kann auch hier von einer Optimierung der Konfiguration gesprochen werden.

Lediglich durch eine Überführung der kQS in eine robuste Schätzung kann der Einfluss der unbekanntenen Deformation auch quantitativ reduziert werden. Dies wird anhand des Bounded Influence by Standardized Residuals (BIBER)-Schätzers [Wicki, 1998, 2001] sowie des Random Sample Consensus (RANSAC)-Algorithmus [Chum, 2005; Fischler & Bolles, 1981; Torr & Murray, 1997] gezeigt. Im Falle des BIBER-Schätzers ist auch hier wieder auf Basis der Redundanzanteile ersichtlich, weshalb der Ausgleich weniger von unbekanntenen Deformationen beeinflusst ist. Eine derartige Analyse ist für den RANSAC-Algorithmus hingegen nicht möglich,

da dieser keinen Ausgleich unter Einbeziehung aller Messpunkte durchführt, sondern die Parameter auf Basis einer minimalen Anzahl an Messpunkten bestimmt.

Insgesamt können diese Untersuchungen einen großen Beitrag zum Verständnis verzerrter Schätzungen bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von terrestrischem Laserscanning leisten. Sie zeigen, dass die Konfiguration bei der Approximation von Oberflächen analysiert werden sollte, obwohl beim TLS eine große Überbestimmung im Ausgleich vorliegt. Dafür wechselt hier auch die Betrachtungsweise von den Absolutwerten der Redundanzanteile und Einflussfaktoren zur Betrachtung relativer Redundanzanteilunterschiede bzw. Einflussfaktorunterschiede. Dieser Übergang mit den weitergehenden Interpretationen stellt gleichzeitig den methodischen Anspruch der vorliegenden Studie dar. Daneben bestand die Herausforderung darin, mögliche Optimierungsstrategien zu entwickeln bzw. existierende Methoden auf die aktuelle Problemstellung zu übertragen und diese wieder anhand der Konfigurationsanalyse zu verifizieren. In Abschnitt 5.3 wird näher auf dieses Vorgehen, die verwendeten Methoden und Ergebnisse eingegangen, da diese Veröffentlichung einen Hauptaspekt der vorliegenden Dissertation darstellt.

Veröffentlichung B6 (peer-review)

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014a). Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *J. Appl. Geodesy*, 8(4), 295–310

Werden Laserscanner zur hochgenauen Formanalyse verwendet, ist eine Kalibrierung der scannerinternen Abweichungen unerlässlich. Der vorliegende Beitrag untersucht das Potential einer Kalibrierung dieser scannerinternen Effekte ausschließlich auf Basis eines einzelnen Scans von nur einem Objekt. Dieser Ansatz stellt eine Neuheit dar, da die Abweichung jedes einzelnen Scanpunktes und die in ihm enthaltene individuelle Information über die scannerinterne Miskonstruktion zur Kalibrierung genutzt wird. Als Datengrundlage dienen sieben verschiedene Scans vom Radioteleskop Effelsberg, die im Jahr 2013 mit Hilfe der Leica ScanStation P20 aufgenommen wurden. Auch hier werden wieder die zur vorherigen Messung (Veröffentlichung A2, Holst et al. [2012]) identischen Elevationsstellungen zwischen 90° und 7.5° angefahren. Geschätzt wird dann jeweils neben den Parametern des Rotationsparaboloids (siehe Abschnitt 3.2.4) zusätzlich ein Satz an Kalibrierparametern anhand eingeführter Kalibrierfunktionen. Diese Kalibrierfunktionen setzen die systematischen Abweichungen eines Laserscanners mit denen eines Tachymeters gleich. Somit sind die Kalibrierparameter u.a. eine Zielachsabweichung und eine Kippachsabweichung. Zwischen den einzelnen Schätzungen auf Basis der sieben Elevationsstellungen des Radioteleskops variiert die Messgeometrie, da der Laserscanner bei dieser Messung aus dem Jahr 2013 durch die Montierung an einem flexiblen Gelenkarm stets kopfüber hängt und nicht mitrotiert.

Aufgrund der variierenden Messgeometrie liegen auch unterschiedliche Konfigurationen bei der anschließenden Approximation bzw. Kalibrierung vor. Aus diesem Grund gilt es, diese Konfigurationen bzgl. der Scannerkalibrierung zu verifizieren, sodass die für die Kalibrierung beste Konfiguration unter den sieben Scans ermittelt werden kann. Dies geschieht mit Hilfe von Redundanzanteilen, Standardabweichungen geschätzter Parameter sowie Korrelationen zwischen den geschätzten Parametern. Die Analyse zeigt, dass die Kalibrierstrategie prinzipiell erfolgreich sein kann. Dies liegt an der Integration von Modellwissen und der Nutzung der kompletten Punktwolke zur Schätzung eines einzigen (Kalibrier-) Parametersatzes. Die Konfiguration selber ist jedoch eher ungünstig bzw. wenig sensitiv bzgl. der Schätzung von Kalibrierparametern. Dies lässt sich sowohl anhand der Standardabweichungen, der Korrelationen als auch anhand der Redundanzanteile festmachen. Insbesondere die Analyse der Redundanzanteile offenbart die suboptimale Konfiguration des Ausgleichs, da der Beitrag einzelner Messpunkte zur Bestimmung der Kalibrierparameter verhältnismäßig groß schwankt. Diese Aspekte zur Scannerkalibrierung werden in den Abschnitten 5.4 und 5.1 erneut aufgegriffen.

Bezogen auf die Idee der Kalibrierung des Laserscanners anhand dieser Messungen ergibt sich daher, dass der hier vorgestellte Ansatz nur unter verschiedenen Bedingungen zielführend ist: Es muss ein geeignetes funktionales Kalibriermodell sowie ein realistisches stochastisches Modell aufgestellt werden, um eine Schätzung der Kalibrierparameter trotz suboptimaler Konfiguration zu ermöglichen. Beide Aspekte sind momentan noch nicht gegeben (siehe auch Abschnitt 6.2). Ferner sind Anforderungen an das gescannte Objekt sowie

die Messgeometrie zu stellen, die noch weiter herausgearbeitet werden müssen. Daher führt die Kalibrierung bisweilen nicht auf physikalisch interpretierbare Kalibrierparameter.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich, dass die Schwierigkeit der vorliegenden Studie bei der Trennung verschiedener Faktoren und der nötigen methodischen Weiterentwicklung an mehreren Stellen lag. So galt es einerseits, die Güte der Konfiguration getrennt nach dem Einfluss der Punktanzahl sowie nach dem Einfluss der Objekt- und Messgeometrie zu bewerten. Andererseits mussten die Kalibrierergebnisse in Bezug zu den verwendeten Kalibrierfunktionen gesetzt werden. Da diese Studie nur ein erster Schritt in die Richtung einer Laserscannerkalibrierung unter Hinzunahme der vorgestellten Konfigurationsanalyse sowie weiterentwickelten Kalibrierfunktionen ist, bleiben hier aktuell einige Fragestellungen offen. Diese werden in Abschnitt 6.2 wieder aufgegriffen.

Veröffentlichung B7 (peer-review)

- Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., & Kuhlmann, H. (2015). Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 9(1), 1–13

Die vorliegende Studie kombiniert die bisherigen Erkenntnisse, insb. aus den Veröffentlichungen A3 [Holst et al., 2013c] und B4-B6 [Holst & Kuhlmann, 2014b; Holst et al., 2014a; Holst & Kuhlmann, 2014a], in einem weiterentwickelten Ansatz zur flächenhaften Deformationsanalyse. Als Beispiel dient wieder die Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg, wie in Abschnitt 1.1 eingeführt und in Abschnitt 3.2.4 parametrisch beschrieben. Herangezogen werden wieder die Scans aus dem Jahr 2013. Neben den im Rahmen der vorliegenden Dissertation weiterentwickelten Analysemethoden ergeben sich daher auch messtechnische Fortschritte gegenüber der Messung aus dem Jahr 2010 (siehe Veröffentlichung B2, Holst et al. [2012]). Die Weiterentwicklung bestehender Konzepte zur scannerbasierten Deformationsuntersuchung wird in Abschnitt 5.4 wieder aufgegriffen, da sie einen Hauptaspekt der vorliegenden Dissertation darstellt.

Von Seiten der Messtechnik wurde auf einen präziseren terrestrischen Laserscanner zurückgegriffen, die Leica ScanStation P20. Dieser wurde wieder im Subreflektor des Radioteleskops montiert, diesmal jedoch mit einem Gelenk, welches eine dauerhafte Kopfüberstellung des Scanner garantiert (siehe auch Veröffentlichung B6, Holst & Kuhlmann [2014a]). Dadurch wird verhindert, dass bei einer ansonsten teilweise großen Neigung des Laserscanners gravitative Kräfte auf dessen Servomotoren wirken, die zu Schädigungen führen könnten.

Von Seiten der flächenhaften Deformationsanalyse wird die Wichtigkeit der Datenausdünnung, der Integration detaillierten Modellwissens und der Scannerkalibrierung herausgestellt. Diese Aspekte wurden in den vorherigen Veröffentlichungen B4-B6 [Holst & Kuhlmann, 2014b; Holst et al., 2014a; Holst & Kuhlmann, 2014a] bereits beschrieben. Auch hier wird wieder der Bezug zwischen der Konfiguration des Ausgleichs und der Notwendigkeit einer Ausdünnung der Punktwolke sowie der Integration von Modellwissen hergestellt. Während der Aspekt der Datenausdünnung schon mehrfach erwähnt ist, stellt die explizite Heraushebung der Bedeutung von der Integration von Modellwissen einen neuen Schwerpunkt dar. Implizit wurde dieser Aspekt hingegen schon an vielen Stellen aufgegriffen, da die Verzerrung von Parameterschätzungen, die anhand der Konfiguration analysiert wird, in direktem Zusammenhang mit unbekanntem Deformationen und sonstigen unbekanntem geometrischen Objekteigenschaften steht (siehe Zusammenfassung zur Veröffentlichung B4 [Holst & Kuhlmann, 2014b] sowie Kapitel 2). Die Wichtigkeit der Scannerkalibrierung ergibt sich unmittelbar aus Veröffentlichung B6 [Holst & Kuhlmann, 2014a].

Auf Basis dieser verbesserten Messung und Prozessierung werden Brennweitenvariationen des Hauptreflektors von 22.7 m bestimmt. Diese Größenordnung übertrifft die bereits in Veröffentlichung B2 [Holst et al., 2012] bestimmte Brennweitenvariation von 12.6 mm aus dem Jahr 2010. Diese signifikanten Abweichungen sind jedoch mit dem nun verbesserten Mess- und Auswerteprozess zu begründen, insbesondere mit der konstanten Kopfüberstellung des Laserscanners sowie dessen Kalibrierung. Ferner deuten nun flächenhafte Abweichungen von der bestfit Oberfläche im Bereich weniger Millimeter auf flächenhaften Deformationen des Hauptreflektors hin. Somit kann die Annahme einer homologen Verformung, wie sie in Abschnitt 1.1 aufgeworfen wurde, nur bis zu einer gewissen Größenordnung bestätigt werden. Die empirische Standardabweichung der Streckenmessung des Laserscanners kann auf 1.3 mm abgeschätzt werden. Die Ermittlung dieser Ergebnisse wird in Abschnitt 5.4 näher diskutiert.

5. Herausstellung der wichtigsten Aspekte

Im vorherigen Kapitel wurden die für die vorliegende Dissertation relevanten Veröffentlichungen zusammengefasst. Bei der Gesamtbetrachtung lassen sich die in den folgenden Abschnitten 5.1–5.4 detailliert beschriebenen Aspekte weiter herausstellen. Jeder dieser Aspekte trägt dazu bei, die Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen und deren Auswirkung auf die Parameterschätzung zu analysieren. Darauf basierend können Strategien zur Verbesserung der Konfiguration aufgezeigt werden. Diese Betrachtungen gelten sowohl für Oberflächenabtastungen durch Nivellements als auch durch terrestrische Laserscans.

5.1 Konfigurationsanalyse flächenhafter Nivellements und terrestrischer Laserscans

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind Konfigurationsanalysen sowohl in der reinen Mathematik als auch in der Geodäsie seit vielen Jahrzehnten Bestandteil von Qualitätsanalysen einer Ausgleichung bzw. Approximation. Bei Messverfahren, bei denen die Beobachtungsanzahl – hier im Speziellen die Messpunktanzahl – stets sehr hoch ist und im Bezug zur Anzahl der zu schätzenden Parameter eine große Überbestimmung vorliegt, wird die Konfigurationsanalyse des Ausgleichs jedoch oft vernachlässigt und die Güte der Konfiguration nicht hinterfragt. Dennoch ist sie in beiden hier vorgestellten Anwendungen der Bodenbewegungsmodellierung auf Basis von Präzisionsnivellements sowie der Deformationsuntersuchung des Radioteleskops Effelsberg von großer Bedeutung. Dies wird insbesondere in den Veröffentlichungen A3 [Holst et al., 2013c] sowie B4 [Holst & Kuhlmann, 2014b], B5 [Holst et al., 2014a] und B6 [Holst & Kuhlmann, 2014a] diskutiert.

Flächenhafte Präzisionsnivellements

Dies soll anhand von Abb. 5.1, die die Redundanzanteile r_i (Gl. 3.32) für jeden Messpunkt darstellt, für die bereits eingeführten Beispielregionen A (vgl. Abb. 1.1) und B (vgl. Abb. 3.3) verdeutlicht werden. Die Redundanzanteile basieren jeweils auf der Approximation eines bivariaten Polynoms an die gemessenen Höhenänderungen. Diese Polynome werden unter Einhaltung der in Veröffentlichung A1 genannten Kriterien mit der geringst möglichen Parameteranzahl (Beispielregion A: 194 Beobachtungen, 15 auffällige Punkte, Polynomordnung 6, 23 Parameter; Beispielregion B: 163 Beobachtungen, 5 auffällige Punkte, Polynomordnung 6, 14 Parameter) optimal an die nivellierten Höhenänderungen approximiert (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Holst et al. [2013b,c]).

Die in Abb. 5.1 dargestellten Redundanzanteile verdeutlichen die Kontrollierbarkeit einzelner Beobachtungen und damit auch den unterschiedlichen Einfluss der Beobachtungen auf das Ausgleichsergebnis. Zwei Trends sind eindeutig erkennbar:

- Je weiter Beobachtungen am Rand des Untersuchungsgebietes liegen, desto geringer sind ihre Redundanzanteile.
- Je dichter die Punkthäufung ist, desto höher sind die Redundanzanteile.

Der erste Effekt wird durch die Objektgeometrie – bedingt durch das Modell des bivariaten Polynoms – beeinflusst: Zum Rand hin wird die Zuverlässigkeit unabhängig von der konkreten mathematischen Flächenparametrisierung geringer, da das Modell dort immer nur aus einer Richtung durch die Beobachtungen gestützt werden kann. Dieser Einfluss der Objektgeometrie kann nur durch Approximation eines Polynoms mit möglichst geringer Ordnung bzw. möglichst wenigen Parametern verringert werden. Der zweite Effekt ist

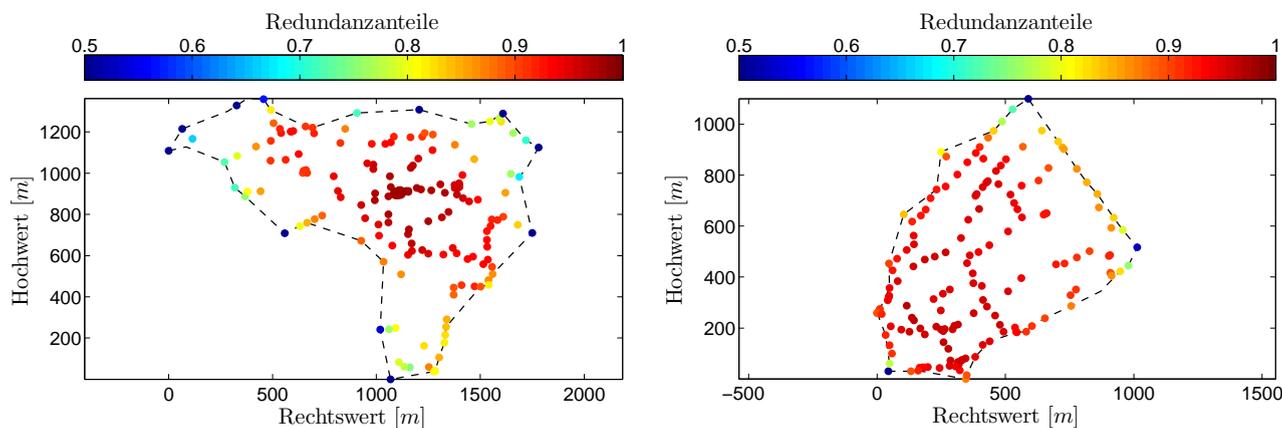


Abbildung 5.1: Redundanzanteile der nivellierten Höhenunterschiede in Beispielregionen A (links) und B (rechts). Die Farbskala ist zur Vergleichbarkeit auf den Bereich $[0.5; 1.0]$ skaliert; einige Redundanzanteile sind kleiner 0.5.

mit der Messpunktverteilung zu begründen: Die Beobachtungen können sich gegenseitig besser stützen und kontrollieren, falls in direkter Nachbarschaft weitere Beobachtungen sind. Daher wird die Wichtigkeit der einzelnen Messinformation bei dichten Punkthäufungen geringer, die Redundanzanteile sind also höher. Umgekehrt werden sie geringer, wenn in der Nachbarschaft einzelner Messpunkte wenig weitere Beobachtungen vorhanden sind. Der in Abschnitt 3.4 genannte dritte Faktor, der die Konfiguration bzw. die Redundanzanteile ebenfalls beeinflusst, gleicht dem stochastischen Modell. Dieses hat hier jedoch keinen Einfluss, da jede Beobachtung als gleich genau und unkorreliert modelliert ist (vgl. Abschnitt 3.1.2 und Gl. 3.5). Somit kürzt sich der lediglich vorhandene Varianzfaktor $\sigma_{\Delta h}^2$ aus Gl. (3.4) bei der Berechnung der Redundanzanteile nach Gl. (3.32) heraus.

Eine Analyse der in Abb. 5.1 dargestellten Redundanzanteile kann nun Aufschluss über die Qualität der Konfiguration, in Abhängigkeit der beschriebenen Einflüsse, bzw. die zu erwartende Zuverlässigkeit der Approximation geben. Während in der Gebietsmitte jeweils Redundanzanteile nahe dem Maximalwert 1 vorliegen, sind diese am Rand oft im Bereich von 0.5 oder sogar geringer. Demnach überwiegt der Einfluss der Objektgeometrie denjenigen der Messpunktverteilung. Dieser Eindruck vergrößert sich noch, da die Punktdichte am Rand bei beiden Untersuchungsgebieten geringer als in der Gebietsmitte ist.

Absolut gesehen sind die Redundanzanteile demnach sehr hoch, wenn den früheren Bestrebungen beim geodätischen Netzaufbau zur Erlangung von Redundanzanteilen im Bereich zwischen 0.3 bis 0.7 gerecht werden soll (siehe Abschnitt 2 sowie Staudinger [1999]). Dass diese Redundanzanteile aufgrund der flächenhaften Abtastung im Mittel generell höher als bei gewöhnlichen terrestrischen Netzen sind, ist jedoch offensichtlich. Insgesamt kann die Überbestimmung mit $r = \sum r_i = 171$ (Gl. 3.36) für Beispielregion A sowie mit $r = 149$ für Beispielregion B angegeben werden. Daher ist eine Analyse der Absolutwerte der Redundanzanteile nicht zielführend.

