DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 641

Dirk Eling

Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung

München 2009

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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5053-2

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 282, Hannover 2009

DGK Deutsche Geodätische Kommission

bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 641

Terrestrisches Laserscanning
für die Bauwerksüberwachung

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dirk Eling
geboren am 23.07.1974 in Erwitte

München 2009

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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5053-2

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover
ISSN 0174-1454, Nr. 282, Hannover 2009

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 ● Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100
e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Müller
Referent:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hansjörg Kutterer
Korreferenten:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke
	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich

Tag der Einreichung der Arbeit: 21.04.2009
Tag der mündlichen Prüfung: 03.08.2009

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5053-2

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Verwendung des terrestrischen Laserscannings (TLS) für geodätische Überwachungsmessungen. TLS ist ein verhältnismäßig junges geodätisches Messverfahren. Es ermöglicht eine schnelle dreidimensionale Objekterfassung mit einer hohen räumlichen Auflösung und einer Genauigkeit im Millimeter-Bereich. Auf Grund dieser Eigenschaften eignet es sich neben der Modellierung von Bauwerksgeometrien auch zur Bauwerksüberwachung. Ein Vorteil des Verfahrens liegt in der berührungslosen Abtastung des Objekts, d.h. die oftmals aufwändige Bestückung des Messobjekts mit Reflektoren entfällt. Zur geometrischen Bauwerksüberwachung mit TLS ist neben einer geeigneten Modellierung des Messobjekts ein übergeordneter Referenzrahmen erforderlich, um die hochgenaue Registrierung der gemessenen Punktwolken gewährleisten zu können.

Unter diesen Voraussetzungen wurde eine allgemeine Methode für die absolute Bauwerksüberwachung mit TLS entwickelt. Diese gliedert sich in drei Bereiche:

- Deformationsanalyse und Definition eines geodätischen Datums

Eine absolute, geometrische Bauwerksüberwachung erfordert ein stabiles geodätisches Datum. Es wird durch dauerhaft und stabil vermarkte Punkte in der Örtlichkeit realisiert. Um die Stabilität der Punktlagen zu überprüfen, werden zu jeder Messepoche geodätische Messungen durchgeführt. Der statistische Nachweis ihrer Stabilität erfolgt durch eine freie Netzausgleichung mit anschließender Deformationsanalyse.

- Registrierung der Punktwolken

Das Messobjekt wird zu jeder Epoche von mehreren Standpunkten aus gescannt. Die Berechnung absoluter Bauwerksbewegungen aus den Laserdaten setzt eine hochgenaue Registrierung der gemessenen Punktwolken im lokalen geodätischen Datum voraus. Die Schätzung der Transformationsparameter erfolgt über identische Punkte. Es wurden Zielmarken mit einem kreisförmigen Muster entwickelt, deren Mittelpunkte auch bei Zielweiten über 100 m mit hoher Genauigkeit aus den gescannten Punkten abgeleitet werden können. Dies geschieht mittels digitaler Bildanalyse und statistischer Schätzverfahren. Die abgeleiteten Mittelpunkte gehen mit ihren Polarkoordinaten in die Transformation ein. Hierfür werden über eine Varianzkomponentenschätzung die Standardabweichungen bestimmt und im stochastischen Modell verwendet. Zusätzlich werden Kalibrierparameter für die polaren Messelemente in einer Bündelausgleichung über alle Standpunkte geschätzt und, falls signifikant, ins Modell eingeführt.

- Auswertung über Blockgittermodell und lokaler Filterung

Für die Auswertung der registrierten Punktwolken wird einmalig ein Blockgittermodell des Bauwerks erstellt. Die hierzu notwendige Modellierung kann beispielsweise über quadratische Formen erfolgen. Für jede Messepoche werden die mit TLS gemessenen und registrierten Punkte den mathematisch definierten Blöcken zugeordnet und über eine Ebenenausgleichung gefiltert. Schließlich wird ein repräsentativer Punkt pro Block abgeleitet. Bei der gesamten Auswertekette werden die Varianz-Kovarianzmatrizen mitgeführt, so dass eine Abschätzung über die Genauigkeit des abgeleiteten Punktes möglich ist. Als Ergebnis liegt ein reproduzierbarer Punkt mit Varianz-Kovarianzmatrix pro Block für die jeweilige Messepoche vor. Diese Daten können für eine Deformationsanalyse des Bauwerks genutzt werden.