Folglich sollte die Analyse der Redundanzanteile aus Sicht relativer Redundanzanteilunterschiede durchgeführt werden. Diese führt zu dem Schluss, dass Beobachtungen am Rand gegenüber denjenigen in der Gebietsmitte relativ unkontrolliert sind und damit einen relativ großen Einfluss haben. Ihr Anteil an der Erzielung der Approximationsergebnisse ist damit ungleich größer. Prinzipiell folgt aus diesen Erkenntnissen, dass eine Analyse der Konfiguration auch bei einer großen Überbestimmung im Ausgleich Schlussfolgerungen bzgl. der Zuverlässigkeit zulässt. Die Notwendigkeit der Analyse ergibt sich hier nicht aus der Verifizierung, ob die Redundanzanteile groß genug sind. Vielmehr sind die relativen Redundanzanteilunterschiede von Interesse. Dies lässt sich im folgenden Abschnitt bzgl. terrestrischer Laserscans noch weiter herausstellen.

Terrestrische Laserscans

Für terrestrische Laserscans gelten ähnliche Aussagen. Abb. 5.2 stellt die Redundanzanteile für die Approximation einer gescannten Ebene dar, wobei zwei verschiedene Laserscannerstandpunkte in einem Abstand von

10 m zur Ebene gewählt wurden (links: Standpunkt 1, rechts: Standpunkt 3). Aus diesen beiden Standpunkten resultiert nach Abb. 3.8 eine unterschiedliche Messpunktverteilung, sodass einzelne Regionen der Ebene dichter und andere weniger dicht abgetastet sind. Darauf basierend unterscheiden sich auch die Verteilungen der Redundanzanteile in Abb. 5.2 voneinander.

Prinzipiell sind die Redundanzanteile für alle Messpunkte sehr hoch. Dies ist beim Laserscanning aufgrund der sehr hohen Anzahl an Messpunkten gewöhnlich und daher uneingeschränkt auf Flächenapproximationen mit Laserscanning zu übertragen [Holst et al., 2014a]. Die Gesamtredundanz ist nach Gl. (3.36) bei $r \approx 250000$, wobei 250000 auch der Anzahl der Messpunkte entspricht. Demnach sind alle Redundanzanteile in der Nähe ihres Maximalwertes von 1: sie liegen im Intervall von $r_i \in [0.9999738, 0.9999956]$. Das führt zu einer auch nur sehr geringen Variation von $\max(r_i) - \min(r_i) \approx 2 \cdot 10^{-5}$ für das Beispiel der abgetasteten Ebene¹ (Abb. 5.2).

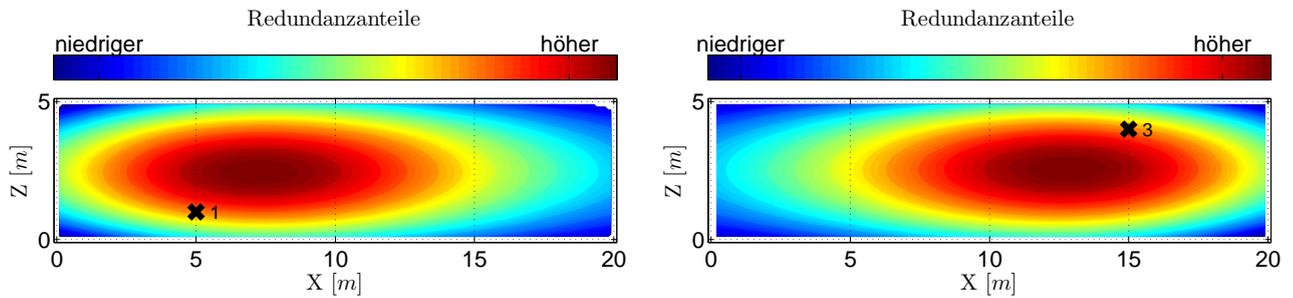


Abbildung 5.2: Redundanzanteile der Messpunkte beim TLS bei der Abtastung einer Ebene von zwei Standpunkten 1 und 3 (schwarze Kreuze = Projektionen der Scannerstandpunkte in Ebene).

Der gleiche Effekt sehr hoher Redundanzanteile ist auch bei der Approximation des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg auszumachen. Abb. 5.3 (links) stellt die Redundanzanteile beim simulierten Scanning des Hauptreflektors bei einer Elevationsstellung von 45° dar. Die hier vorliegende ungleichmäßige Abtastung wurde für eine Elevationsstellung von 90° bereits in Abb. 1.2 schematisch dargestellt. Hier liegen die Redundanzanteile im Intervall von $r_i \in [0.9996, 0.9999]$, woraus sich eine Variation von $\max(r_i) - \min(r_i) \approx 3 \cdot 10^{-4}$ ergibt. Zwar scheint diese Variation nicht groß zu sein, beim Übergang der Betrachtung von Redundanzanteilen auf Einflussfaktoren $h_i = 1 - r_i$ (Gl. 3.37) wird aber ersichtlich, dass hier eine Variation von $h_i \in [0.0001, 0.0004]$ vorliegt. Dies führt zu einem Faktor von $\frac{\max(h_i)}{\min(h_i)} = 4$. Daraus folgt, dass Messpunkte je nach ihrer Position in der Punktwolke den vierfachen Einfluss auf die Parameterschätzung gegenüber anderen Messpunkten besitzen. Diese relativen Redundanzanteilunterschiede bzw. Einflussfaktorunterschiede sind daher anstelle der absoluten Betrachtung ausschlaggebend für eine sinnvolle Konfigurationsanalyse.

Dieser Effekt kann sich zudem noch verstärken, wenn neben der objektbedingten Parameter zur Flächenapproximation weitere Parameter in den Ausgleich integriert werden. Dies betrifft z.B. die in Veröffentlichung B6 [Holst & Kuhlmann, 2014a] beschriebene Kalibrierung mit der Einführung zusätzlicher Kalibrierparameter. Diese Einführung zusätzlicher Kalibrierparameter beeinflusst die Konfiguration des Ausgleichs dabei erheblich, wie Abb. 5.3 (rechts) zeigt. Dass die Kalibrierparameter einen Bezug zum Laserscanner aufweisen, ist anhand der Redundanzanteile klar erkennbar: Diese sind nun symmetrisch zum Koordinatensystem des Laserscanners. Der Einfluss der Kalibrierparameter und des dort implementierten funktionalen Kalibriermodells übertrifft damit den Einfluss der bisher betrachteten drei Faktoren der Punktverteilung, der Objektgeometrie und des stochastischen Modells (siehe Abschnitt 3.4). Zudem kann aufgedeckt werden, dass die relativen Unterschiede bzw. die Variationen der Redundanzanteile noch verstärkt werden. Diese liegen nun bei $r_i \in [0.9975, 0.9997]$ bzw. $h_i \in [0.0003, 0.0025]$, was zu $\frac{\max(h_i)}{\min(h_i)} \approx 8$ führt. Der immense Einfluss der zusätzlichen Einführung von Kalibrierparametern kann damit anhand der Konfigurationsanalyse beschrieben und auch quantifiziert werden.

Aus diesen Beschreibungen ist ersichtlich, dass beim Laserscanning keine Konfigurationsanalyse mit dem Ziel der Quantifizierung des Einflusses von Einzelpunkten sinnvoll ist, sondern vielmehr eine Betrachtung

¹Aufgrund der minimalen numerischen Variation der Redundanzanteile sind die Absolutwerte in Abb. 5.2 nicht angegeben.

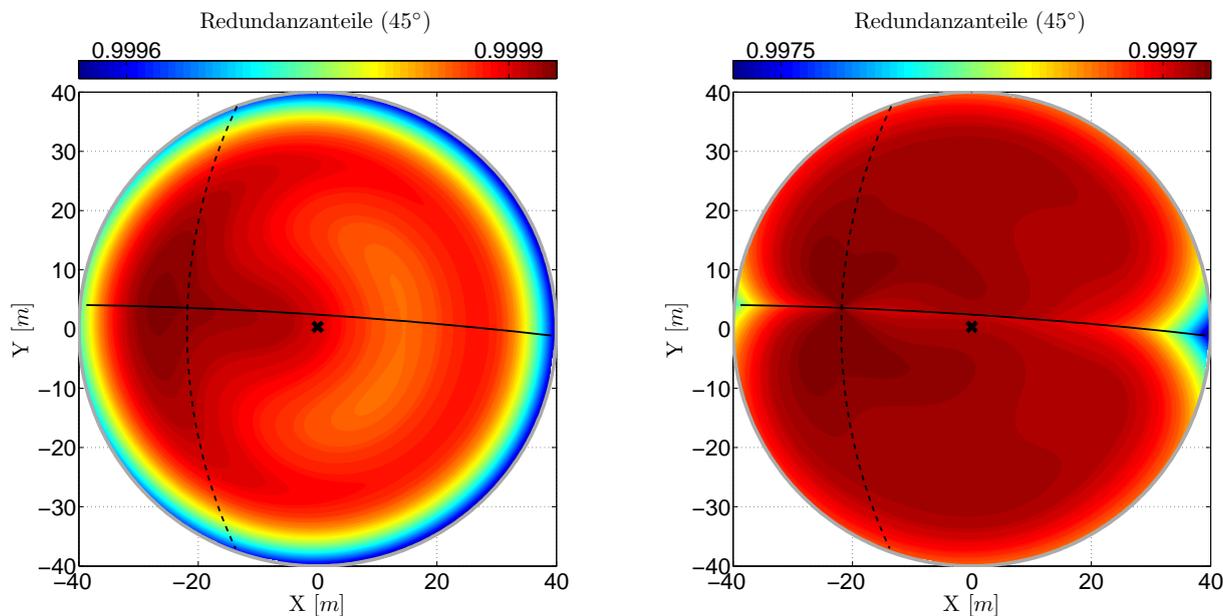


Abbildung 5.3: Redundanzanteile der Messpunkte bei Approximation des Hauptreflektors des Radioteleskops Eifelberg (links) sowie bei Approximation mit simultaner Schätzung von Kalibrierparametern (rechts), jeweils bei 45° Elevationsstellung (schwarzes Kreuz = Projektion des Laserscannerstandpunktes auf Paraboloid, schwarze Linie = Projektion der x -Achse des Laserscanners, gestrichelte Linie = Projektion der y -Achse).

relativer Redundanzanteileunterschiede bzw. Einflussfaktorunterschiede, auch in Anbetracht ihrer jeweiligen Variation auf dem gescannten Objekt. Denn insbesondere diese Verteilung entscheidet über die Konfiguration und den relativen Einfluss einzelner Messpunkte auf die Parameterschätzung [Holst & Kuhlmann, 2014b].

Ferner ist anhand der Redundanzanteile eine Analyse bzgl. des unterschiedlichen Einflusses der Effekte von Messpunktverteilung, Objektgeometrie und stochastischem Modell möglich. Die Effekte der Messpunktverteilung und des stochastischen Modells – enthalten in Σ_{ll} (Gl. 3.9) – überlagern sich dabei: Punkte in geringer Entfernung werden als genauer angenommen – demnach haben sie einen geringeren Redundanzanteil –, in geringer Entfernung ist die Abtastung aber gleichzeitig auch dichter – was zu einem höheren Redundanzanteil führt. Daher wirken diese beiden Aspekte gegensätzlich. Der Effekt der Punktverteilung übertrifft denjenigen des stochastischen Modells aber offenbar, da die Redundanzanteile in Bereichen höherer Punktdichte größer sind, wie anhand von Abb. 5.3 (links) unter Betrachtung der dort vorliegenden Messgeometrie gesehen werden kann. Der Faktor des stochastischen Modells scheint demnach aufgrund der sich bei der Abtastung nur sehr langsam ändernden Varianzen für Strecken und Winkel in Gl. (3.9) im Vergleich zum Einfluss der Messpunktverteilung eher von untergeordneter Wichtigkeit zu sein [Holst & Kuhlmann, 2014b; Holst et al., 2014a]. Aus diesem Grund steht die messtechnisch bedingte ungleichmäßige Abtastung beim Laserscanning (vgl. Abschnitt 3.2.3) besonders im Fokus einer Konfigurationsanalyse.

Der Einfluss der Objektgeometrie auf die Konfiguration ist ebenfalls von großer Bedeutung. Dies äußert sich in den Beispielen aus Abb. 5.2–5.3 in der Tatsache, dass die Redundanzanteile zum Rand der Oberfläche immer geringer werden. Bei isolierten Einzelpunkten würde hier von Hebelbeobachtungen gesprochen werden [Chatterjee & Hadi, 1986]. Diese Effekte sind – wie auch bei der Konfiguration von Nivellements – nicht zu vermeiden. Sie spiegeln die Wichtigkeit einzelner Messpunkte zur geometrischen Bestimmung der Objektfläche oder ihrer Lage im Raum wider. Dies ist auch aus geodätischen Netzen bekannt, wo äußere Netzpunkte einen großen Einfluss auf die Lagerung des Netzes haben. Diese Sachverhalte lassen sich durch die Konfigurationsanalyse sehr gut aufdecken und würden ohne eine derartige Untersuchung verborgen bleiben.

5.2 Optimierung der Konfiguration zur Approximation flächenhafter Nivellements

Wie aus Abb. 5.1 ersichtlich, variieren die Redundanzanteile sehr stark in den Beispielregionen zur Analyse sämpfungsbedingter Bodensenkungen, mitunter bedingt durch die dort auch dargestellte ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche (siehe auch Abschnitt 5.1). Dieser Zustand einer ungünstigen Konfiguration ist nicht erstrebenswert, falls eine kontinuierlich hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Approximation garantiert werden soll. Daher ist aufgrund der ungleichmäßigen Abtastung zu hinterfragen, ob die Homogenität der Verteilung der Messpunkte ausreichend ist, um zuverlässig eine Flächenapproximation nach Abschnitt 3.1.4 bzw. den in Veröffentlichung A1 [Holst et al., 2013b] genannten Kriterien durchführen zu können. Diese im Folgenden weiter aufgegriffene Thematik wird schwerpunktmäßig in den Veröffentlichungen A3 [Holst et al., 2013c] und A4 [Holst et al., 2013d] behandelt.

Basierend auf diesen einführenden Worten lauten die zentralen Fragestellungen zur Analyse und Optimierung der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements:

- Wie kann die Konfiguration bei der Approximation hinsichtlich der Anzahl und Position der Messpunkte analysiert werden?
- Wie kann objektiv analysiert werden, an welchen Positionen zusätzliche Messpunkte benötigt werden, um die Konfiguration des Ausgleichs zu optimieren?

Aus diesen Fragestellungen wird ersichtlich, dass die hier vorgestellte Analyse und Optimierung der Konfiguration mit einer Optimierung der Messpunktverteilung gleichzusetzen ist. Die beiden weiteren Faktoren der Konfiguration – das stochastische Modell und die Objektgeometrie (Abschnitt 3.4) – bleiben von der Optimierung ausgeschlossen. Dies macht Sinn, da das stochastische Modell messbedingt gegeben ist sowie das bivariate Polynommodell auf Basis der Beobachtungen datenadaptativ entwickelt wird. Trotz zahlreicher Publikationen zur Netzoptimierung 3. Ordnung – der Verbesserung existierender Netze – ist kein Verfahren bekannt, dass diese Optimierung zur Bestimmung von Positionen zusätzlicher Messpunkte durchführen könnte.

Das Ziel dieser Optimierung ist also eine Verbesserung der Messpunktverteilung, sodass sowohl die Anzahl als auch die Position der Messpunkte – unter Berücksichtigung der Komplexität der Bodenbewegungen – eine zuverlässige Approximation ermöglichen [Holst et al., 2013c,b]. Die Anpassung an die Komplexität der Bodenbewegungen ist essentiell, da diese Komplexität auch über die Komplexität des zur Parametrisierung verwendeten, datenadaptiv angepassten bivariaten Polynoms entscheidet (siehe auch Abschnitt 3.1.4). Darauf basierend können die wichtigsten Anforderungen an die Optimierungsstrategie wie folgt zusammenfasst werden:

- Objektive, datengetriebene Analyse auf Basis der Konfiguration (Redundanzanteile)
- Unabhängigkeit der Analyse von der Lage und Orientierung des Netzes
- Einflussnahme auf das maximale Optimierungsziel im Sinne einer wirtschaftlichen Lösung

Aus diesen Anforderungen ergibt sich eine Zielfunktion unter Nebenbedingungen für die Optimierung:

$$\begin{array}{lll}
 \text{Zielfunktion:} & \{\max(\text{Punktabstand}) - \min(\text{Punktabstand})\} & \dots \min \\
 \text{Nebenbedingung 1:} & \{\max(r_i) - \min(r_i)\} & \dots \min \\
 \text{Nebenbedingung 2:} & \text{Wirtschaftlichkeit} & \dots \max
 \end{array} \quad (5.1)$$

Darauf basierend wurde ein Algorithmus zur Optimierung der Konfiguration in drei Schritten entwickelt [Holst et al., 2013c]. Dieser vereint die Redundanzanteile mit dem Abtasttheorem aus der digitalen Signalverarbeitung [Kammeyer & Kroschel, 2006]: Im ersten Schritt wird über die Ordnung a des Polynoms, die sich aus der Komplexität der Bodenbewegungen ergibt, die Anzahl nötiger Messpunkte sowie deren Positionen festgelegt. Die Ordnung a und die Polynomparameter wurden zuvor anhand der datenadaptiven Modellentwicklung (siehe auch Abschnitt 3.1.4 und Veröffentlichung A1, Holst et al. [2013b]) über das

GMM nach Abschnitt 3.3.1 geschätzt. Zur Festlegung der nötigen Messpunkte und ihrer Positionen wird ein regelmäßiges Gitter über das Untersuchungsgebiet gelegt, wobei die Rasteranzahl n_g der Anzahl nötiger Messpunkte pro Koordinatenrichtung entspricht (Abb. 5.4). Diese Größe wird über differentialgeometrische Überlegungen [Bärwolff, 2004; Westermann, 2001] gewonnen: In einem Polynom der Ordnung a können pro Koordinatenrichtung höchstens

$$n_w = \frac{a - 1}{2} \quad (5.2)$$

Schwingungen enthalten sein. Unter Hinzunahme des Abtasttheorems, insbesondere der dort enthaltenen Nyquistfrequenz [Bellanger, 1989], ergibt sich daraus eine theoretisch nötige Punktzahl von $\lceil n_w \cdot 2 \rceil$ pro Koordinatenrichtung. Unter Einbeziehung von Messabweichungen und der Zuverlässigkeit erhöht sich die Zahl auf [Holst et al., 2013b,c,d]

$$n_g = \lceil n_w \cdot 5 \rceil. \quad (5.3)$$

Demnach sind pro Koordinatenrichtung n_g gleichabständige Messpunkte nötig, um alle enthaltenen Schwingungen zuverlässig zu modellieren. Deren Position ergibt sich aus der Ausdehnung des Untersuchungsgebiets. Durch diese Betrachtung in beide Koordinatenrichtungen x und y kann somit ein Raster aufgebaut werden. Da in den einzelnen Rasterzellen nun entweder gar keine, eine oder mehrere Messpunkte enthalten sind, kann in den überbesetzten Zellen somit eine Elimination der Messpunkte erfolgen.

Abb. 5.4 zeigt das Ergebnis der optimierten Konfiguration für die Beispielregion B. Es ist ersichtlich, dass sieben Zellen im ursprünglichen Beobachtungsnetz leer sind. Hier sind zusätzliche Beobachtungen – an einer beliebigen Position innerhalb der Rasterzelle – hinzugefügt worden. Des Weiteren ist die Beobachtungsdichte in manchen Bereichen überproportional hoch, sodass hier eine Punktelimination stattfinden kann. Demnach ist die Anzahl an ursprünglichen Messpunkten zwar insgesamt groß genug, durch die ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche sollten an sieben Positionen jedoch zusätzliche Messpunkte eingefügt werden.

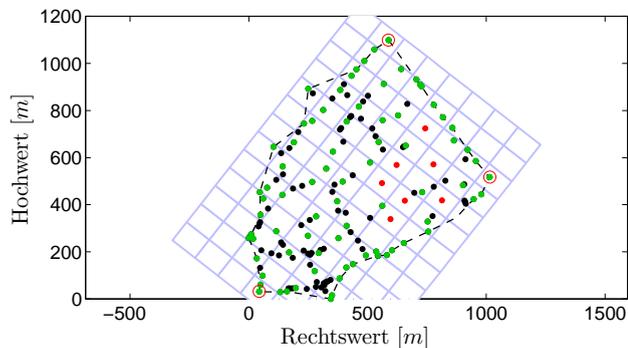


Abbildung 5.4: Optimierung der Konfiguration von Beispielregion B (schwarz = zu eliminierende Punkte, grün = zu erhaltende Punkte, rot = hinzuzufügende Punkte, rote Kreise = Zwillingpunkte)

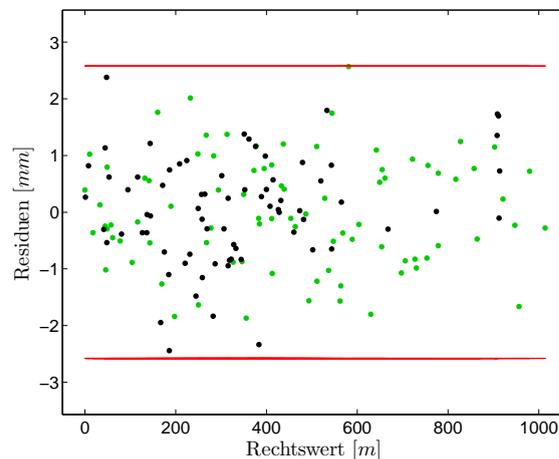


Abbildung 5.5: Residuen von der Flächenapproximation der Beispielregion B auf Basis der optimierten Konfiguration (schwarz = unabhängige Kontrollbeobachtungen, grün = Punkte der optimierten Konfiguration, rot = Punkte der optimierten Konfiguration, rote Kreise = Punkte der optimierten Konfiguration, rote Kreise = Punkte der optimierten Konfiguration, rote Kreise = Punkte der optimierten Konfiguration). Ein roter Bereich zwischen $\pm 2.58 \text{ mm}$ bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99.0%, siehe Abschnitt 3.1.4).

Neben diesem ersten Schritt der Optimierung der Konfiguration sind noch zwei weitere essentiell: Falls nach der Optimierung immer noch sehr hohe Redundanzanteile vorliegen – was unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit suboptimal ist – können die zugehörigen Messpunkte eliminiert werden. Es findet also der weitverbreitete Schritt der Datenreduktion bzw. Punktausdünnung statt [Gründig & Bahndorf, 1984; Schmitt, 1985b]. Damit wird die Tatsache berücksichtigt, dass die Optimierung bisher nur auf der Ordnung des Polynoms basiert

(siehe Gl. 5.2), nicht aber die Parameteranzahl einbindet. Diese ist aber für die Konfigurationsanalyse ebenfalls von hoher Bedeutung, da sie über die Designmatrix \mathbf{A} (Gl. 3.14) in $\Sigma_{\hat{v}\hat{v}}$ (Gl. 3.18) und damit auch in den Redundanzanteilen r_i (Gl. 3.32) enthalten ist. Eine Proportionalität zwischen Ordnung des Polynoms und Parameteranzahl ist nicht zwingend gegeben, da nichtsignifikante Parameter aus dem Ausgleich eliminiert werden (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Veröffentlichung A1, Holst et al. [2013b]). Diese zusätzliche Elimination von Messpunkten greift jedoch nur selten, da der in n_g enthaltene Faktor von 5 (Gl. 5.3), der auch unter empirischen Gesichtspunkten gewählt wurde, weniger große Diskrepanzen zwischen Polynomordnung und Parameteranzahl, bedingt durch eine große Anzahl nichtsignifikanter Parameter, abfängt. Dies gilt auch für die vorliegende Beispielregion B, wo sich dieser dritte Schritt nicht auf das Ergebnis der Optimierung auswirkt.

Im dritten Schritt werden Randpunkte wieder eingefügt. Dies widerspricht eigentlich den vorherigen Bemühungen zur Bildung eines regelmäßigen Rasters an Beobachtungen ausreichender Zuverlässigkeit. Dennoch ist diese Wiedereinführung sinnvoll bei Beachtung der Objektgeometrie, also der geringeren Zuverlässigkeit der Schätzung am Rand des Untersuchungsgebiets (vgl. Abb. 5.1). Mit diesem Schritt geht auch das Hinzufügen von Zwillingpunkten am Rand einher [Holst et al., 2013d]: Falls die Zuverlässigkeit im Sinne der Redundanzanteile – und damit die Konfiguration – an manchen Randpunkten zu gering ist, sollte ein sogenannter Zwillingpunkt in direkter Umgebung zu einem existierenden Messpunkt hinzugefügt werden. Die Idee hinter diesem Zwillingpunkt ist dabei, dass zusätzliche Nivellements auf einem Messpunkt in direkter Nachbarschaft eines bereits existierenden Höhenbolzens wirtschaftlich durchzuführen sind. Die wirtschaftlich nur gering negativ wirkende Einführung eines Zwillingpunktes ist daher mit der großen positiven Auswirkung auf die Qualität der Konfiguration zu begründen. Bei Beispielregion B sollten der eingeführten Methodik folgend drei Randpunkte eingefügt werden, wie Abb. 5.4 zeigt.

Bei der Optimierung wurde beschrieben, dass Beobachtungen eliminiert werden. Diese Beobachtungen werden aufgrund der Optimierungsstrategie für die optimale Schätzung nicht benötigt. Es findet somit eine Zuweisung eines jeden Messpunkts statt, wobei er im Sinne der Konfiguration entweder als relevant (er sollte erhalten werden) oder als weniger relevant (er kann theoretisch eliminiert werden) eingestuft wird. Dennoch sind diese weniger relevanten Messpunkte weder überflüssig noch sollte eine großflächige Reduktion beim Messvorgang um diese Beobachtungen durchgeführt werden. Vielmehr können aussortierte Punkte als unabhängige Kontrollbeobachtungen fungieren. Das heißt, sie können die Schätzung verifizieren, da sie an ihr nicht teilgenommen haben [Holst et al., 2013d]. Abb. 5.5 zeigt die Residuen der Schätzung auf Basis der optimierten Konfiguration. Dargestellt sind sowohl diejenigen Punkte, die an der Schätzung teilgenommen haben, als auch die eliminierten Punkte (unabhängige Kontrollbeobachtungen). Wie zu sehen ist, unterstützen auch diese Kontrollbeobachtungen die Schätzung, da alle Residuen innerhalb des Konfidenzbereichs liegen (siehe Abschnitt 3.1.4).

Eine weitere Methode wäre die Wiedereinführung der eliminierten Punkte mit geringeren Gewichten. Diese punktabstandsabhängigen Gewichte berücksichtigen dann die ungleichmäßige Abtastung der Oberfläche. Diese Lösung verbessert analog zur Elimination nicht nötiger Punkte die Konfiguration bestehender Netze. Von beiden Fällen unabhängig bleibt aber, dass in manchen Regionen – wie auch in Beispielregion B – eine partielle Verdichtung der Messpunkte zur Flächenapproximation mit optimaler Zuverlässigkeit nötig ist. Dies kann auf Basis der vorgestellten Methode objektiv aufgedeckt werden. Somit ist es anhand der vorgestellten Konfigurationsanalyse und -optimierung erstmals möglich, den Bedarf zusätzlicher Beobachtungen und die Position zusätzlicher Messpunkte für ein bestehendes geodätisches Netz objektiv zu ermitteln.

5.3 Aufdeckung verzerrter Schätzungen bei der Approximation terrestrischer Laserscans

Bei flächenhaften Approximationen zur geometriebasierten Deformations- oder Formanalyse wird immer ein gewisses Maß an Modellwissen vorausgesetzt, mit dem das gescannte Objekt zu parametrisieren ist (vgl. Abschnitt 3.2.4). Liegen unbekannte Deformationen auf der Objektoberfläche vor, so ist das Modellwissen unvollständig [Holst & Kuhlmann, 2014b]. Dies gilt beispielsweise für die bereits in Abschnitt 1.1 eingeführte

Formuntersuchung des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg: Folgt die tatsächliche elevationsabhängige Deformation nicht der prognostizierten homologen Verformung, so liegen auf dem Hauptreflektor unbekannt flächenhafte Deformationen vor. Über diese Deformationen sind keine Vorinformationen vorhanden, weder über Größenordnungen, Positionen noch über mögliche Formen. Doch auch bei gewöhnlichen Formanalysen, bei denen nicht von relevanten Deformationen des abzutastenden Objektes auszugehen ist, ist das Modellwissen in Anbetracht der in der Punktwolke enthaltenen Information in vielen Fällen unvollständig. Denn das Modellwissen liegt beim Laserscanning bei fast jeder Anwendung kaum in dem Detailgrad vor, der auf Basis einer hochauflösenden Laserscannermessung erfasst werden kann.

Beide genannten Fälle führen dazu, dass die Konfiguration – auch hier wieder insbesondere die Punktverteilung – einen großen Einfluss auf die Parameterschätzung im GHM nach Abschnitt 3.3.2 und damit auf die gesamte Deformations- und Formanalyse und ihre Ergebnisinterpretationen hat [Holst et al., 2014a]. Das zeigen Veröffentlichung B4 [Holst & Kuhlmann, 2014b] für die zweidimensionale Simulation einer gescannten Linie, Veröffentlichung B5 [Holst et al., 2014a] für die dreidimensionale Simulation einer gescannten Ebene und Veröffentlichung B7 [Holst et al., 2015] für dreidimensionale reale Scans des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg².

Abb. 5.2 hat bereits die Redundanzanteile bei der Abtastung einer Ebene von zwei verschiedenen Laserscannerstandpunkten 1 und 3 gezeigt. Diese Redundanzanteile sind abhängig von der Messpunktverteilung, dem stochastischen Modell und der Objektgeometrie (siehe Abschnitt 3.4). Da die ersten beiden Faktoren abhängig von der Standpunktwahl sind, verändern sich auch die Redundanzanteile zwischen den beiden Standpunkten. Dies führt aufgrund des Einflusses der Konfiguration auf die Parameterschätzung einerseits und aufgrund der an vier Stellen deformierten Oberfläche (Abb. 5.6) andererseits auch zu signifikant anderen Schätzergebnissen. Diese Schätzergebnisse stellt Abb. 5.8 als Abweichungen von den Sollwerten in Abhängigkeit von fünf verschiedenen Laserscannerstandpunkten dar, aufgeteilt in Vertikalwinkel, Horizontalwinkel und Abstand der Ebene vom Koordinatenursprung. Es ist ersichtlich, dass die Schätzwerte verzerrt – also nicht um den Erwartungswert schwankend – und abhängig von der Konfiguration sind.

Diese Tatsache verlangt nach der bereits mehrfach erwähnten Optimierung der Konfiguration. Eine mögliche Strategie ist die beschriebene Punktausdünnung, also die Elimination von Punkten aufgrund der ungleichmäßigen Abtastung der Oberfläche. Dies zeigt auch Abb. 5.7, wo die Redundanzanteile nach der Punktausdünnung aufgetragen sind. Im Gegensatz zur Situation mit der ursprünglichen Punktverteilung (Abb. 5.2 links) ist der Einfluss der Objektgeometrie – durch den nicht mehr vorhandenen Einfluss der Punktverteilung – viel stärker geworden. Dieser ist unabhängig vom Standpunkt des Laserscanners. Einzig das stochastische Modell wirkt neben der Objektgeometrie noch auf die Konfiguration, was an der nicht ganz symmetrischen Verteilung der Redundanzanteile erkennbar ist. Durch diese Elimination des Einflusses der Punktverteilung auf die Parameterschätzung sind auch die Variationen der Parameterschätzungen in Abhängigkeit des Standpunktes nach der Punktausdünnung signifikant geringer geworden (siehe Abb. 5.8). Eine Punktausdünnung hilft also dabei, die Abhängigkeit der Parameterschätzung vom Standpunkt des Laserscanners zu verringern [Holst & Kuhlmann, 2014b; Holst et al., 2014a]. Die Verzerrung der Schätzung kann hingegen nicht behoben werden, da der Einfluss der deformierten Bereiche auf die Schätzung – wenn auch unabhängig vom Standpunkt – bestehen bleibt.

Neben dieser Punktausdünnung wird in Veröffentlichung B5 Holst et al. [2014a] ebenfalls untersucht, inwiefern die Einführung von Korrelationen räumlich benachbarter Messpunkte sowie die Balancierung des Ausgleichs auf die Konfiguration wirken. Die Einführung von Korrelationen basiert dabei auf der Integration von Korrelationsmatrizen [Koch, 1997], die Balancierung des Ausgleichs auf der Integration von Balancierungs-faktoren, anhand derer die Redundanzanteile homogenisiert werden [Linke, 2000]. Während die Einführung von Korrelationen zu Ergebnissen führt, die nur sehr gering von denjenigen der Punktausdünnung abweichen, führt die Balancierung des Ausgleichs zu einer noch größeren Abhängigkeit der Parameterschätzung vom Laserscannerstandpunkt. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Einfluss der Messpunktverteilung auf die Redundanzanteile durch die Balancierung des Ausgleichs eliminiert wird. Dies führt zu einer Verstärkung des Einflusses derjenigen Messpunkte, bei denen die Punktdichte am höchsten ist. Da die Position der höchsten Punktdichte auf der gescannten Ebene standpunktabhängig variiert, vergrößert sich auch die

²Die zugehörige Parametrisierung ist in Abschnitt 3.2.4 aufgeführt.

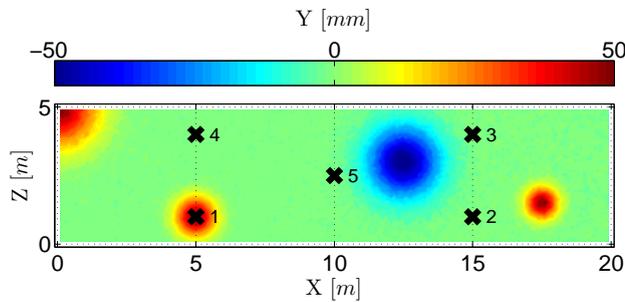


Abbildung 5.6: Deformationen auf der gescannten Ebene und Projektionen der fünf verschiedenen Standpunkte auf die Ebene.

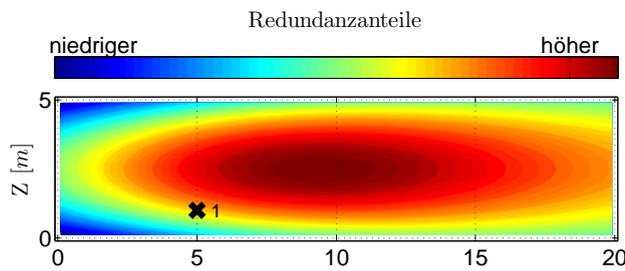


Abbildung 5.7: Redundanzanteile beim Scanning einer Ebene von Standpunkt 1 nach Punktausdünnung.

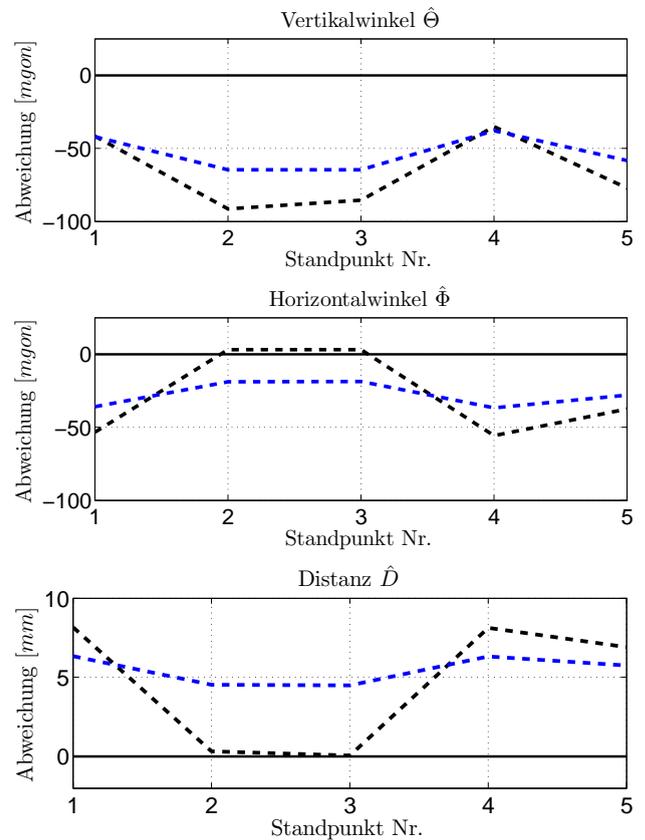


Abbildung 5.8: Abweichungen der Ebenenschätzungen von den Sollparametern in Abhängigkeit der verschiedenen Standpunkte (schwarz = ursprüngliche Abtastung, blau = nach Punktausdünnung).

standpunktabhängige Variation der geschätzten Ebenenparameter. Beide Aspekte (Einführung von Korrelationen, Balancierung des Ausgleichs) können in Holst et al. [2014a] anhand der Redundanzanteile belegt und analysiert werden.

Als weitere Alternative zur Optimierung der Konfiguration schlagen Holst et al. [2014a] robuste Ausgleichungen vor. Speziell wird gezeigt, dass sowohl die Verzerrung der Schätzung als auch die standpunktabhängige Variation auf Basis des Random Sample Consensus (RANSAC)-Algorithmus [Chum, 2005; Fischler & Bolles, 1981; Torr & Murray, 1997] oder des Bounded Influence by Standardized Residuals (BIBER)-Schätzers [Wicki, 1998, 2001] verringert werden kann. Im Falle des BIBER-Schätzers lassen sich die verbesserten Schätzwerte wieder anhand der Redundanzanteile erklären: Die unbekanntenen Deformationen werden als Ausreißer wahrgenommen. Da Ausreißer bei robusten Schätzungen generell weniger Gewicht erhalten, sind diese Schätzer also weniger sensitiv gegenüber den unbekanntenen Deformationen. Daher sind die Redundanzanteile der Messpunkte auf den deformierten Bereichen der Ebene sehr hoch, ihr Einfluss auf die Parameterschätzung ist also sehr gering.