Die Vorteile der entwickelten Methodik liegen in der detaillierten räumlichen Auflösung des zu überwachenden Bauwerks und in der weitgehend automatisierbaren Auswertung. Die Methode wurde an einem praktischen Beispiel erprobt. Als Messobjekt stand die Okertalsperre im Harz zur Verfügung. Dabei handelt es sich um eine Bogenstaumauer mit aufgesetzten Schwergewichtsblöcken. Die Talsperre ist mit einem geodätischen Punktfeld, bestehend aus Beobachtungs-, Sicherungs- und Objektpunkten, ausgestattet. Sie bietet somit gute Voraussetzungen, den Einsatz des Messverfahrens zu testen und mit zuverlässigen Ergebnissen zu vergleichen. Die Modellierung der Mauer erfolgte über ein Ellipsoid. Die Messungen wurden in vier Epochen mit einem Laserscanner GX 3D der Firma Trimble sowie einem Tachymeter TCA 2003 der Firma Leica durchgeführt. Die Epochen werden in der vorliegenden Arbeit ausgewertet und die Ergebnisse analysiert.

Die Ergebnisse unterstreichen das große Potential von TLS für die Bauwerksüberwachung und die praktische Realisierbarkeit der entwickelten Auswertemethodik. Für die vierte Epoche wurden mit einer räumlichen Auflösung von einem Punkt pro Quadratmeter Maueroberfläche über 6000 Punkte bestimmt und somit eine nahezu flächenhafte Abdeckung erzielt. Die berechnete Genauigkeit für diese Epoche ist mit einem mittleren Punktfehler von 2,2 mm um den Faktor drei höher als die Einzelpunktgenauigkeit des eingesetzten Scanners.

Stichworte: Terrestrisches Laserscanning, Bauwerksüberwachung, Registrierung, Zielmarken, mathematische Transformationen, geometrische Modellierung, Instrumentenkalibrierung

Abstract

In this thesis the use of terrestrial laser scanning (TLS) for geodetic monitoring applications is studied. The use of TLS for geodetic measurements is a rather new field of application. Applying this method the three-dimensional form of objects can be measured very fast and with a spatial resolution and accuracy in the range of millimetres. Therefore, this method will also be used for modelling structural geometries as well as for structural monitoring. A further benefit is the remote measurement of objects. A time-intensive and cost-intensive marking of the objects with reflectors is not necessary anymore. In addition, for the geometric structural monitoring using TLS a reference system is required to ensure the precise registration of measured point clouds.

Regarding these requirements a general method for structural monitoring using TLS has been developed. This method can be divided into three parts:

- deformation analysis and definition of a geodetic datum

For an absolute geometrical structural monitoring a geodetic datum is required. Therefore a persistent and reliable reference system close to the object is established. For the analysis of the stability of the reference system geodetic measurements are carried out for each measurement epoch. To get the statistical verification of the stability, the measurements are analysed using a free network adjustment followed by a deformation analysis.

- point cloud registration

In each epoch the object is scanned from different points of view. The analysis of the absolute structural movements out of the laser data requires a precise registration of the point clouds in a local geodetic datum. The transformation parameters are determined by the use of identical points. Therefore circular test targets with a special pattern are developed which allow the measurement of the test target centres from a distance of more than 100 m and their determination with high precision using image analysis techniques and statistical estimation procedures. The polar coordinates of the analysed centres are inserted into the transformation. For this purpose the standard deviations are derived by variance component estimation and are used in the stochastic model. In addition, the calibration parameters for the polar measurement elements are analysed by a bundle adjustment using the measurements of all observation stations. If these parameters are significant, they are introduced to the stochastic model.

- analysis using a voxel model and local filtering

For the analysis of the registered point clouds a voxel model of the structure is once created. The required modelling can be carried out using, e.g., quadratic forms. For each epoch the TLS measurements and the registered point clouds are assigned to the mathematically defined blocks and are filtered using a planar adjustment. Finally, a representative point for each block is derived. The variance-covariance matrices are carried through the complete analysis. This leads to a precise estimation of the derived point accuracy. The result of the analysis of each block is one reproduceable point with its variance-covariance matrix. These data can be used for the deformation analysis of the structure.

The advantages of the developed procedure are a detailed spatial resolution of the monitored structure and the automation of the analysis. An example for the practical use of the method is presented. The analysed structure is the Oker barrage in the Harz. This barrage is an arch dam with a gravity dam put on. The barrage is equipped with a geodetic point field represented by observation and object points. Using these data, the developed method is evaluated. For the modelling of the barrage an ellipsoid is used. The barrage has been measured in four epochs with the laser scanner GX 3D of the company Trimble as well as with the tachymeter TCA 2003 of the company Leica. The measurements of these four epochs are analysed in this thesis.

The results of the analysis show the huge potential of TLS for structural monitoring and the benefits of the presented analysis procedure. In the fourth epoch a spatial resolution of the wall surface of one point per square meter has been reached and more than 6000 points have been determined representing the form of the surface. In this epoch, the calculated average point error is 2.2 mm. This is three times better than the single point measurement accuracy of the used laser scanner.

Keywords: terrestrial laser scanning, structural monitoring, registration, test targets, mathematical transformations, geometric modelling, calibration of instruments

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit geodätischen Überwachungsmessungen von Bauwerken, einem wichtigen Bestandteil der Ingenieurgeodäsie. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verwendung des terrestrischen Laserscannings (TLS) für diesen Aufgabenbereich.

1.1 Motivation

Die etablierten geodätischen Messverfahren für die Bauwerksüberwachung wie Tachymetrie, GPS und Nivellement sind darauf ausgelegt, Koordinaten diskreter Punkte mit hoher Genauigkeit zu messen. Für die Planung, Optimierung, Auswertung und Analyse dieser Messungen existiert eine Reihe von Softwarepaketen am Markt, die das Ergebnis langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit sind.

Mit dem terrestrischen Laserscanning (TLS) steht der Geodäsie ein relativ neues Messverfahren zur Verfügung. Das Messprinzip beruht auf der reflektorlosen Distanzmessung bei gleichzeitiger Bestimmung zweier Raumwinkel. Auf diese Weise kann mit hoher Geschwindigkeit und großer räumlicher Auflösung die Umwelt rasterförmig mit einer Genauigkeit im Millimeter-Bereich aufgenommen werden. Somit wird die klassische punktorientierte Vermessung um eine mehr flächenhafte Erfassung ergänzt. Das Messverfahren wird erfolgreich bei der Datenerfassung für 3D-Stadtmodelle, der Dokumentation technischer Anlagen und für Kontrollvermessungen im Tunnelbau eingesetzt, um nur einige Beispiele zu nennen. In jüngster Zeit wurden einige Untersuchungen und Beispiele über den Einsatz von TLS für Deformationsmessungen veröffentlicht. Dabei handelt es sich überwiegend um Einzellösungen für spezielle Probleme. Mit dieser Arbeit wird eine allgemeine Methode vorgestellt, wie terrestrisches Laserscanning für die absolute Bauwerksüberwachung, d.h. zur Aufdeckung von Bauwerksbewegungen bezüglich eines stabilen Koordinatenrahmens, eingesetzt werden kann. Dabei müssen einige Gesichtspunkte berücksichtigt werden.

Absolute Deformationsmessungen erfordern eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, d.h. Kontrollierbarkeit der Ergebnisse. Klassisch wird dies durch überbestimmte Messungen zu vermarkten punktuellen Zielen erreicht. Mit TLS ist es jedoch nicht möglich, diskrete Punkte anzuzielen. Daher sind neue Auswertekonzepte erforderlich. Denkbar ist eine epochenweise durchgeführte, exakte Modellierung gescannter Objekte mit einem anschließenden Vergleich der Modellparameter. Der Nachteil dieser Vorgehensweise liegt in dem hohen manuellen Aufwand für die meist schwierig zu automatisierende Modellierung.