Basierend auf diesen Ergebnissen könnte angenommen werden, dass eine robuste Schätzung die generell bessere Alternative zur Formanalyse bei nicht vollständig vorhandenem Modellwissen ist. Diese Annahme ist jedoch noch weiter zu prüfen, da die systematischen Residuen des Ausgleichs bei robusten Schätzungen als messbedingte Ausreißer angesehen werden. Denn robuste Schätzverfahren wurden zur Berücksichtigung messbedingter Ausreißer entwickelt. Bei der hier vorliegenden Anwendung resultieren die systematischen Residuen aber aus dem fehlenden Modellwissen (z.B. unbekanntene Deformationen), sie sind also modellbedingt. Ob diese Übertragung bei robusten Schätzern zielführend ist, müsste daher noch weiter untersucht werden.

Eine andere Möglichkeit zum besseren Umgang mit modellbedingten Abweichungen könnte die Integration von Modellunsicherheit in einer erweiterten Unsicherheitsmodellierung sein (siehe auch Abschnitt 6.4).

Die Erkenntnisse dieses Abschnittes sind wichtig für eine Vielzahl von Form- und Deformationsanalysen, die auf Basis von Laserscannermessungen durchgeführt werden: Unbekanntes Modellwissen, z.B. in Form von unbekanntenen Deformationen, wirkt sich standpunktabhängig auf die geometrischen Parameter der Form- oder Deformationsanalyse aus. Dies ist unmittelbar auf die hier ebenfalls besprochene Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg übertragbar, sodass im nächsten Abschnitt (Veröffentlichung B7, Holst et al. [2015]) eine erweiterte Deformationsuntersuchung vorgestellt wird. Aus dieser Erkenntnis folgt, dass die standpunktbedingte Konfiguration des Ausgleichs zu optimieren ist. Neben einem Eingriff in den Ausgleich selber (Einführung von Korrelationen, robuste Schätzungen) führt eine Punktausdünnung auf ein nahezu regelmäßiges Raster dazu, dass die standpunktabhängige Variation der Parameterschätzung zumindest verringert werden kann. Für die Praxis bedeuten diese Erkenntnisse, dass auch bei laserscannerbasierten Form- und Deformationsuntersuchungen identische Standpunkte besetzt werden sollten. Dies gilt insbesondere, falls die Ergebnisse mehrerer Epochen miteinander zu vergleichen sind oder absolute Parameterwerte von Interesse sind. Diese Ergebnisse sind ferner übertragbar auf andere zwar flächenhaft, aber ungleichmäßig abtastende Sensoren.

5.4 Weiterentwicklung bestehender Konzepte zur scannerbasierten Deformationsuntersuchung

Der Hauptreflektor des Radioteleskops Effelsberg wurde im Jahr 2010 (Veröffentlichung B2, Holst et al. [2012]) sowie im Jahr 2013 (Veröffentlichung B7, Holst et al. [2015]) in sieben verschiedenen Elevationsstellungen abgetastet, um Aussagen über das gravitationsbedingte Deformationsverhalten treffen zu können. Bei der anschließenden Auswertung wurden die Erkenntnisse der bisherigen Konfigurationsanalysen, die sowohl auf Nivellements (Veröffentlichung A3, Holst et al. [2013c]) als auch auf Laserscans (Veröffentlichung B5, Holst et al. [2014a]) basieren, verwendet, um die auswertetechnischen Konzepte zur flächenhaften Deformationsanalyse weiterzuentwickeln. Diese Weiterentwicklungen – dargelegt in den Veröffentlichungen B6 und B7 [Holst & Kuhlmann, 2014a; Holst et al., 2015] – betreffen neben der vielfach besprochenen Punktausdünnung zur Generierung einer gleichmäßigen Abtastung der Oberfläche die Einbindung detaillierten Modellwissens und die Scannerkalibrierung. Gerade die Schritte der Punktausdünnung sowie der Scannerkalibrierung bleiben in bisherigen flächenhaften, scannerbasierten Deformationsanalysen und Flächenapproximationen meist unberücksichtigt (siehe auch Kapitel 2).

Punktausdünnung

Den Ausführungen des vorherigen Abschnitts folgend, ist eine Punktausdünnung immer dann erforderlich, wenn bei einer Deformationsanalyse verschiedene Standpunkte besetzt werden. Ohne eine gleichmäßige Punktverteilung lägen ansonsten schon unterschiedliche Schätzergebnisse bei der Deformationsanalyse aufgrund der verschiedenen Standpunkte vor, ohne das tatsächlich variierende Deformationen vorhanden wären. Dies gilt es durch eine Punktausdünnung zu verhindern. Analog verhält sich die Situation, wenn sich zwar nicht der Standpunkt zwischen den verschiedenen Scans ändert, wohl aber die Position der deformierten Bereiche.

Dies kann für die Deformationsanalyse des Radioteleskops aus dem Jahr 2010 mit den Abb. 5.9–5.10 gezeigt werden [Holst et al., 2015]. Abb. 5.9 (links) zeigt die ursprüngliche Punktverteilung beim Scan des Hauptreflektors (vgl. auch Abb. 1.1). Diese ist ungleichmäßig und stark auf den Innenbereich des Hauptreflektors konzentriert. Wie aber aus Abb. 5.3 und der dort dargestellten Konfiguration des Ausgleichs bereits bekannt, sind es die Außenbereiche des Hauptreflektors, die die Brennweitenschätzung fixieren. Mit Hilfe einer Punktausdünnung zur Herstellung einer nahezu gleichmäßigen Abtastung der Oberfläche kann die Punktverteilung homogenisiert werden (Abb. 5.9 rechts). Dies führt aufgrund lokaler Deformationen, deren Positionen und

Ausprägungen zwischen den Elevationsstellungen variieren, zu anderen Brennweitenschätzungen (Abb. 5.10) [Holst et al., 2015; Nothnagel et al., 2013].

Aus dieser Betrachtung folgt, dass der Schritt der Punktausdünnung als eine mögliche Variante³ der Konfigurationsoptimierung essentiell ist, um aussagekräftige Deformations- und Formanalysen durchführen zu können. Denn wie bereits mehrfach erwähnt, ist das Modellwissen bei fast allen Anwendungen limitiert gegenüber der detaillierten Abtastung der Oberfläche.

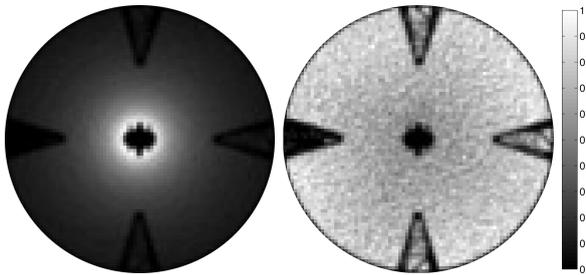


Abbildung 5.9: Relative Punktdichte beim Scan des Radioteleskops Effelsberg bei einer Elevationsstellung von 90° (links = ursprüngliche Abtastung, rechts = nach Punktausdünnung, jeweils Messungen aus dem Jahr 2010).

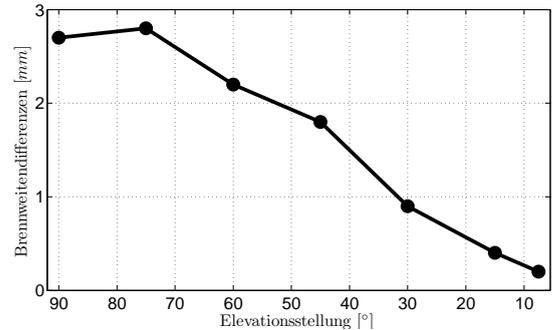


Abbildung 5.10: Differenzen der geschätzten Brennweiten beim Radioteleskop Effelsberg zwischen ursprünglicher Abtastung und ausgedünnter Punktwolke (Jahr 2010).

Einbindung detaillierten Modellwissens

Das Modellwissen über den Hauptreflektor des Radioteleskops Effelsberg beschränkt sich nicht nur auf die Kenntnis der Gesamtform (Rotationsparaboloid). Vielmehr sind auch Kenntnisse über die detaillierte Struktur vorhanden. Diese besagen, dass der Hauptreflektor aus mehr als 2000 einzelnen Paneelen zusammengesetzt ist. Durch eine geeignete Objektsegmentierung ist eine exakte Trennung zwischen der Oberfläche und den Zwischenräumen, dem Hintergrund, möglich. Zwischen den einzelnen Paneelen liegen Spalten von wenigen Zentimetern, die breit genug für das Durchschießen von Laserstrahlen sind (Abb. 5.11). Eine Vernachlässigung dieser Segmentierung würde zu absolut gesehen großen Residuen⁴ mit systematischer Verteilung führen, wie Abb. 5.12 zeigt.

Diese systematischen Residuen würden bei einer Vernachlässigung der Segmentierung einerseits zu einer fehleranfälligen Interpretation führen. Andererseits wären auch die Schätzwerte der Formanalyse selber wieder abhängig von dem nur beschränkt integrierten Modellwissen. Denn diese systematisch verteilten Residuen wirken auf den Ausgleich genauso wie unbekannte Deformationen. Deren Einfluss auf die Parameterschätzung wurde bereits an mehreren Stellen diskutiert (siehe Abschnitt 5.3).

Scannerkalibrierung

Terrestrische Laserscanner sind – wie jedes andere Instrument auch – nur bis zu einer gewissen Genauigkeit gefertigt. Zusätzlich kann es innerhalb des Scanners temperatur-, alters- oder unfallbedingt zu geometrischen Veränderungen der einzelnen Distanz- oder Strahlableitungskomponenten kommen. Dies gleicht systematischen, scannerinternen Abweichungen. Diese führen zu systematischen Effekten in der Punktwolke der abgetasteten Oberfläche [Holst et al., 2014d]. Abb. 5.13 (links) zeigt dies für die geschätzten Residuen vom Ausgleich bei einer Elevationsstellung des Radioteleskops von 75°.

³Die anderen möglichen Varianten, z.B. auch robuste Schätzungen, wurden im vorherigen Abschnitt 5.3 diskutiert.

⁴Diese Residuen und auch alle folgend erwähnten Residuen stellen die im Ausgleich geschätzten Abweichungen zwischen geschätztem Modell und den originären Messpunkten dar. Dies gleicht nach erfolgreichem Ausgleich sowohl den substituierten Verbesserungen $\hat{\mathbf{v}}$ aus Gl. (3.28) als auch den Widersprüchen $\hat{\mathbf{w}}$ aus Gl. (3.22).

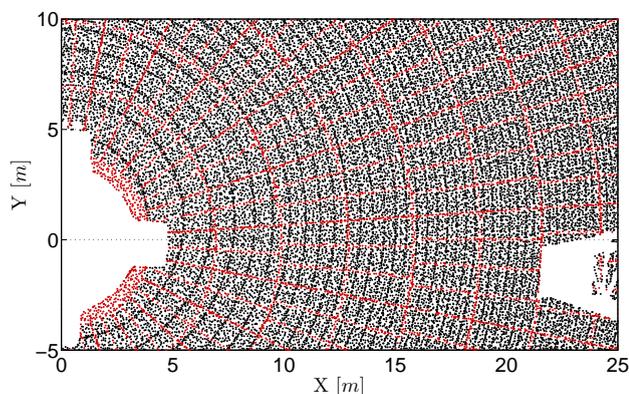


Abbildung 5.11: Segmentierung des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg (schwarze Punkte = innerhalb einzelner Paneele, rote Punkte = Zwischenräume).

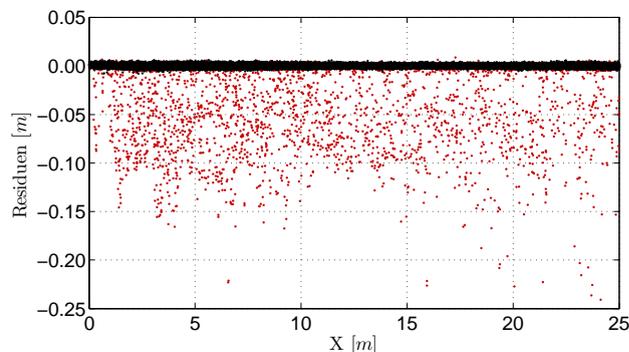


Abbildung 5.12: Klassifizierung der Residuen vom Ausgleich nach ihrer Position (schwarz = innerhalb Paneel, rot = zwischen Paneelen).

Diese scannerinternen Effekte können durch eine geeignete Rückwärtsmodellierung, also der Mitschätzung entsprechender Kalibrierparameter, eliminiert werden [Holst et al., 2015], wie auch Abb. 5.13 (rechts) zeigt. Dafür sind Kalibrierparameter anzusetzen und deren Auswirkung auf die Scannermessung zu modellieren. Hierfür eignet sich eine tachymetrische Modellierung der Scannerabweichungen, z.B. nach Lichti et al. [2000, 2011]; Lichti [2007, 2010], nur bedingt [Holst & Kuhlmann, 2014a]. Es gelingt mit dieser tachymetrischen Modellierung zwar eine Eliminierung der systematischen Effekte durch die Integration von Modellwissen – wie auch der Vergleich zwischen Abb. 5.13 (rechts) mit 5.13 (links) zeigt –, die Kalibrierparameter sind aber nicht konstant unter Berücksichtigung ihrer Standardabweichungen. Somit sind die Kalibrierparameter auch nicht geometrisch interpretierbar [Holst & Kuhlmann, 2014a]. Daher sind zur geeigneten Kalibrierung eines terrestrischen Laserscanners noch weitere Schritte nötig. Hierfür ist nach Holst et al. [2014d] eine geeignete Vorwärtsmodellierung – von möglichen geometrischen Miskonstruktionen des Scanners hin zu den resultierenden Effekten in der Punktwolke – vorzunehmen. Erste Schritte in Anlehnung an Gordon [2008] zeigt Holst et al. [2014d] auf. Dieser Aspekt wird auch in Abschnitt 6.2 wieder aufgegriffen.

Unabhängig von den nicht geometrisch interpretierbaren Kalibrierparametern gelingt durch die Kalibrierung mit tachymetrischem Kalibriermodell eine Trennung zwischen systematischen Abweichungen des Scanners und tatsächlichen Deformationen. Das führt auf die in Abb. 5.13 (rechts) gezeigten Residuen, aus denen sich Deformationen abschätzen lassen. Dies gelingt noch besser durch die weitere Integration des Modellwissens: Da der Hauptreflektor aus einzelnen Paneelen besteht, können mittlere Residuen pro Paneel berechnet werden, die deformierte Bereiche und falsch ausgerichtete Paneele noch klarer herausstellen (Abb. 5.14). Erst nach diesem Schritt ist die Deutlichkeit, mit der vier Paneele falsch ausgerichtet sind, zu erkennen. Außerdem werden weitere großflächigere Deformationen aufgedeckt. Den Gewinn durch die Kalibrierung zeigt neben Abb. 5.14 auch Abb. 5.15: Die geschätzte Brennweite ohne Mitschätzung der Kalibrierparameter zeigt ungewöhnliche Variationen. Diese sind den nichtmodellierten systematischen Abweichungen des Scanners zuzuordnen, wie der Vergleich mit der Schätzung der Brennweite bei Modellierung der systematischen Abweichungen des Scanners zeigt.

Aus diesen verschiedenen Vergleichen wird deutlich, dass die Deformationsanalyse ohne eine geeignete Punktausdünnung, Einbindung detaillierten Modellwissens sowie Scannerkalibrierung nicht zu diesen eindeutigen Ergebnissen geführt hätte. Dies gilt sowohl für globale Deformationen – die Brennweitenvariationen – als auch lokale Deformationen – Abweichungen einzelner oder mehrerer Paneelen. Diese methodischen Erkenntnisse sind verallgemeinerbar und damit auf andere oberflächenbasierte Approximationen auf Basis von terrestrischen Laserscannern übertragbar.

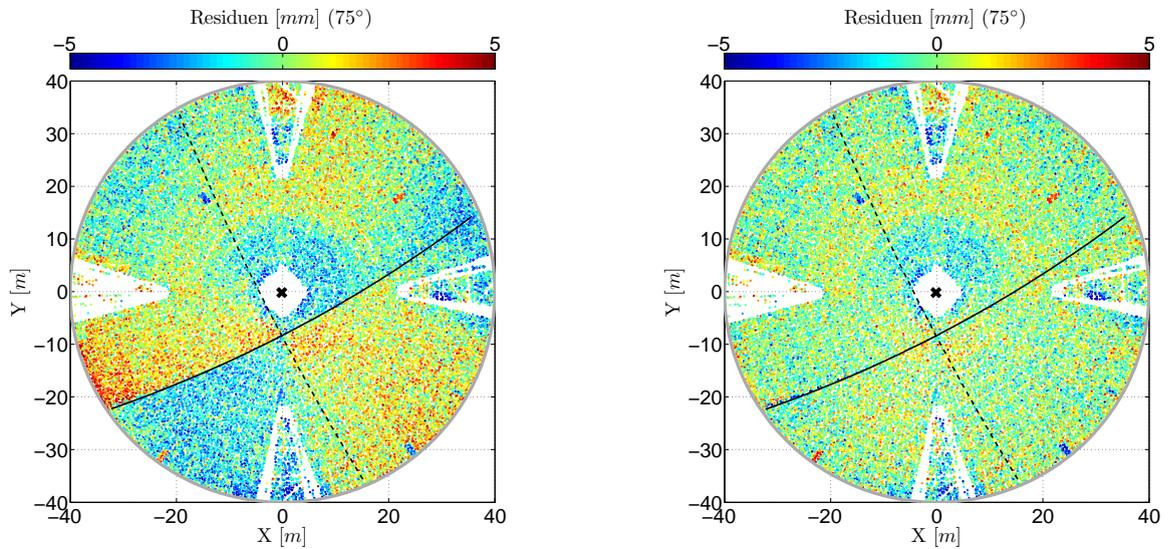


Abbildung 5.13: Geschätzte Residuen zwischen Messpunkten und approximierter Oberfläche bei der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg (Elevationsstellung 75° , links = vor Scannerkalibrierung, rechts = nach Scannerkalibrierung).

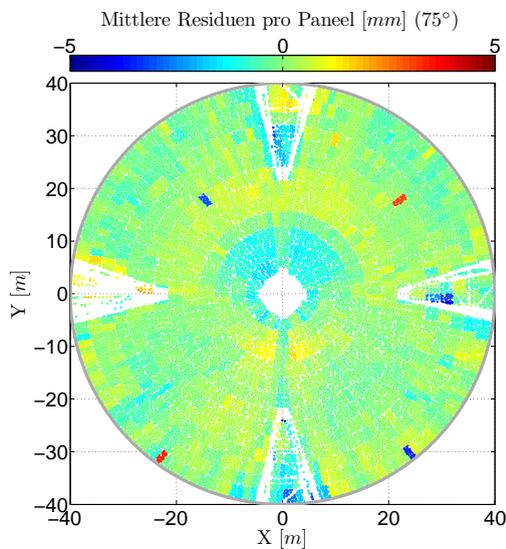


Abbildung 5.14: Paneelenweise Mittlung der geschätzten Residuen zwischen Messpunkten und approximierter Oberfläche bei der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg (Elevationsstellung 75° , nach Scannerkalibrierung).