In dieser Arbeit wird daher ein alternativer Ansatz verfolgt: Durch die einmalige Definition eines Blockgittermodells können mithilfe lokaler Filterungen epochenweise diskrete und reproduzierbare Punkte überbestimmt abgeleitet werden. Für den Nachweis absoluter Deformationen wird ein dauerhaftes, wiederholbares, absolutes, räumliches Bezugssystem benötigt, sodass die einmal definierte Relation zwischen Blockgittermodell und geodätischem Datum langfristig nachweisbar ist. Damit gelingt der Übergang zu der klassisch punktorientierten Sichtweise unter Ausnutzung der Vorteile des Laserscannings, wie z. B. die schnelle, berührungslose Datenerfassung mit hoher räumlicher Auflösung. Ein weiterer Aspekt bei der entwickelten Methode ist die Aufdeckbarkeit systematischer Effekte in den abgeleiteten Punkten. Um den Auswerteansatz im Vergleich zu Arbeiten mit ähnlicher Thematik einordnen und bewerten zu können, werden hierfür geeignete Kriterien formuliert.

Zusammenfassend ergibt sich folgende Zielsetzung: Die Entwicklung einer allgemein fomulierten, automatisierbaren Methode, um mittels terrestrischem Laserscanning räumlich hochauflösende, statistisch bewertbare, absolute Bauwerksdeformationen nachweisen zu können. Durch Praxistests und Ergebnisanalysen soll die Methode verifiziert und zukünftige Arbeitsfelder sollen eingegrenzt werden.

1.2 Gliederung

Die hier entwickelte Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS verwendet allgemeine theoretische Grundlagen und wird durch aktuelle Veröffentlichungen zu den behandelten Themengebieten beeinflusst. Diese Aspekte werden zu Beginn der Arbeit aufgearbeitet. Im weiteren Verlauf wird der methodische Ansatz entwickelt, allgemein formuliert und anschließend die praktische Erprobung an der Okertalsperre im Harz beschrieben und analysiert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst, analysiert und offene Arbeitsfelder benannt. Im Einzelnen sind die nächsten Kapitel wie folgt aufgebaut:

Kapitel 2 führt Terrestrisches Laserscanning als Messverfahren ein. Aktuelle Gerätetypen werden dargestellt und nach Einsatzbereichen sowie Funktionsweisen eingeteilt. Die Registrierung gemessener Punktwolken erfolgt über räumliche Transformationen. Hierzu werden verschiedene Ansätze vorgestellt und die Ermittlung der Transformationsparameter über identische Punkte und korrelationsbasierte Ansätze wird beschrieben. Im weiteren Verlauf wird die Flächenbildung durch Dreiecksvermaschung, quadratische Formen und NURBS behandelt. Auf einen Überblick zu möglichen systematischen Abweichungen und Fehlerquellen von Laserscannern folgt eine Zusammenfassung aktueller Ansätze zu Genauigkeitsuntersuchungen und Kalibrierungen.

Kapitel 3 befasst sich mit der geodätischen Überwachung von Bauwerken. Der erste Teil gibt einen allgemeinen Überblick zum Themengebiet Überwachungsmessungen. Es werden Arten von Deformationen sowie Aspekte der zeitlichen und räumlichen Diskretisierung von Bauwerken erläutert. Darauf folgen kurze Ausführungen zu Auswertemodellen sowie die Gegenüberstellung von relativen und absoluten Deformationen bevor das Kongruenzmodell ausführlich dargestellt wird. Der zweite Teil von Kapitel 3 widmet sich speziell der Bauwerksüberwachung mit TLS. Aktuelle Ansätze werden diskutiert und analysiert. Abschließend werden allgemeine Anforderungen an eine Bauwerksüberwachung mit TLS formuliert.

In Kapitel 4 wird die allgemeine Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS entwickelt. Zu Beginn wird sie in einem Flussdiagramm zusammengefasst, dessen Arbeitsschritte in den einzelnen Unterkapiteln behandelt werden. Außerdem wird der für die praktische Erprobung verwendete Scanner ausführlich auf systematische Effekte untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in den im Anschluss entwickelten Ansatz zur Registrierung von Punktwolken ein. Der Ansatz beruht auf der Transformation über identische Punkte, deren Koordinaten über Scans spezieller Zielmarken abgeleitet wird. Die Konstruktion dieser Zielmarke und die Ableitung ihres Mittelpunkts für die Transformation werden ausführlich hergeleitet. Für die Transformation gehen diese Koordinaten als Polarkoordinaten ein, deren Genauigkeit über eine Varianzkomponentenschätzung bestimmt und für die Kalibrierparameter im Rahmen der Registrierung geschätzt werden. Die anschließenden Ausführungen behandeln die Erstellung eines Blockgittermodells und die Ableitung reproduzierbarer Punkte für einen Epochenvergleich. Hierzu werden die registrierten Punkte verschiedener Standpunkte den Blöcken zugeordnet, lokal gefiltert und gewichtet gemittelt. Abschließend werden Überlegungen zur Automatisierbarkeit der entwickelten Methode angestellt.

Kapitel 5 beschreibt die praktische Umsetzung der entwickelten Methode an der Okertalsperre im Harz. Hierzu wird zunächst das Bauwerk mit seinem bestehenden Überwachungskonzept dargestellt. Anhand der Ergebnisse einer ersten Messkampagne mit TLS an der Talsperre wird das Blockgittermodel für die weitere Auswertung entwickelt. Es wurden zu vier Epochen tachymetrische und Scanner-Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse der einzelnen Epochen hinsichtlich der Datumsfestlegung, Registrierung, der abgeleiteten Blockpunkte und Epochenvergleiche werden ausführlich beschrieben und diskutiert. Auftretende Differenzen zwischen den Auswertungen werden analysiert. In diesem Rahmen werden u.a. Untersuchungen zu einer alternativen Registrierung der Punktwolken über einen ICP-Algorithmus vorgestellt.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Entwicklung der Methode und ihrer praktischen Umsetzung zusammengefasst. Die Ergebnisse werden auch anhand der formulierten Ziele abschließend bewertet und zukünftige Arbeitsschritte vorgeschlagen.

2 Terrestrisches Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist eine vergleichsweise junge Technologie. Sie findet Anwendung bei der 3D-Erfassung der Umwelt im Entfernungsbereich von wenigen Metern bis hin zu einigen hundert Metern. In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt, um TLS für die absolute Bauwerksüberwachung einzusetzen. Überwachungsmessungen stellen hohe Anforderungen an die Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit der Beobachtungen und verlangen daher vertiefte Kenntnisse über die verwendeten Messverfahren sowie fundierte Planungen und Auswerteverfahren. Diese Gesichtspunkte werden im Laufe der Arbeit ausführlich behandelt.