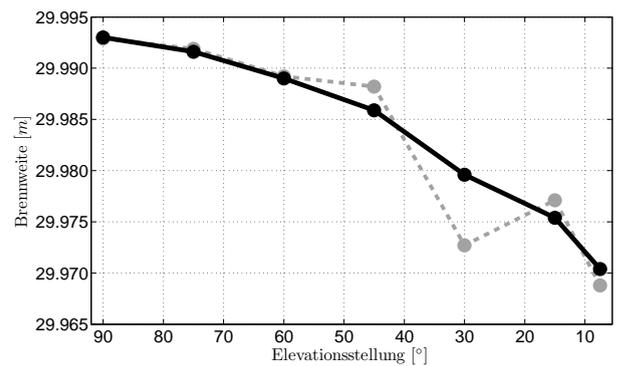


Abbildung 5.15: Geschätzte Brennweite des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg (grau = vor Scannerkalibrierung, schwarz = nach Scannerkalibrierung).

6. Einbettung der Untersuchungen in weiterführende Überlegungen

Die bisherigen Ausführungen und auch der Schwerpunkt der Dissertation beruhen auf der Konfigurationsanalyse bei der Approximation von Oberflächen, die mit Hilfe von Nivellements oder terrestrischen Laserscans ungleichmäßig abgetastet wurden. Hierbei basiert die Approximation auf dem GHM oder GMM (siehe Abschnitt 3.3) und die Konfigurationsanalyse auf den Redundanzanteilen bzw. den Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 3.4). Davon abweichende Möglichkeiten werden in Abschnitt 6.1 aufgezeigt.

Gerade hinsichtlich des terrestrischen Laserscannings sind zudem weiterführende Überlegungen anzustellen, sowohl die Messtechnik als auch die flächenhafte Modellierung betreffend. Auf Seiten der Messtechnik gilt es, Ansätze zur Bestimmung und Berücksichtigung systematischer Abweichungen terrestrischer Laserscans zu entwickeln (Abschnitt 6.2). Auf Seiten der Modellierung muss das Ziel sein, die Transformation von Messungen signalisierter Einzelpunkte hin zu Messungen einer Vielzahl willkürlich verteilter Scanpunkte auch modellmäßig geeigneter berücksichtigen zu können. Dies beinhaltet Überlegungen zu parametrischen Flächenmodellierungen (Abschnitt 6.3), einer erweiterten Unsicherheitsmodellierung (Abschnitt 6.4) sowie Semantik der Punktwolke (Abschnitt 6.5). Ferner stellt Abschnitt 6.6 Ideen zur Überführung der bisherigen Ansätze auf terrestrische Laserscans natürlicher Oberflächen dar.

Das vorliegende Kapitel soll die Untersuchungen, die im Rahmen der Dissertation angefertigt wurden, gegenüber diesen anderen Ansätzen abgrenzen und Verknüpfungspunkte aufzeigen. Auf diese Weise könnten die eigenen Arbeiten in weiterführende Untersuchungen integriert und weiterverwendet werden. Diese Überlegungen werden im abschließenden Fazit wieder aufgegriffen.

6.1 Approximation und Konfigurationsanalyse

Alternative Kenngrößen zur Konfigurationsanalyse

Die bisherigen Analysen der Konfiguration basieren auf den Redundanzanteilen. Diese sind ein Maß für die innere Zuverlässigkeit eines Ausgleichs [Förstner, 1987; Niemeier, 2008]. Daneben existieren weitere Kriterien, z.B. die minimal aufdeckbaren Ausreißer [Niemeier, 2008, S. 294 ff.], deren Aussagekraft bzgl. der vorliegenden Aufgabenstellung noch verifiziert werden könnte. Des Weiteren bietet die Sensitivitätsanalyse eine Untersuchung der Empfindlichkeit der geschätzten Parameter der Approximation in Anbetracht von Störungen oder Abweichungen in den Beobachtungen [Heunecke et al., 2013, S. 251 ff.]. Auch Förstner & Wrobel [2015] untersuchen den Effekt systematischer Messabweichungen und grober Fehler auf die Ausgleichung. So werden neben Redundanzanteilen z.B. auch Sensitivitätsfaktoren benannt, die den maximalen Einfluss des Messdesigns – also der Konfiguration – auf die geschätzten Parameter angeben. Diese beinhalten die Redundanzanteile. Außerdem wird der maximale Einfluss unentdeckter systematischer Abweichungen auf die Parameter validiert [Förstner & Wrobel, 2015]. Eine Untersuchung hinsichtlich der Eignung dieser Faktoren für die vorliegende Aufgabenstellung liegt daher nahe.

Vennebusch [2007]; Vennebusch et al. [2009]; Leek [2015] berechnen den Einfluss von Beobachtungen auf die Parameterschätzung für Anwendungen in der VLBI. Zur Betrachtung des Einflusses der Beobachtungen nur auf ausgewählte Parameter werden die übrigen Parameter mathematisch eliminiert. Eine Übertragung dieser Vorgehensweise auf die vorliegende Aufgabenstellung würde es ermöglichen, die Konfiguration für verschiedene Parameter getrennt zu analysieren. Dies könnte für manche Anwendungen, z.B. für die bereits erwähnte Scannerkalibrierung, nützlich sein (siehe auch Abschnitt 6.2). Daher sind auch hier weiterführende Untersuchungen sinnvoll.

Flächenapproximation mit der Orthogonalen Distanzregression

Die vorgestellte Flächenapproximation baut auf dem nichtlinearen GHM auf. Dieses minimiert die Verbesserungen $\mathbf{v}_j = [v_s, v_\beta, v_t]_j^T$ zwischen den Polarbeobachtungen $\mathbf{l}_j = [s, \beta, t]_j^T$ und dem geschätzten Modell, ausgedrückt durch die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{p}}$ (siehe Abschnitt 3.3). Die Minimierung der Verbesserungen wird dabei implizit durchgeführt, d.h. die Verbesserungen folgen aus den linearisierten Normalgleichungen (siehe Abschnitt 3.3.2). Diese Minimierung findet im Beobachtungsraum der ursprünglich gemessenen Polarelemente statt.

Während dieses GHM in der Geodäsie das Standardmodell zur Lösung diesbezüglicher Gleichungssysteme ist [Niemeier, 2008; Mikhail & Ackermann, 1976; Koch, 1997; Wolf, 1968], wird in den Fachrichtungen der Mathematik und Informatik oft auf die Orthogonale Distanzregression (ODR) zurückgegriffen [Helfrich & Zwick, 1993, 1995, 1996; Ahn et al., 2001, 2002; Ahn, 2008; Rouhani & Sappa, 2009; Sampson, 1982]. Nur vereinzelt – z.B. in Niemeier [2008, S. 399 ff.] und in Holst et al. [2012] – wird die ODR in geodätischer Fachliteratur erwähnt. Diese unterscheidet sich hauptsächlich in zwei Aspekten vom GHM:

- Die Minimierung findet im kartesischen Koordinatenraum statt, d.h. die Koordinaten $\mathbf{x}_j = [x, y, z]_j^T$ dienen nach polarem Anhängen mit Gl. (3.8) als Beobachtungen des Ausgleichs.
- Die Verbesserungen werden explizit berechnet und minimiert. Dafür werden sogenannte Fußpunkte einer jeden, gemessenen Koordinate auf dem Zielobjekt berechnet und der Abstand zwischen Messpunkt und Fußpunkt gleicht der Verbesserung $\mathbf{v}_j = [v_x, v_y, v_z]_j^T$.

Der Verbesserungsvektor \mathbf{v}_j eines Punktes \mathbf{x}_j steht dabei immer lotrecht auf der Modellfläche, weshalb dieser Ansatz in seiner ursprünglichen Form nur orthogonale Abstände minimiert. Ein stochastisches Modell abweichend von einer (skalierten) Einheitsmatrix bleibt somit bei der Minimierung unberücksichtigt. Aus diesem Grund minimiert die Generalisierte Orthogonale Distanzregression (GODR) die generalisierten orthogonalen Abstände, was einer Minimierung im Sinne des stochastischen Modells gleicht [Forbes, 2006a,b].

Erste Untersuchungen aus Diehl [2013] zeigen, dass beide Verfahren ineinander überführbar sind. Demnach gleichen sich sowohl die Parameterschätzungen als auch ihre Standardabweichungen im Rahmen der Rechnergenauigkeit. Es bleibt allerdings noch durch weitere Verifikationen herauszufinden, ob bei der GODR Vorteile aufgrund der expliziten Formulierung der Verbesserungen bestehen. Dies könnte z.B. für das Vorliegen von Ausreißern gelten, wo eine implizite Linearisierung zur Berechnung der Verbesserungen im GHM unter Umständen keine gute Approximation darstellt.

6.2 Stochastisches Modell terrestrischer Laserscans

Kalibrierung terrestrischer Laserscanner

Die Zielvorstellung bei einer Kalibrierung ist die qualitative und quantitative Analyse scannerbedingter Abweichungen. Diese Kalibrierung beinhaltet dabei immer zwei Teilaspekte: Zum einen die Entwicklung geeigneter Kalibrierfelder, die eine messtechnische Bestimmung der Kalibrierparameter ermöglichen. Zum anderen die Aufstellung von Kalibrierfunktionen, die (geometrische) Ursachen und resultierende systematische Effekte funktional in Beziehung setzen. Im Bezug zur Kalibrierung von Tachymetern hat sich dort einerseits die Strategie der 2-Lagen-Messung etabliert, die die Bestimmung und Elimination instrumentenbedingter Messabweichungen erlaubt. Andererseits sind die funktionalen Beziehungen z.B. zwischen einer Zielachsabweichung und der daraus resultierenden systematischen Abweichung in der Horizontalrichtung seit vielen Jahrzehnten bekannt [Deumlich & Staiger, 2002; Stahlberg, 1997]. Beim Laserscanning hingegen stehen beide Schritte noch aus. Die Schwierigkeit hierbei ist, dass dem Anwender die genaue Konstruktion und die Vorverarbeitungsschritte innerhalb der Laserscanner verborgen bleiben und von den Instrumentenherstellern nur begrenzt kommuniziert werden (z.B. in Tuexsen [2014]), weshalb der Laserscanner teilweise auch als Black-Box bezeichnet wird [Walser & Gordon, 2013].

Bisherige Ansätze zur Kalibrierung terrestrischer Laserscanner bauen entweder auf einer Komponentenkalibrierung [Wunderlich et al., 2013; Tuexsen, 2014; Dorninger et al., 2008; Linstaedt et al., 2012; Kaasalainen et al., 2009] oder einer Systemkalibrierung [Reshetyuk, 2009, 2006; Lichti et al., 2011; Schulz, 2007] auf. Systemkalibrierungen basieren auf der Approximation von Zielzeichen oder Ebenen [Rietdorf, 2005; Gordon, 2008; Bae & Lichti, 2007; Gielsdorf et al., 2004] von verschiedenen Standpunkten aus, sodass die verschiedenen Parameter dieser Ersatzobjekte durch eine Koordinatentransformation miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Die systematischen Restklaffungen dieser Koordinatentransformation können als Kalibrierparameter parametrisiert und geschätzt werden [Rietdorf, 2005; Gordon, 2008; García-San-Miguel & Lerma, 2013; Lichti et al., 2011; Reshetyuk, 2006]. Die Wahl von Zielzeichen einerseits oder Ebenen andererseits [Chow et al., 2011, 2012, 2013], sowie die geometrische Anordnung der Objekte, wird dabei stets diskutiert, um niedrige Standardabweichungen und niedrige Korrelationen zwischen den Parametern zu gewährleisten [Lichti et al., 2011; Lichti, 2010; Reshetyuk, 2010]. Eine abschließende Verifizierung der verschiedenen Kalibrierfelder steht noch aus, sodass hier zukünftig weitere Untersuchungen folgen müssen. Dies hängt auch damit zusammen, dass die optimale Konfiguration nur gefunden werden kann, wenn zuvor geeignete Kalibrierfunktionen ermittelt wurden, da diese die Konfiguration des Ausgleichs wesentlich mit beeinflussen.

Für diese Kalibrierfunktionen wird meistens unterstellt, dass das Kalibriermodell dem eines Tachymeters gleicht [Lichti, 2007; Schneider & Schwalbe, 2008; Lichti, 2009], sodass als Kalibrierparameter gewöhnliche systematische Tachymeterabweichungen [Deumlich & Staiger, 2002], z.B. Additionskonstanten, Zielachs- und Kippachsabweichungen, angesetzt werden [Schneider, 2009; Abbas et al., 2014; Kern & Huxhagen, 2008; Kern, 2008]. Nur in Einzelfällen wird dieses Modell hinterfragt und ein scannerspezifisches entwickelt [Gordon, 2008; Rietdorf, 2005]. Dies ist aber nötig, da signifikante Unterschiede zwischen der Konstruktion eines Tachymeters und der eines Laserscanners vorliegen [Holst et al., 2014d].

In Holst & Kuhlmann [2014a] werden erste Untersuchungen vorgenommen, einen Laserscanner auf Basis eines einzelnen Objektes mit nur einem Scan zu kalibrieren (siehe Veröffentlichung B6 und Abschnitt 5.4). Dieser Ansatz scheint zwar erfolgversprechend zu sein; eine geometrisch interpretierbare Kalibrierung gelingt aber bisher nicht. Dies ist zum einen mit der Nutzung eines Tachymetermodells zur Kalibrierung zu begründen, zum anderen mit der ungünstigen Konfiguration des Ausgleichs, analysiert anhand von Redundanzanteilen, Standardabweichungen und Korrelationen zwischen den Parametern. Daher muss in Zukunft ein funktionales Modell zur Vorwärtsmodellierung möglicher systematischer, scannerinterner Abweichungen aufgestellt werden, das unabhängig von demjenigen eines Tachymeters ist. Erste Ansätze sind in Holst et al. [2014d] zu finden. Außerdem gilt es, die Konfiguration des Ausgleichs durch verschiedene Maßnahmen zu verbessern.

Berücksichtigung räumlicher Korrelationen

Beim stochastischen Modell terrestrischer Laserscans wird meistens eine Hauptdiagonalmatrix angenommen (siehe Gl. 3.9). Daher werden durch variierende Hauptdiagonalelemente zwar unterschiedliche Genauigkeiten für Winkel und Strecke angenommen, Korrelationen bleiben aber unberücksichtigt. Dies gilt sowohl innerhalb der Polarelemente s, β, t eines Punktes als auch zwischen den Polarelementen verschiedener Punkte. Diese Modellierung stellt die Realität nur unvollkommen dar, da zwischen Messpunkten aufgrund von Einfallswinkel, Oberflächeneigenschaften, atmosphärischen Bedingungen und weiteren Faktoren zwangsweise Korrelationen existieren. Durch eine Vernachlässigung dieser Korrelationen ergeben sich in der Approximation von Oberflächen Standardabweichungen geschätzter Parameter, die eindeutig zu optimistisch sind [Holst et al., 2012, 2014c; Holst & Kuhlmann, 2014a].

Diese Korrelationen konnten in einzelnen Testmessungen schon nachvollzogen werden [Koch & Kuhlmann, 2009; Koch et al., 2010]. Strategien zur generellen Abschätzung von Korrelationen sind allerdings noch nicht greifbar. Diese sind aber nötig, um den Einfluss räumlicher Korrelationen auf die Parameterschätzung besser abschätzen und modellieren zu können. Zukünftig gilt es für terrestrische Laserscans z.B. die effektive Messwertanzahl [Heunecke et al., 2013, S. 346], die die Anzahl unkorrelierter Messpunkte im Gegensatz zur Anzahl aller Messpunkte angibt, zu bestimmen. Dies hat auch beim Global Positioning System (GPS) zum besseren Verständnis des stochastischen Modells geführt [Kuhlmann, 2001, 2003].

6.3 Anforderungen an parametrische Flächenmodellierungen

Bisher ist nur teilweise angeklungen, dass die Transformation von der punktweisen Messung – z.B. auf Basis eines Tachymeters – hin zur flächenhaften Messung auf Basis eines terrestrischen Laserscanners zwar messtechnisch vollzogen ist, von Modellseite aber noch großes Entwicklungspotential vorhanden ist. Dies kann anhand der folgenden Aspekte, die nur einen kurzen Überblick über nötige Weiterentwicklungen aufzeigen, diskutiert werden:

- Abschnitt 3.2.4 erläutert in wenigen Worten die Möglichkeiten oberflächen-, geometrie- und parameterbasierter Ansätze zur Beschreibung von Oberflächen. Nur bei parameterbasierten Ansätzen wird dabei ein Bezug zwischen den Parametern und der Fläche hergestellt, wie auch das Beispiel der Deformationsanalyse am Radioteleskop Effelsberg zeigt (siehe Abschnitte 3.2.4 und 5.4). Die Verwendung parameterbasierter Modellierungen beschränkt sich momentan allerdings noch auf Objekte, die mit Hilfe geometrischer Primitive oder anderen einfachen Flächenmodellierungen zur parametrisieren sind. Bei komplexeren Objekten müssten Freiformflächen, z.B. NURBS, herangezogen werden. Da hier aber bisher kein Bezug zwischen einzelnen Parametern und ihrem Einfluss auf die Formbildung hergestellt wird, werden diese momentan ausschließlich bei oberflächenbasierten Ansätzen eingesetzt. Hier besteht der Nachteil, dass die oberflächenbeschreibenden Parameter nicht interpretiert werden; sie dienen nur zur Modellentwicklung. Diese Lücke ist zu schließen, um einerseits flexible Flächenmodelle bei der Auswertung verwenden zu können und um andererseits parametrische Aussagen auf Basis dieser Flächenmodelle treffen zu können.
- Flächenhafte Abweichungen von Modellen oder geometrischen Formen werden weiterhin nur messpunktweise – und damit nicht im eigentlichen Sinne flächenhaft – oder durch räumlich beschränkte Parametrisierungen analysiert. Dies zeigt auch das Beispiel der Deformationsanalyse am Radioteleskop Effelsberg (siehe Abschnitt 5.4). Eine flächenkontinuierliche Modellierung zur Beschreibung von Deformationen insbesondere unter Angabe realistischer Genauigkeiten zur Durchführung eines Kongruenztests – wäre hier sehr hilfreich.
- Die Ergebnisse der Flächenmodellierung hängen sehr stark von der a priori Annahme über das funktionale Modell ab. Das stochastische Modell wird im Gegensatz dazu bisher kaum berücksichtigt. Dies ist zwar gut, solange das stochastische Modell – wie bereits in Abschnitt 6.2 beschrieben – noch nicht ausreichend genau bekannt ist. Spätestens bei einer realitätsnäheren Beschreibung des stochastischen Modells inklusive vorhandener Korrelationen sollte es bei der Modellierung aber stärker berücksichtigt werden, da auch die Stochastik formrelevante Informationen für die Flächenmodellierung enthält. Ein Ansatz zur Steigerung dieses Einfluss könnte die Kollokation sein. Erste Ideen sind bei Harmening & Neuner [2014] zu finden.

Diese Ausführungen sollen verdeutlichen, dass gerade bei der flächenhaften Modellierung noch einige Schritte zu gehen sind, bevor die beim Laserscanning flächenhaft vorliegende Punktinformation auch modellmäßig ausreichend genutzt werden kann. Hier hängen die verwendeten Methoden an vielen Stellen noch zu sehr von der bisher bekannten Modellierung von Einzelpunkten und den auf Basis dieser Einzelmessungen getroffenen Aussagen ab.