Das Messprinzip von TLS beruht auf reflektorloser Distanzmessung bei gleichzeitiger Bestimmung von zwei Raumwinkeln, sodass lokale dreidimensionale Koordinaten abgeleitet werden können. Im Gegensatz zu elektrooptischen Tachymetern können mit terrestrischen Laserscannern (im Folgenden auch kürzer mit Laserscanner oder Scanner bezeichnet) diskrete Punkte nicht gezielt beobachtet werden. Stattdessen wird die Umgebung mit hoher Geschwindigkeit in definierten Schritten rasterförmig erfasst. Das Ergebnis einer Messung mit einem Laserscanner ist eine so genannte Punktwolke. Ergänzend zu den dreidimensionalen Koordinaten erhält der Nutzer einen Remissionswert (Intensitätswert) pro Punkt, der die Reflektivität des gemessenen Objektes beschreibt. Aus diesem Grund spricht man auch von 4D-Laserscanning (STAIGER 2005B). Zusätzlich sind die heutigen Laserscanner vielfach mit Digitalkameras ausgestattet, die eine fotorealistische Einfärbung der Punktwolke ermöglichen. Das Einsatzspektrum ist breit. Es reicht von industriellen Anwendungen im Nahbereich bis hin zur Überwachung von Rutschungshängen. Für die einzelnen Aufgaben kommen unterschiedliche Typen von Scannern zum Einsatz. Dabei wird zwischen statischem und kinematischem Laserscanning unterschieden. Kapitel 2.1.1 erläutert diesen Gesichtspunkt näher und stellt typische Anwendungsbereiche vor. Eine Einteilung nach weiteren Kriterien folgt im Anschluss. Dabei wird auf die unterschiedlichen Methoden der reflektorlosen Distanzmessung eingegangen sowie eine Unterscheidung nach der Strahlablenkung bzw. den Gesichtsfeldern der gängigen Scanner vorgenommen.

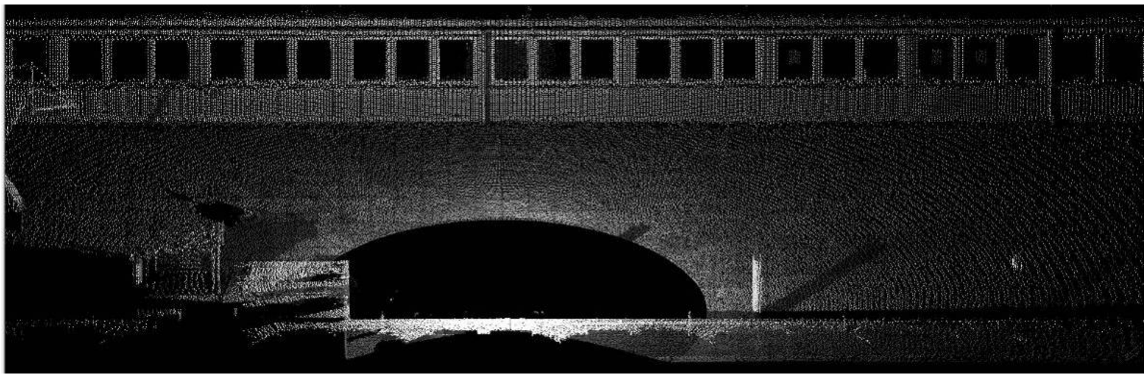


Abbildung 2.1: Beispiel einer Punktwolke

Abbildung 2.1 zeigt das Beispiel einer Punktwolke, beobachtet auf dem Dach des Geodätischen Instituts in Hannover. Der schwarze Halbkreis resultiert aus dem eingeschränkten Blickfeld des eingesetzten Scanners. Darauf wird in Kapitel 2.1.3 näher eingegangen. Für eine vollständige Objekterfassung sind oftmals mehrere Scannerstandpunkte erforderlich. Kapitel 2.2 befasst sich mit der Verknüpfung und Georeferenzierung von Laserscans. Es werden räumliche Transformationsverfahren behandelt und verschiedene Methoden zur Bestimmung von Transformationsparametern vorgestellt. Kapitel 2.3 stellt Ansätze zur Verarbeitung von Punktwolken, insbesondere zu deren flächenhafter Modellierung vor. Abschnitt 2.4 behandelt Geräteuntersuchungen von Laserscannern und Kalibrieransätze.

2.1 Einteilung

Das Funktionsprinzip terrestrischer Laserscanner beruht auf der reflektorlosen Distanzmessung bei gleichzeitiger Bestimmung zweier Raumwinkel. In der Literatur werden die verschiedenen Scannertypen nach den Verfahren zur Bestimmung dieser Polarelemente klassifiziert. In letzter Zeit nimmt neben dem statischen Laserscanning die Bedeutung von kinematischen Anwendungen zu. Auf diesen Aspekt wird zunächst eingegangen.