6.4 Erweiterte Unsicherheitsmodellierung

Bei der flächenhaften Modellierung muss immer eine Annahme über das Objektmodell getroffen werden. Bei manchen Anwendungen ist dieses Modellwissen relativ detailliert, wenn z.B. bekannt ist, dass sich der Hauptreflektor eines Radioteleskops als Rotationsparaboloid parametrisieren lässt (siehe auch Abschnitt 5.4). Dies gilt auch, wenn das 3D-Modell eines Hauses mit viereckigem Grundriss auf Basis von Laserscans erstellt werden soll. Wiederum bei anderen Anwendungen ist das Modellwissen relativ vage, wenn z.B. Kirchengewölbe unbekannter Form parametrisiert werden sollen [Harmening & Neuner, 2014]. Unabhängig von der

Detailtiefe dieses Modellwissens ist aber, dass das Objekt nur in den seltensten Fällen exakt modelliert werden kann. Daher ist das Objektmodell auch immer mit Unsicherheit behaftet, wie in der vorliegenden Dissertation schon mehrfach thematisiert wurde (siehe insbesondere Kapitel 2 und Abschnitte 5.3 und 5.4). Bisherige Ausführungen zur Unsicherheitsmodellierung beschränken sich aber nur auf messtechnische Aspekte, die scannerintern und -extern auf die Messung wirken. Daher sind diese Betrachtungen um die Aspekte der Modellunsicherheit in Form einer erweiterten Unsicherheitsmodellierung zu ergänzen.

Während das Messmodell aufgrund vernachlässigter Korrelationen und potentieller systematischer, scannerinterner Abweichungen mit Unsicherheit behaftet ist, gilt dies beim Objektmodell aufgrund von Unschärfe und Unvollständigkeit. Diese Unterteilungen wurden erstmals von Kutterer [1994, 2002] und folgend von Schön [2003]; Neumann & Kutterer [2006]; Neumann [2009] für die Parameterschätzung unter Beachtung verschiedener Arten von Messunsicherheiten eingeführt¹. Übertragen auf eine Modellunsicherheit bei der Flächenmodellierung würde die Unschärfe die unsichere Erkenntnis über die Wirklichkeit, die Unvollständigkeit die generalisierende Parametrisierung des Objekts bezeichnen. Zum ersten Aspekt zählen unbekannte Deformationen, zum zweiten bei der Modellierung vernachlässigte Objektdetails.

Beim Scan eines Hauses und der anschließenden Erstellung eines 3D-Modells könnte Unschärfe daher bedeuten, dass die Häuserwände bei der Flächenmodellierung als eben angenommen werden, diese in Wahrheit aber an mehreren Stellen unbekannte Krümmungen aufweisen. Unvollständigkeit könnte bedeuten, dass die Wände aus einzelnen Klinkersteinen bestehen, diese Tatsache bei der Approximation einer generalisierenden Ebene aber nicht berücksichtigt wird. Beide Arten der Modellunsicherheit wirken systematisch auf die Parameterschätzung und führen daher zu den mehrfach beschriebenen verzerrten Parameterschätzungen bei der Deformations- oder Formanalyse, jeweils interpretierbar auf Basis der vorgestellten Konfigurationsanalysen (Abschnitte 5.1 und 5.3).

Unter der Annahme, dass diese beiden Modellunsicherheiten vorhanden sind, sind die aus der Parameterschätzung resultierenden Genauigkeiten zu optimistisch. Durch die Einführung von Modellunsicherheiten in die Parameterschätzung könnte allerdings Abhilfe geschaffen werden. Diese Modellunsicherheiten sind dann getrennt von zufälligen Messunsicherheiten in die Ausgleichung zu integrieren. Dies ist über die Intervallmathematik [Kutterer, 1994; Schön, 2003] oder die Fuzzy-Theorie [Neumann, 2009] anstelle der kQS möglich. Hier werden jeweils lineare Varianzfortpflanzungen durchgeführt, die nicht zu einer Überschätzung der Genauigkeit führen. Als Resultat werden neben den Parametern Intervallradien (Intervallmathematik) oder Spreizungen (Fuzzy-Theorie) berechnet, die im zwei- bzw. dreidimensionalen Ausgleich zu Zonotopen führen [Schön & Kutterer, 2005]. Diese repräsentieren jeweils die Genauigkeit der geschätzten Parameter, vergleichbar mit Konfidenzellipsen bzw. -ellipsoiden bei der kQS. Der Vorteil dieser Verfahren liegt demnach nicht darin, die Parameter im Gegensatz zur kQS erwartungstreu zu schätzen – die Schätzwerte selber unterscheiden sich nämlich nicht von denjenigen einer kQS –, sondern in der realistischeren Modellierung der Unsicherheiten [Neumann, 2009].

Damit eine derartige Integration der Modellunsicherheit in die Ausgleichung gelingt, müssen jedoch zuerst Ansätze gefunden werden, um den Einfluss der Modellunsicherheit auf die Parameterschätzung abschätzen zu können. Dies könnte durch die Einführung von modellbasierten Intervallradien oder Spreizungen geschehen. Insgesamt zeigen diese Analysen, dass eine realistische Unsicherheitsmodellierung nur über eine kombinierte Analyse von Mess- und Modellunsicherheit möglich ist. Die Messunsicherheit ist zudem in deterministische und stochastische Arten aufzugliedern, die wiederum jeweils die bereits genannten scannerinternen und scannerexternen Ursachen haben (siehe Abschnitt 3.2.2). Bei der Modellunsicherheit gilt die oben eingeführte Unterteilung in Unschärfe und Unvollständigkeit.

Diese Überlegungen stehen auch wieder im Zusammenhang mit der Konfiguration des Ausgleichs, insbesondere der Verteilung der Messpunkte auf der Objektfläche. Nur bei Betrachtung der ungleichmäßigen Oberflächenabtastrung ist abschätzbar, inwieweit eine Modellunsicherheit Einfluss auf die Parameterschätzungen hat.

¹Schön [2003] führt z.B. Faustformeln für Tachymeter ein, mit denen die Unsicherheit der Messungen in Form von Intervallradien abschätzbar ist.

6.5 Semantik der Punktwolke

Der vorherige Abschnitt zeigt, dass die flächenhafte Abtastung mit Laserscanning unmittelbar Fragestellungen hinsichtlich erweiterter Unsicherheitsmodellierungen aufwirft. Dieser Punkt ist auch stark verknüpft mit der Semantik der Punktwolke: Bei der tachymetrischen Bestimmung von Einzelpunkten wird das Objektmodell direkt mit vorgegeben. Denn der Mensch vor Ort entscheidet, welche Punkte explizit angemessen werden und er ordnet diesen Punkten dann eine Semantik zu. So sind z.B. bei der Einmessung von Häusern die Eckpunkte des aufsteigenden Mauerwerks aufzumessen. Diese Messpunkte definieren gleichzeitig die Häuserwand und den Grundriss. Die Punkte haben also eine direkte semantische Bedeutung. Zusätzlich wird Modellwissen integriert, indem vorausgesetzt wird, dass die Wandfläche zwischen den aufgemessenen Punkten eben ist. Dieser Sachverhalt kann nicht hinterfragt werden, da zwischen den Eckpunkten keine zusätzlichen Messungen vorliegen.

Dieses Vorgehen wird bei der flächenhaften Abtastung abgewandelt. Durch die flächenhafte Abtastung liegt eine wesentlich detaillierte Abtastung des Objekts vor, der Grad der Diskretisierung ist damit wesentlich höher. Dem obigen Beispiel folgend, ergeben sich daraus zwei Änderungen: Zum einen wird die Semantik der Punkte nicht vor der Messung definiert, da keine Einzelpunkte mit bekannter Semantik explizit angemessen werden können. Zum anderen können bisher als gegeben angenommene Sachverhalte hinterfragt werden. Es kann also aus der Punktwolke heraus beschrieben werden, ob die Häuserwand tatsächlich eben ist. Zusätzlich liegen nun viele weitere Informationen vor, wie z.B. die Anzahl und Größe der Fenster. Um die Häuserwand aber getrennt von den enthaltenden Fenstern analysieren zu können, ist eine – möglichst automatisierte – Segmentierung vorzunehmen. Dies gelingt leichter, wenn die semantische Zuordnung nur zwischen Fenster oder Wand unterscheidet. Es wird ungleich schwerer, wenn noch zwischen den Zuordnungen Fensterbank, Erker, Gesims, usw. unterschieden werden muss.

Durch die flächenhafte Abtastung liegen somit nun mehr Informationen vor. Diese Situation ist für sich genommen positiv. Daraus folgt aber unmittelbar die Herausforderung, diese Informationen automatisiert mit Semantik zu versehen. Da das Modellwissen also nicht mehr in die Auswahl expliziter Einzelpunkte einfließt, muss es nach Punktaufnahme dabei helfen, die nun sehr viel detaillierter vorliegenden Messinformationen weiterzuverarbeiten. Nur so können aus der Punktwolke die gewünschten Einzelergebnisse explizit ermittelt werden.

6.6 Approximation natürlicher Objekte auf Basis terrestrischer Laserscans

Bei der Betrachtung von Nivellements stand die Abtastung natürlicher Oberflächen – wenn auch durch künstliche Vermarkungen repräsentiert – im Vordergrund, bei der Betrachtung terrestrischer Laserscans die Abtastung künstlicher Oberflächen. Daher ist zu untersuchen, inwieweit die Analysen bzgl. terrestrischer Laserscans auf eine Abtastung natürlicher Oberflächen übertragbar sind. Hier ist im Speziellen auf die Deformationsanalyse natürlicher Objekte zu verweisen, z.B. die Überwachung von Felshängen [Nguyen et al., 2011], Schluchten [Lague et al., 2013] oder Bodenbewegungen [Holst & Kuhlmann, 2015a].

Die besondere Herausforderung bei scannerbasierten Deformationsanalysen natürlicher Oberflächen stellt dabei die Oberflächenrepräsentation dar. Im einfachsten Fall gelingt dies zwar mit Hilfe bivariater Polynome (siehe Abschnitt 3.1.4), im allgemeinen Fall ist die Oberflächenstruktur jedoch komplexer. Daher ist zu hinterfragen, ob der Aspekt der Konfiguration des Ausgleichs nicht von der Modellunschärfe, wie sie nach Kutterer [1994] definiert ist (siehe Abschnitt 6.4), zu größten Teilen überlagert wird und daher von untergeordneter Wichtigkeit ist. Entscheidend hierfür wird sein, inwieweit die Einbeziehung von Modellwissen bei der genauen Modellierung der Oberfläche hilft, sodass die Modellunschärfe vermindert werden kann.

Für den Fall nur gering vorhandenen Modellwissens könnte die Modellierung mit NURBS oder anderen Freeformflächen geeignet sein. Evtl. ist auch eine Modellierung mit Hilfe der Kollokation [Moritz, 1978] und der dortigen Einbeziehung eines stochastischen Signals zielführend. Harmening & Neuner [2014] wollen beide

dieser Ideen kombinieren. Bei der Modellierung der Nivellements führte dies zwar nicht zu einer geeigneten Modellierung, was aber mit der ungleichmäßigen und spärlichen Punktverteilung zu begründen ist [Holst & Kuhlmann, 2015b]. Diese Limitation liegt beim TLS nicht vor. Falls eine dieser Objektmodellierungen zur Verminderung der Modellunschärfe gelingen sollte, gewinnt die Konfiguration, insbesondere die Messpunktverteilung, wieder an Bedeutung, da nur so eine kontinuierliche und zuverlässige Modellierung möglich ist [Holst & Kuhlmann, 2015a].

7. Fazit und Ausblick

Sowohl auf Basis von Nivellements als auch auf Basis von terrestrischen Laserscans werden Oberflächen ungleichmäßig abgetastet. Bei Nivellements liegt die Ursache in der Wirtschaftlichkeit und Siedlungsstruktur der Untersuchungsgebiete, beim TLS kann dies messtechnisch begründet werden: Die zuerst gleichmäßige polare Abtastung des Objekts führt zu einer ungleichmäßigen Abtastung im kartesischen Objektraum. In beiden Fällen dienen die Messpunkte häufig zur Approximation von Oberflächen, um flächenkontinuierliche Aussagen treffen zu können. Gängige Anwendungen sind z.B. die Analyse von Bodenbewegungen beim Nivellement oder die Deformationsanalyse beim TLS.

Obwohl bei diesen Anwendungen im Allgemeinen eine ausreichend große Anzahl an Messpunkten zur Verfügung steht, führt die ungleichmäßige Punktverteilung dennoch oftmals zu einer ungünstigen Konfiguration des Ausgleichs. Diese Konfiguration gilt es demnach zu analysieren und ggf. auch zu optimieren. Dafür werden in der vorliegenden Arbeit die Redundanzanteile und die Einflussfaktoren genutzt. Diese vereinen die geometrische Verteilung der Messpunkte, die Objektgeometrie und das stochastische Modell der Beobachtungen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und der Konfiguration.

Auf Basis dieser Untersuchungen lassen sich im Sinne der in der Zielsetzung aufgeworfenen Fragen vier Hauptaspekte herausstellen, die in mehreren Veröffentlichungen bearbeitet wurden:

- **Konfigurationsanalyse flächenhafter Nivellements und terrestrischer Laserscans**

Konfigurationsanalysen wurden bisher hauptsächlich bei Aufgabenstellungen mit geringer Überbestimmung oder offensichtlich ungünstiger Konfiguration durchgeführt. Die vorliegende Arbeit zeigt aber auf, dass diese Analysen auch bei Ausgleichen auf Basis von flächenhaften Nivellements und terrestrischen Laserscans, bei denen die Konfiguration aufgrund einer großen Überbestimmung im Ausgleich scheinbar günstig ist, sinnvoll sind. Gerade die oft ungleichmäßige Punktverteilung führt zu einer suboptimalen Konfiguration, die zu geringen Zuverlässigkeiten oder auch Genauigkeiten in der Schätzung führen kann. Dies kann anhand der Redundanzanteile sowie anhand von relativen Redundanzanteilunterschieden herausgestellt werden. Die Verschiebung von einer absoluten Betrachtung der Redundanzanteile hin zu einer relativen Betrachtung wird dabei der Tatsache gerecht, dass aufgrund der großen Überbestimmung im Ausgleich absolut gesehen nur geringe Unterschiede vorliegen.

- **Optimierung der Konfiguration zur Approximation flächenhafter Nivellements**

Zur Optimierung der Konfiguration bei der Approximation flächenhafter Nivellements wird ein Algorithmus aufgestellt, der die Messpunktverteilung im Bezug zur Komplexität der Bodensenkungen objektiv bewertet. Die existierenden Messpunkte werden hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für die Approximation – auf Basis der Konfiguration – selektiert. Zusätzlich ist es in der Netzausgleichung erstmals möglich, die Positionen und die Anzahl zusätzlich benötigter Messpunkte zu bestimmen. Diese Optimierungsstufe geodätischer Netze fehlte in der bisherigen Literatur.

- **Aufdeckung verzerrter Schätzungen bei der Approximation terrestrischer Laserscans**

Die Approximationen gescannter Oberflächen sind oft verzerrt und abhängig vom Standpunkt aufgrund nur limitiert vorhandenen Modellwissens. Dies kann anhand einer Konfigurationsanalyse unter Betrachtung der Redundanzanteile quantifiziert und analysiert werden. Es zeigt sich, dass eine Verbesserung der kQS durch eine Punktausdünnung – also durch die Herstellung einer gleichmäßigen Abtastung – möglich ist. Dies zeigt sich sowohl in den Schätzergebnissen als auch in der verbesserten Konfiguration.

- **Weiterentwicklung bestehender Konzepte zur scannerbasierten Deformationsuntersuchung**

Die beschriebenen Aspekte des nur limitiert vorhandenen Modellwissens und der Verbesserung der Konfiguration durch eine Punktausdünnung werden in bisherigen flächenhaften Deformationsanalysen auf Basis terrestrischer Laserscans vernachlässigt. Dies kann zu nicht interpretierbaren Ergebnissen führen. Daher wird ein Ansatz zur Deformationsanalyse vorgestellt, der beide Aspekte aufgreift. Ferner wird

der Aspekt der Scannerkalibrierung hervorgehoben. Ohne diese Kalibrierung – dessen Konfigurationsanalyse auch Bestandteil der Untersuchung ist – liegen für eine Deformationsuntersuchung ebenfalls unzureichende Ergebnisse vor. Die Kalibrierung von Laserscannern wird auch deshalb so prägnant hervorgehoben, da die bisherigen Ansätze (z.B. nach Gordon [2008]; Lichti [2007]) zu hinterfragen sind. Daher stellt dieser weiterentwickelte Ansatz einen großen Fortschritt bei der Nutzung terrestrischer Laserscanner zur zuverlässigen und genauen Deformationsanalyse dar.

Diese beschriebenen Untersuchungen beziehen sich auf Konfigurationsanalysen bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans. Die Ergebnisse sind unmittelbar relevant für alle flächenhaften Modellierungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen, die auf Messungen flächenhaft, aber ungleichmäßig abtastender Sensoren basieren. Dies ist insbesondere der Fall bei den beiden vorgestellten Beispielen der Analyse sumpfungsbedingter Bodensenkungen sowie der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg. Konkret ergibt sich auf Basis der vorgestellten Untersuchungen erstmalig die Möglichkeit, RWE Power, Öffentlich bestellten Vermessungsingenieuren (ÖbVI) bzw. den Vermessungsbehörden handfeste Hinweise zu geben, an welchen Positionen zusätzliche Höhenbolzen vermarktet werden sollten, um eine zuverlässigere Analyse sumpfungsbedingter Bodensenkungen zu ermöglichen. Ferner ermöglichen die vorgestellten Analyse- und Optimierungsschritte erst die Ermittlung elevationsabhängiger Brennweitenänderungen von 22.7 mm am Radioteleskop Effelsberg sowie die Aufdeckung von Paneelen, die im Bereich einzelner Millimeter von der Annahme der homologen Verformung abweichen.

Neben diesen methodischen Erkenntnissen, die unmittelbar in eine Vielzahl vergleichbarer Studien übertragbar sind, sind andere hier aufgeworfene Fragestellungen bisher nicht zufriedenstellend gelöst: Dies betrifft die Verwendung robuster Schätzungen in der Formanalyse. Auf Basis dieser robusten Schätzungen könnte eine Steigerung der Erwartungstreue der Parameterschätzungen erzielt werden, auch bei vorliegen limitierten Modellwissens. Die Schätzwerte erzielt auf Basis einer kQS sind dagegen in diesen Fällen stets verzerrt – auch noch nach einer Optimierung der Konfiguration. Zur besseren Einordnung der robusten Schätzung in den gesamten Kontext systematischer Abweichungen, die modellbedingt und nicht messbedingt sind, sind allerdings noch weitere Studien nötig.

Einen weiteren, bisher nicht ganz zufriedenstellend gelösten Aspekt stellt die Detektion bewegungsaktiver tektonischer Störungen bei der Analyse sumpfungsbedingter Bodensenkungen auf Basis von Nivellements dar: Hier konnte nur ein heuristischer Ansatz entwickelt werden. Dieser vermag es nicht, die Wahrscheinlichkeit einer tektonischen Störung innerhalb einer Region nivellierter Höhenänderungen anhand eines Signifikanztests qualitativ zu bewerten. Lediglich eine visuelle Interpretation ist möglich. Ursächlich dafür ist die nur sehr spärliche Abtastung der Oberfläche.

Abgesehen von diesen noch weiter zu diskutierenden Fragestellungen zeigt die vorliegende Dissertation neben den verwendeten Methoden zusätzlich abweichende Ausgleichsalgorithmen und Kenngrößen zur Konfigurationsanalyse auf. Des Weiteren werden Überlegungen zum stochastischen Modell terrestrischer Laserscans, zu Anforderungen an parametrische Flächenmodellierungen, zur erweiterten Unsicherheitsmodellierung und zur Semantik der Punktwolke aufgeworfen. Die Diskussion dieser Aspekte und eine Erweiterung der Analysen auf natürliche Oberflächen öffnet die vorliegende Dissertation hinsichtlich weiterer Untersuchungen. Ebenfalls denkbar ist die Übertragung der vorgestellten Konfigurationsanalysen auf Oberflächenabtastungen anderer Sensoren. Hier ist z.B. die Deformationsanalyse einer Kranbrücke unter Belastung auf Basis von Neigungssensoren und Tachymetern zu nennen [Holst et al., 2013a, 2014b; Burghof et al., 2014].

Im Gesamten stellt die vorliegende Dissertation also eine Grundlage zur verbesserten Analyse, Bewertung und Interpretation von Approximationen auf Basis ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen dar. Sie zeigt auf, dass auch flächenhafte Approximationen mit einer großen Überbestimmung Konfigurationsdefizite aufweisen können, die es zu analysieren und optimieren gilt, um zuverlässige und aussagekräftige Parameterschätzwerte zu ermöglichen. Eingebettet in die genannten weiterführenden Untersuchungen ist diese Dissertation damit bei der ganzheitlichen Raumkontinuierlichkeit – wie sie von Kuhlmann et al. [2014] sowie Kuhlmann & Schwieger [2014] für die Ingenieurgeodäsie prognostiziert wird – von großem Nutzen.

8. Auflistung weiterer Veröffentlichungen

Das aktuelle Kapitel bietet einen Überblick über weitere Veröffentlichungen. Diese stehen entweder nicht in unmittelbarem Zusammenhang zur vorliegenden Dissertation oder es fand nur eine Beteiligung als Koautor statt. Die Veröffentlichung Holst et al. [2014b] wurde einer Peer-Review-Begutachtung unterzogen, die übrigen nicht.

- Burghof, M., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2014). Deformationsanalyse einer Kranbrücke unter Belastung mit Methoden der Zeitreihenanalyse. In *Schriftenreihe DVW, Band 74, Zeitabhängige Messgrößen – Ihre Daten haben (Mehr-)Wert* (S. 233–248).: Wißner
- Holst, C., Burghof, M., & Kuhlmann, H. (2013a). Deformation analysis of a gantry crane during workload. In *2. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 09-10 September 2013* Nottingham, UK
- Holst, C., Burghof, M., & Kuhlmann, H. (2014b). Modeling the beam deflection of a gantry crane under load. *J. Surv. Eng.*, 140(1), 52–59
- Holst, C., Tegelbeckers, J., & Kuhlmann, H. (2014d). Erkennung und Erklärung von systematischen Effekten beim TLS. In *Schriftenreihe DVW, Band 78: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)* (S. 51–68).: Wißner
- Nothnagel, A., Eichborn, M., & Holst, C. (2013). Improved focal length results of the Effelsberg 100 m radio telescope. In N. Zubko & M. Poutanen (Hrsg.), *21. Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy* (S. 55–60). Espoo, Finland: Reports of the Finnish Geodetic Institute

Abbildungsverzeichnis

1.1	Punktverteilung und Höhenänderungen (farblich codiert) beim Nivellement in der Beispielregion A.	4
1.2	Punktverteilung beim Scanning des Radioteleskops Effelsberg (skizziert durch exemplarisch ausgewählte Laserstrahlen, blau liniert).	4
3.1	Methodik des Nivellements zur Bestimmung des Höhenunterschieds $h_{AB} = 1.96 \text{ m} - 1.12 \text{ m} = 0.84 \text{ m}$ zwischen zwei Punkten A und B [Kahmen, 2006, S. 401].	10
3.2	Nivellementnetz bestehend aus 6 Punkten und mehreren Nivellementzügen [Niemeier, 2008, S. 182].	10
3.3	Punktverteilung und Höhenänderungen (farblich codiert) beim Nivellement in der Beispielregion B.	12
3.4	Modellfläche basierend auf approximiertem, bivariatem Polynom von Beispielregion B (schwarze Kreuze = detektierte Ausreißer).	12
3.5	Skizze zur flächenhaften Modellbildung bei der Approximation nivellierter Höhenunterschiede (eindimensional dargestellt).	13
3.6	Prinzip der Strahlableitung beim TLS mit horizontaler Rotation um t und vertikaler Rotation um β (in Anlehnung an Eling [2009]).	14
3.7	Polarbeobachtungen s, β, t und kartesische Koordinaten x, y, z im Scannersystem.	14
3.8	Relative Punktdichte nach Abtastung mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners von den Standpunkten 1 und 3 in 10 m Entfernung zur Ebene; Simulation auf Basis einer gescannten Ebene (schwarzes Kreuz = Projektion des Scannerstandpunktes in Ebene).	16
4.1	Inhaltliche Zuordnung der relevanten Veröffentlichungen zur Verdeutlichung ihres jeweiligen Beitrags an der vorliegenden Dissertation sowie Kennzeichnung der Veröffentlichungen mit Peer-Review-Begutachtung.	23
5.1	Redundanzanteile der nivellierten Höhenunterschiede in Beispielregionen A (links) und B (rechts). Die Farbskala ist zur Vergleichbarkeit auf den Bereich $[0.5; 1.0]$ skaliert; einige Redundanzanteile sind kleiner 0.5.	36
5.2	Redundanzanteile der Messpunkte beim TLS bei der Abtastung einer Ebene von zwei Standpunkten 1 und 3 (schwarze Kreuze = Projektionen der Scannerstandpunkte in Ebene).	37
5.3	Redundanzanteile der Messpunkte bei Approximation des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg (links) sowie bei Approximation mit simultaner Schätzung von Kalibrierparametern (rechts), jeweils bei 45° Elevationsstellung (schwarzes Kreuz = Projektion des Laserscannerstandpunktes auf Paraboloid, schwarze Linie = Projektion der x -Achse des Laserscanners, gestrichelte Linie = Projektion der y -Achse).	38
5.4	Optimierung der Konfiguration von Beispielregion B (schwarz = zu eliminierende Punkte, grün = zu erhaltende Punkte, rot = hinzuzufügende Punkte, rote Kreise = Zwillingpunkte)	40

5.5	Residuen von der Flächenapproximation der Beispielregion B auf Basis der optimierten Konfiguration (schwarz = unabhängige Kontrollbeobachtungen, grün = Punkte der optimierten Konfiguration, rot = Konfidenzbereich von $\pm 2.58 \text{ mm}$ bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 99.0%, siehe Abschnitt 3.1.4).	40
5.6	Deformationen auf der gescannten Ebene und Projektionen der fünf verschiedenen Standpunkte auf die Ebene.	43
5.7	Redundanzanteile beim Scanning einer Ebene von Standpunkt 1 nach Punktausdünnung. . .	43
5.8	Abweichungen der Ebenenschätzungen von den Sollparametern in Abhängigkeit der verschiedenen Standpunkte (schwarz = ursprüngliche Abtastung, blau = nach Punktausdünnung). . .	43
5.9	Relative Punktdichte beim Scan des Radioteleskops Effelsberg bei einer Elevationsstellung von 90° (links = ursprüngliche Abtastung, rechts = nach Punktausdünnung, jeweils Messungen aus dem Jahr 2010).	45
5.10	Differenzen der geschätzten Brennweiten beim Radioteleskop Effelsberg zwischen ursprünglicher Abtastung und ausgedünnter Punktwolke (Jahr 2010).	45
5.11	Segmentierung des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg (schwarze Punkte = innerhalb einzelner Paneele, rote Punkte = Zwischenräume).	46
5.12	Klassifizierung der Residuen vom Ausgleich nach ihrer Position (schwarz = innerhalb Paneel, rot = zwischen Paneelen).	46
5.13	Geschätzte Residuen zwischen Messpunkten und approximierter Oberfläche bei der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg (Elevationsstellung 75° , links = vor Scannerkalibrierung, rechts = nach Scannerkalibrierung).	47
5.14	Paneelenweise Mittlung der geschätzten Residuen zwischen Messpunkten und approximierter Oberfläche bei der Deformationsanalyse des Radioteleskops Effelsberg (Elevationsstellung 75° , nach Scannerkalibrierung).	47
5.15	Geschätzte Brennweite des Hauptreflektors des Radioteleskops Effelsberg (grau = vor Scannerkalibrierung, schwarz = nach Scannerkalibrierung).	47

Abkürzungsverzeichnis

BIBER Bounded Influence by Standardized Residuals

EIV Error-in-Variables

GHM Gauß-Helmert Modell

GMM Gauß-Markov Modell

GODR Generalisierte Orthogonale Distanzregression

GPS Global Positioning System

kQS kleinste-Quadrate-Schätzung

NURBS Non-Uniform Rational B-Splines

ODR Orthogonale Distanzregression

RANSAC Random Sample Consensus

TLS Terrestrisches Laserscanning

VFG Varianzfortpflanzungsgesetz

VLBI Very Long Baseline Interferometry

Literaturverzeichnis

- Abbas, M., Setan, H., Majid, Z., Idris, K., Ariff, M. M., Chong, A., & Lichti, D. (2014). The effect of datum constraints for terrestrial laser scanner self-calibration. In *FIG Congress 2014, Kuala Lumpur, Malaysia 16-21 June 2014*.
- Ahn, S. J. (2008). Geometric fitting of parametric curves and surfaces. *Journal of Information Processing Systems*, 4(4), 153–158.
- Ahn, S. J., Rauh, W., Cho, H. S., & Warnecke, H.-J. (2002). Orthogonal distance fitting of implicit curves and surfaces. *IEEE T. Pattern Anal.*, 24(5), 620–638.
- Ahn, S. J., Rauh, W., & Warnecke, H.-J. (2001). Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola and parabola. *Pattern Recog.*, 34(12), 2283–2303.
- Alba, M., Fregnese, L., Prandi, F., Scaioni, M., & Valgoi, P. (2006a). Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36(5).
- Alba, M., Giussani, A., Roncoroni, F., Scaioni, M., & Valgoi, P. (2006b). Geometric modelling of a large dam by terrestrial laser scanning. In *XXIII FIG Congress, München*.
- Artz, T., Springer, A., & Nothnagel, A. (2014). A complete vlbi delay model for deforming radio telescopes: the effelsberg case. *J. Geod.*, 88(12), 1145–1161.
- Baarda, W. (1968). A testing procedure for use in geodetic networks. In *Publications on Geodesy, Band 2 of New Series*. Delft: Netherlands Geodetic Commission.
- Baars, J. (2007). *The paraboloidal reflector antenna in radio astronomy and communication*. Springer.
- Bae, K.-H. & Lichti, D. (2007). On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. In *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland*.
- Bärwolff, G. (2004). *Höhere Mathematik für Naturwissenschaftler und Ingenieure*. Spektrum. Akademischer Verlag.
- Bellanger, M. (1989). *Digital Processing of Signals*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 2. Auflage.
- Berber, M. (2006). *Robustness analysis of geodetic networks*. Dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- Berber, M., Vanicek, P., & Dare, P. (2009). Robustness analysis of 3d networks. *J. Geodyn.*, 47, 1–8.
- Budak, I., Vukelic, D., Bracun, D., Hodoloic, J., & Sokovic, M. (2012). Pre-processing of point-data from contact and optical 3d digitization sensors. *Sensors*, 12, 1100–1126.
- Burghof, M., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2014). Deformationsanalyse einer Kranbrücke unter Belastung mit Methoden der Zeitreihenanalyse. In *Schriftenreihe DVW, Band 74, Zeitabhängige Messgrößen – Ihre Daten haben (Mehr-)Wert* (S. 233–248).: Wißner.
- Chatterjee, S. & Hadi, A. (1986). Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. *Stat. Sci.*, 1(3), 379–416.
- Chmelina, K., Jansa, J., Hesina, G., & Traxler, C. (2012). A 3-d laser scanning system and scan data processing method for the monitoring of tunnel deformations. *J. Appl. Geodesy*, 6(3–4), 177–185.
- Chow, J., Lichti, D., & Glennie, C. (2011). Point-based versus plane-based self-calibration of static terrestrial laser scanners. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38(5/12).
- Chow, J., Lichti, D., Glennie, C., & Hartzell, P. (2013). Improvements to and comparison of static terrestrial lidar self-calibration methods. *Sensors*, 13, 7224–7249.
- Chow, J., Lichti, D., & Teskey, W. (2012). Accuracy assessment of the Faro Focus 3D and Leica HDS 6100 panoramic type terrestrial laser scanner through point-based and plane-based user self-calibration. In *Proceedings of the FIG Working Week: Knowing to Manage the Territory, Protect the Environment, Evaluate the Cultural Heritage, Rome, Italy (2012): 6-10*.

- Chum, O. (2005). *Two-view geometry estimation by random sample and consensus*. Dissertation, Center for Machine Perception, Czech Technical University in Prague.
- Cook, R. D. (1977). Detection of influential observation in linear regression. *Technometrics*, 19(1), 15–18.
- Cook, R. D. (1979). Influential observations in linear regression. *J. Am. Stat. Assoc.*, 74(365), 169–174.
- Cothren, J. D. (2004). *Reliability in constrained Gauss-Markov models: an analytical and differential approach with applications in photogrammetry*. Dissertation, Ohio State University.
- Deumlich, F. & Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Heidelberg: Wichmann, 9 Auflage.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2010a). Teil 1: Allgemeine Anforderungen. In *DIN 18710 – Ingenieurvermessung*. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2010b). Teil 4: Ausgleichsrechnung und Statistik. In *DIN 18709 – Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie*. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN.
- Diehl, M. (2013). Algorithmen zur Formanalyse partiell gescannter Prüfkörper. Master's thesis, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn. unveröffentlicht.
- Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N., & Molnár, G. (2008). On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. *J. Appl. Geodesy*, 2(4), 191–204.
- Dutescu, E., Heunecke, O., & Krack, K. (2009). Formbestimmung bei Radioteleskopen mittels Terrestrischem Laserscanning. *Allgem. Verm. Nachr.*, 6, 239–245.
- Edelsbrunner, H. (1995). Smooth surfaces for multi-scale shape representation. *Lect. Notes Comput. Sc.*, 1026, 391–412.
- Eling, C., Klingbeil, L., Wieland, M., & Kuhlmann, H. (2013). A precise position and attitude determination system for lightweight unmanned aerial vehicles. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XL-1/W2, 113–118.
- Eling, D. (2009). *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 282.
- Fischler, M. & Bolles, R. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381–395.
- Forbes, A. (2006a). Surface fitting taking into account uncertainty structure in coordinate data. *Meas. Sci. Technol.*, 17, 553–558.
- Forbes, A. (2006b). Uncertainty evaluation associated with fitting geometric surfaces to coordinate data. *Metrologia*, 43, S282–S290.
- Förstner, W. & Wrobel, B. (2015). *Photogrammetric Computer Vision: Geometry, Orientation and Reconstruction*. Springer. in Kürze verfügbar.
- Förstner, W. (1979). Das Prgramm TRINA zur Ausgleichung und Gütebeurteilung geodätischer Netzwerke. *zfv*, 104, 61–72. Wißner, Augsburg.
- Förstner, W. (1987). Reliability analysis of parameter estimation in linear models with applications to mensuration problems in computer vision. *Comput. Vision. Graph.*, 40, 273–310.
- García-San-Miguel, D. & Lerma, J. (2013). Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy. *ISPRS J. Photogramm.*, 79, 122–136.
- Gielsdorf, F., Rietdorf, A., & Gründig, L. (2004). A concept for the calibration of terrestrial laser scanners. In *FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004*.
- Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, D 17.
- Grafarend, E. & Sansò, F., Hrsg. (1985). *Optimization and design of geodetic networks*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.
- Grafarend, E. W. (1979). *Optimization of design and computation of control networks*, Kapitel Third-order design of geodetic networks, (S. 133–149). Akadémiai Kiadó: Budapest.
- Grafarend, E. W. & Krumm, F. W. (1985). *Optimization and design of geodetic networks*, Kapitel Continuous Networks I, (S. 301–341). Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokio.

- Grimm-Pitzinger, A. & Rudig, S. (2005a). Freiformflächen zur Modellierung von Deformationsmessungen. *zfv*, 3. Wißner, Augsburg.
- Grimm-Pitzinger, A. & Rudig, S. (2005b). Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen. In *Beiträge zur 13. Internationalen Geodätischen Woche* (S. 115–124). Obergurgl, Österreich.
- Gründig, L. & Bahndorf, J. (1984). Optimale Planung und Analyse von 2- und 3-dimensionalen geodätischen Netzen im Ingenieurbereich - Programmsystems OPTUN. In Rinner, Schelling, & Brandstätter (Hrsg.), *Beiträge zum IX. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung*. Bonn: Dümmler.
- Hachenberg, O. (1968). Studien zur Konstruktion des 100-m-Teleskops. In *Beiträge zur Radioastronomie. Max-Planck-Institut für Radioastronomie Bonn*, Band 1. Bonn: Dümmler.
- Halmos, F. & Somogyi, J., Hrsg. (1979). *Optimization of design and computation of control networks*. Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Harmening, C. & Neuner, H. (2014). Raumkontinuierliche Modellierung mit Freiformflächen. In *Schriftenreihe DVW, Band 78: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)* (S. 105–122).
- Hayes, J. G. & Halliday, J. (1974). The least-squares fitting of cubic spline surfaces to general data sets. *J. Inst. Maths. Applics.*, 14, 89–103.
- Helfrich, H.-P. & Zwick, D. (1993). A trust region method for implicit orthogonal distance regression. *Numer. Algorithms*, 5(10), 535–525.
- Helfrich, H.-P. & Zwick, D. (1995). Trust region algorithms for the nonlinear least distance problem. *Numer. Algorithms*, 9(1), 171–179.
- Helfrich, H.-P. & Zwick, D. (1996). A trust region algorithm for parametric curve and surface fitting. *J. Comput. Appl. Math.*, 73(1–2), 119–134.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (2013). Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In M. Möser, G. Müller, & H. Schlemmer (Hrsg.), *Handbuch Ingenieurgeodäsie*. Heidelberg: Wichmann, 2. Auflage.
- Holst, C., Artz, T., & Kuhlmann, H. (2014a). Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *J. Appl. Geodesy*, 8(3), 169–183.
- Holst, C., Burghof, M., & Kuhlmann, H. (2013a). Deformation analysis of a gantry crane during workload. In *2. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 09-10 September 2013* Nottingham, UK.
- Holst, C., Burghof, M., & Kuhlmann, H. (2014b). Modeling the beam deflection of a gantry crane under load. *J. Surv. Eng.*, 140(1), 52–59.
- Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014c). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern - eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *Allgem. Verm. Nachr.*, 121(7), 260–272.
- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013b). Anforderungen und Grenzen von Bodenbewegungsmodellen zur Beschreibung des Bodensenkungsverhaltens im Rheinischen Braunkohlenrevier. *Marktscheidewesen*, 120(1-2), 13–22.
- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013c). Automatic optimization of height network configurations for detection of surface deformations. *J. Appl. Geodesy*, 7(2), 103–113.
- Holst, C., Eling, C., & Kuhlmann, H. (2013d). Data-adaptive approximation strategy for monitoring and analysis of height changes. In *XV International ISM Congress, 16-20 September 2013* Aachen.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2011). Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In *Schriftenreihe DVW, Band 66: Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge* (S. 161–180). Augsburg: Wißner.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2013). Fault edge detection for analyzing surface deformations with ground movement models. In *2. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 09-10 September 2013* Nottingham, UK.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014a). Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *J. Appl. Geodesy*, 8(4), 295–310.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014b). Impact of spatial point distributions at laser scanning on the approximation of deformed surfaces. In *Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs* (S. 269–282). Zürich, Schweiz: A. Wieser.

- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015a). Detecting and analyzing fault edges in sampled ground movements. *Appl. Geomat.* ahead of print, doi: 10.1007/s12518-014-0145-9.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2015b). Mathematische Modelle zur flächenhaften Approximation punktweise gemessener Bodensenkungen auf Basis von Präzisionsnivellements. In W. Busch & S. Knospe (Hrsg.), *GeoMonitoring 2015* (S. 189–206). Clausthal-Zellerfeld.
- Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., & Kuhlmann, H. (2015). Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *J. Appl. Geodesy*, 9(1), 1–13.
- Holst, C., Tegelbeckers, J., & Kuhlmann, H. (2014d). Erkennung und Erklärung von systematischen Effekten beim TLS. In *Schriftenreihe DVW, Band 78: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)* (S. 51–68).: Wißner.
- Holst, C., Zeimetz, P., Nothnagel, A., Schauerte, W., & Kuhlmann, H. (2012). Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements. *J. Surv. Eng.*, 138(3), 126–135.
- Illner, M. (1986). *Anlage und Optimierung von Verdichtungsnetzen*. Dissertation, DGK C 317.
- Ioannidis, C., Valani, A., Georgopoulos, A., & Tsiligris, E. (2006). 3d model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. In *3. IAG / 12th FIG Symposium* Baden, Deutschland.
- Jäger, R., Müller, T., Saler, H., & Schwäble, R. (2005). *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren*. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Kaasalainen, S., Krooks, A., Kukko, A., & Kaartinen, H. (2009). Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. *Remote Sens.*, 1(3), 144–158.
- Kahmen, H. (2006). *Angewandte Geodäsie. Vermessungskunde*. Berlin: Walter de Gruyter, 20 Auflage.
- Kammeyer, K.-D. & Kroschel, K. (2006). *Digitale Signalverarbeitung. Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen*. Teubner Verlag.
- Kavouras, M. (1982). *On the detection of outliers and the determination of reliability in geodetic networks*. Technical Report 87, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Canada.
- Kern, F. (2008). Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. In *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik*. Heidelberg: Wichmann.
- Kern, F. & Huxhagen, U. (2008). Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In *Terrestrisches Laserscanning (2008), Schriftenreihe des DVW, Band 54, Wissner* (S. 111–124). Augsburg.
- Keys, R. G. (1981). Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE T. Acoust. Speech*, 29, 1153–1160.
- Klingbeil, L., Nieuwenhuisen, M., Schneider, J., Eling, C., Droschel, D., Holz, D., Läbe, T., Förstner, W., Behnke, S., & Kuhlmann, H. (2014). Towards autonomous navigation of an UAV-based mobile mapping system. In *Proceedings of the 4. International Conference on Machine Control & Guidance* (S. 136–147).
- Koch, K.-R. (1982). Optimization of the configuration of geodetic networks. In *Proceedings of the International Symposium on Geodetic Networks and Computations* (S. 82–89).
- Koch, K.-R. (1987). *Parameter estimation and hypothesis testing in linear models*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Koch, K.-R. (1994). *Deterministische und stochastische Signale mit Anwendungen in der digitalen Bildverarbeitung*. Bonn: Dümmler.
- Koch, K.-R. (1997). *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Bonn: Dümmler, 4 Auflage.
- Koch, K.-R. & Kuhlmann, H. (2009). The impact of correcting measurements of laserscanners on the uncertainty of derived results. *zfv*, 1, 38–44. Wißner, Augsburg.
- Koch, K.-R., Kuhlmann, H., & Schuh, W.-D. (2010). Approximating covariance matrices estimated in multivariate models by estimating auto- and cross-covariances. *J. Geod.*, 84, 383–397.
- Kuhlmann, H. (2001). Importance of autocorrelation for parameter estimation in regression models. In *Proceedings 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements* (S. 354–361).
- Kuhlmann, H. (2003). Kalman-filtering with coloured measurement noise for deformation analysis. In *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements* Santorini, Greece.

- Kuhlmann, H. & Schwieger, V. (2014). *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2015*, Kapitel Ingenieurgeodäsie, (S. 739–780). Wichmann: Heidelberg.
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., & Niemeier, W. (2014). Engineering geodesy – definition and core competencies. *J. Appl. Geodesy*, 8(4).
- Kutterer, H. (1994). *Intervallmathematische Behandlung endlicher Unschärfen linearer Ausgleichungsmodelle*. Dissertation, DGK C 423.
- Kutterer, H. (2002). *Zum Umgang mit Ungewissheit in der Geodäsie – Bausteine für eine neue Fehlertheorie* –. Dissertation, DGK C 553.
- Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the rangitikei canyon (n-z). *ISPRS J. Photogramm.*, 82, 10–26.
- Lancaster, P. & Salkauskas, K. (1986). *Curve and surface fitting - an introduction*. London: Academic Press LTD.
- Lee, K., Woo, H., & Suk, T. (2001a). Data reduction methods for reverse engineering. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 17, 735–743.
- Lee, K., Woo, H., & Suk, T. (2001b). Point data reduction using 3d grids. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 18, 201–210.
- Leek, J. (2015). *The application of impact factors to scheduling VLBI Intensive sessions with twin telescopes*. Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Leica Geosystems (2011). Leica HDS 6100, latest generation of ultra-high speed laser scanner. www.leica-geosystems.com/hds.
- Leica Geosystems (2014). Leica ScanStation P20, industry's best performing ultra-high speed scanner. www.leica-geosystems.de.
- Lenzmann, L. & Lenzmann, E. (2004). Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells. *Allgem. Verm. Nachr.*, 2, 68–73.
- Lichti, D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS J. Photogramm.*, 61(5), 307–324.
- Lichti, D. (2009). The impact of angle parameterisation on terrestrial laser scanner self-calibration. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38(3/W8), 171–176.
- Lichti, D. (2010). Terrestrial laser scanner self-calibration: Correlation sources and their mitigation. *ISPRS J. Photogramm.*, 65, 93–102.
- Lichti, D., Chow, J., & Lahamy, H. (2011). Parameter de-correlation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration. *ISPRS J. Photogramm.*, 66(3), 317–326.
- Lichti, D., Stewart, M., Tsarkiri, M., & Snow, A. (2000). Calibration and testing of a terrestrial laser scanner. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 33(B5), 485–492.
- Lindenbergh, R. & Pfeifer, N. (2005). A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. In *Optical 3-D Measurement Techniques VII*, Band 2 (S. 61–70). Wien, Österreich: Grün, A. and Kahmen, H.
- Lindenbergh, R., Uchanski, L., Bucksch, A., & van Gosliga, R. (2009). Structural monitoring of tunnels using terrestrial laser scanning. *Reports of Geodesy*, 2(87), 231–239.
- Linke, J. (2000). *Zur Analyse der Geometrie und Beurteilung von geodätischen und mechanischen Netzen unter Verwendung von Balancierungsfaktoren*. Dissertation, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal, Nr. 3.
- Linstaedt, M., Kersten, T., Mechelke, K., & Graeger, T. (2012). Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner - Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012* (S. 264–275). Th. Luhmann / Ch. Müller, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach.
- Mandow, A., Martinez, J., Reina, A., & Morales, J. (2011). Fast range-independent spherical subsampling of 3d laser scanner points and data reduction performance evaluation for scene registration. *Pattern Recognit. Lett.*, 31, 1239–1250.
- Mikhail, E. & Ackermann, F. (1976). *Observations and least squares*. New York: Dun-Donnelly.
- Moritz, H. (1978). Least-squares collocation. *Rev. Geophys. Space Ge.*, 16(3), 421–430.
- Neitzel, F. (2010). Generalization of total least-squares on example of unweighted and weighted 2d similarity transformation. *J. Geod.*, 84(12), 751–762.

- Neitzel, F. & Petrovic, S. (2008). Total Least Squares (TLS) im Kontext der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten am Beispiel der ausgleichenden Geraden. *zfv*, 3, 141–148. Wißner, Augsburg.
- Neumann, I. (2009). *Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaushaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests*. Dissertation, DGK C 634.
- Neumann, I. & Kutterer, H. (2006). Geodetic deformation analysis with respect to observation imprecision. In *XXIII FIG Congress München*.
- Nguyen, H., Fernandez-Steegeer, T., Wiatr, T., Rodrigues, D., & Azzam, R. (2011). Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes – an example from madeira island (portugal). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11.
- Niemeier, W. (1985). *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Band 2, Kontaktstudium 1985*, Kapitel Netzqualität und Optimierung, (S. 153–224). Wittwer.
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung. Statistische Auswertemethoden*. Berlin: de Gruyter, 2. Auflage.
- Nothnagel, A., Eichborn, M., & Holst, C. (2013). Improved focal length results of the Effelsberg 100 m radio telescope. In N. Zubko & M. Poutanen (Hrsg.), *21. Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy* (S. 55–60). Espoo, Finland: Reports of the Finnish Geodetic Institute.
- Nuckelt, A. (2007). *Dreidimensionale Plattenkinematik: Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone / Rumänien*. Dissertation, Universität Karlsruhe. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik 2007,5.
- Ohlmann-Bartusel, J. (2009). Gaining areal deformations by using driving-attendant laser scanning for the new austrian tunnelling method. In *Optical 3-D Measurement Techniques IX*, Band 2 (S. 20–28).
- Ohlmann-Lauber, J. (2012). Filterungsansätze zur Bestimmung flächenhafter Deformationen aus TLS-Daten. In *GeoMonitoring 2012*: Niemeier, W. and Riedel, B. and Lehmann, M.
- Ohlmann-Lauber, J. & Schäfer, T. (2011). Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In *Schriftenreihe DVW, Band 66 Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS-Challenge* (S. 161–180).: Wißner.
- Paulus, S., Dupuis, J., Mahlein, A.-K., & Kuhlmann, H. (2013). Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. *BMC Bioinformatics*, 13, 238.
- Pelzer, H., Hrsg. (1980). *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Band 1, Kontaktstudium 1979*. Wittwer.
- Pelzer, H., Hrsg. (1985). *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Band 2, Kontaktstudium 1985*. Wittwer.
- Pelzer, H. & Niemeier, W., Hrsg. (1983). *Precise Levelling. Contributions to the Workshop on Precise Levelling*. Bonn: Dümmler.
- Pena, D. (2005). A new statistic for influence in linear regression. *Technometrics*, 47(1), 1–12.
- Pressley, A. (2001). *Elementary differential geometry*. London, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Preusse, A. & Schulte, R. (2012). Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. In *Bergschadensforum* Elsdorf, Deutschland.
- Rawiel, P. (2001). *Dreidimensionale kinematische Modelle zur Analyse von Deformationen an Hängen*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe. DGK C 533.
- Reshetyuk, Y. (2006). Calibration of terrestrial laser scanners Callidus 1.1, Leica HDS 3000 and Leica HDS 2500. *Survey Review*, 38(302), 703–713.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Dissertation, KTH - Royal Institute of Technology, Schweden.
- Reshetyuk, Y. (2010). A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanners. *ISPRS J. Photogramm.*, 65(5), 445–456.
- Rietdorf, A. (2005). *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Dissertation, DGK C 582.
- Ritter, G. X. & Wilson, J. N. (2001). *Handbook of computer vision algorithms in image algebra*. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press, 2. Auflage.
- Rouhani, M. & Sappa, A. D. (2009). A novel approach to geometric fitting of implicit quadrics. *ACIVS, Lect. Notes Comput. Sc.*, 5807, 121–132.

- Sampson, P. D. (1982). Fitting conic sections to 'very scattered' data: an iterative refinement of the bookstein algorithm. *Comput. Vision. Graph.*, 18(1), 97–108.
- Sandwell, D. T. (1987). Biharmonic spline interpolation of geos-3 and seasat altimeter data. *Geophys. Res. Lett.*, 14(2), 139–142.
- Sarti, P., Vittuari, L., & Abbondanza, C. (2009). Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large vlbi telescopes' primary reflector. *J. Surv. Eng.*, 135(4), 136–148.
- Schäfer, T. (2014). Eine Simulationsumgebung zur Analyse berührungsloser Distanzmessungen unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. In *Ingenieurvermessung 14. Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs* (S. 27–36). Zurich: A. Wieser.
- Schaffrin, B. & Wieser, A. (2008). On weighted total least-squares adjustment for linear regression. *J. Geod.*, 82(7), 415–421.
- Schäfer, T., Weber, T., Kyrinovic, P., & Zámečnicková, M. (2004). Deformation measurements using terrestrial laser scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. In *Proceedings of the INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2*.
- Schmitt, G. (1980). Second order design of a free distance network, considering different types of criterion matrices. *J. Geod.*, 54(4), 531–543.
- Schmitt, G. (1985a). *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Kapitel Second order design, (S. 74–121). Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Schmitt, G. (1985b). *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Kapitel Review of network designs: criteria, risk functions, design ordering, (S. 6–10). Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Schön, S. (2003). *Analyse und Optimierung geodätischer Messanordnungen unter besonderer Berücksichtigung des Intervallansatzes*. Dissertation, DGK C 567.
- Schön, S. & Kutterer, H. (2005). Using zonotopes for overestimation-free interval least-squares – some geodetic applications. *Reliab. Comput.*, 11, 137–155.
- Schneider, D. (2006). Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water dams. In *3. IAG / 12th FIG Symposium Baden*.
- Schneider, D. (2009). Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38(3/W8), 177–182.
- Schneider, D. & Schwalbe, E. (2008). Integrated processing of terrestrial laser scanner data and fisheye-camera image data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 37(B5).
- Schulz, T. (2007). *Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy*. Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Schwintzer, P. (1984). Zur Bestimmung der signifikanten Parameter in Approximationsfunktionen. In *Beiträge aus dem Institut für Geodäsie der UniBW München, Nr. 10* (S. 71–91). Caspary and Schödlbauer and Welsch.
- Seemkooei, A. A. (1998). *Analytical methods in optimization and design of geodetic networks*. Dissertation, Department of Surveying Engineering, K. N. Toosi University of Technology Tehran, Iran.
- Seemkooei, A. A. (2001). Comparison of reliability and geometrical strength criteria in geodetic networks. *J. Geod.*, 75, 227–233.
- Shi, B.-Q., Liang, J., & Liu, Q. (2011). Adaptive simplification of point cloud using k-means clustering. *Comput.-Aided Des.*, 43, 910–922.
- Silva, A. S., Baiao, H. L., & Romao, V. M. C. (2007). Software to optimize surveying networks. In *13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis; 4. IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering* Lisbon.
- Solomon, C. & Breckon, T. (2010). *Fundamentals of digital image processing: a practical approach with examples in Matlab*. John Wiley & Sons.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS J. Photogramm.*, 66, 389–399.
- Stahlberg, C. (1997). Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. *zfv*, 5, 225–235. Wißner, Augsburg.

- Staudinger, M. (1999). *A cost orientated approach to geodetic network optimisation*. Dissertation, Institute for Geoinformation, Faculty of Technical Science, TU Wien, Österreich.
- Teunissen, P. J. G. (1985). *Optimization and Design of Geodetic Networks*, Kapitel Quality control in geodetic networks, (S. 526–547). Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- Torr, P. & Murray, D. (1997). The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix. *Int. J. Comput. Vision*, 24(3), 271–300.
- Tuexsen, H.-H. (2014). Factory calibration and field verification of leica scanners. *Geomatics World*, March / April, 22–25.
- van Gosliga, R., Lindenbergh, R., & Pfeifer, N. (2006). Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 36(5), 167–172.
- Vennebusch, M. (2007). *Singular value decomposition and cluster analysis as regression diagnostics tools in geodetic VLBI*. Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Vennebusch, M., Nothnagel, A., & Kutterer, H. (2009). Singular value decomposition and cluster analysis as regression diagnostics tools for geodetic applications. *J. Geod.*, 83(9), 877–891.
- Walser, B. & Gordon, B. (2013). Der Laserscanner, eine Black-Box? In *Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013)*, DVW Schriftenreihe Band 72/2013: Wißner.
- Wang, J. (2013). *Towards deformation monitoring with terrestrial laser scanning based on external calibration and feature matching methods*. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 308.
- Wang, J., Kutterer, H., & Fang, X. (2012). On the detection of systematic errors in terrestrial laser scanning data. *J. Appl. Geodesy*, 6, 187–192.
- Westermann, T. (2001). *Mathematik für Ingenieure mit Maple, Band 2. Differential- und Integralrechnung für Funktionen mehrerer Variablen, gewöhnliche und partielle Differentialgleichungen, Fourier-Analyse*. Springer, 2 Auflage.
- Wicki, F. (1998). *Robuste Schätzverfahren für die Parameterschätzung in geodätischen Netzen*. Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie and der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Nr. 12894.
- Wicki, F. (2001). Robust estimator for the adjustment of geodetic networks. In A. Carosio & H. Kutterer (Hrsg.), *First International Symposium on Robust Statistics and Fuzzy Techniques in Geodesy and GIS*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie and der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr. 295.
- Wieser, A. (2014). Reliability checking for GNSS baseline and network processing. *GPS Solut.*, 8, 55–66.
- Witte, B. & Schmidt, H. (2004). *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Wälder, O. (2008). *Spezielle Verfahren zur Analyse von raumbezogenen Daten*. Dissertation, TU Dresden. DGK C 625.
- Wolf, H. (1968). *Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate*. Bonn: Dümmler.
- Wolf, H. (1975). *Ausgleichsrechnung. Formeln zur praktischen Anwendung*. Bonn: Dümmler.
- Wolf, H. (1979). *Ausgleichsrechnung II. Aufgaben und Beispiele zur praktischen Anwendung*. Bonn: Dümmler.
- Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., & Reidl, F. (2013). Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner - Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. In *Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Heft 20, 02/2013*. TU München.
- Zainuddin, K., Setan, H., & Majid, Z. (2009). From laser point cloud to surface: data reduction procedure test. *Geoinformation Science Journal*, 9(2), 1–9.
- Zámečnicková, M. & Neuner, H. (2014). Der Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung. In *Schriftenreihe DVW, Band 78: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS 2014)* (S. 69–85).
- Zeimetz, P. & Kuhlmann, H. (2011). Use of parametric models for analyzing ground movement measurements in the rhenish lignite mining area. *World of Mining - Surface & Underground*, 5, 256–264.

- Ziou, D. & Tabbone, S. (1998). Edge detection technique - an overview. *Int. J. Pattern Recognit. Image Anal.*, 8, 537–559.
- Zogg, H. (2008). *Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system*. Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr. 98.