2.1.1 Statisches und kinematisches Laserscanning

Eine Möglichkeit Laserscanner einzuteilen, ist die Unterscheidung zwischen statischen und kinematischen Laserscans. Bei statischen Scans sind während der Messung Scanner und Objekt räumlich stabil. Bei kinematischen Scans bewegen sich der Scanner, das Objekt oder beide zugleich. Abbildung 2.2 zeigt typische Anwendungsbereiche statischer und kinematischer Laserscans. Ein Beispiel für kinematische Laserscans mit bewegtem Scanner und stabiler Umgebung ist die Aufnahme und Kontrolle von Gleisanlagen (INGENSAND 2006). Messungen schneller Deformationen mit Laserscannern sind eine Anwendung von kinematischen Laserscans mit stabilem Scanner und bewegtem Objekt. Sie kommen bei der Überwachung von Brücken, Schleusentoren und Türmen zum Einsatz (KUTTERER & HESSE 2006). Statisches Laserscanning hat ein breiteres Anwendungsspektrum. Eine Differenzierungsmöglichkeit bietet die Unterteilung in drei Entfernungsbereiche. Große Reichweiten (150 – 1500 m) treten beim Monitoring von Rutschungshängen und Gletschern, aber auch bei der Überwachung ausgedehnter Bauwerke, wie Talsperren und Kühltürmen (IOANNIDIS U. A. 2006) auf. Mittlere Reichweiten (50 – 150 m) finden beispielsweise beim Facility Management zur Erstellung einer digitalen Fabrik (PATZAD 2005) Anwendung.

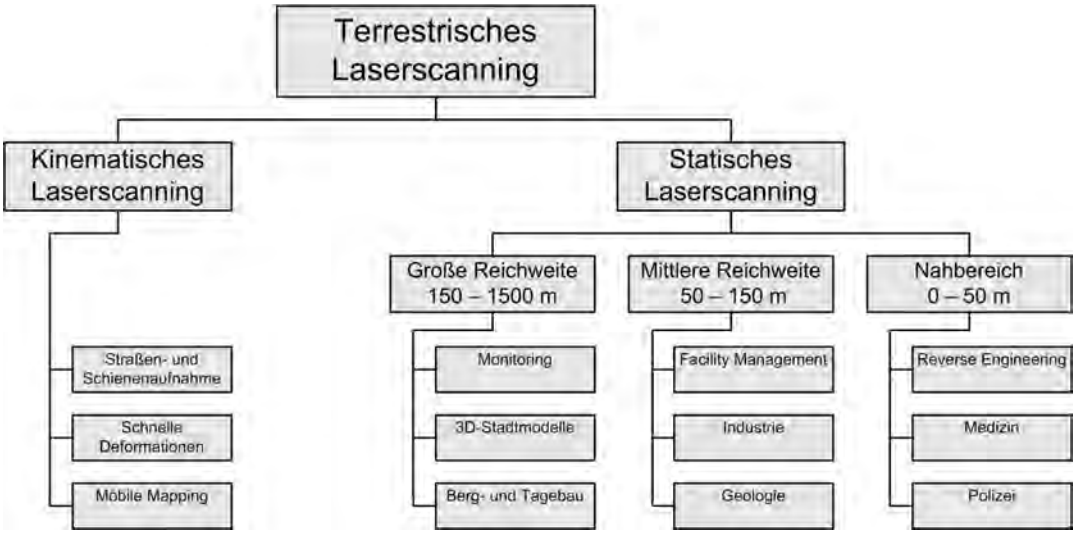


Abbildung 2.2: Anwendungsbereiche für Statisches und Kinematisches Laserscanning nach INGENSAND 2006

Im Nahbereich (0 – 50 m) kommen terrestrische Laserscanner in der industriellen Entwicklung bei der Flächenrückführung (Reverse Engineering) oder auch in der Kriminaltechnik zur Tatortaufnahme zum Einsatz. Weitere Anwendungsbereiche sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

2.1.2 Unterscheidung nach Streckenmessmethode

Bei terrestrischen Laserscannern kommen prinzipiell drei verschiedene Streckenmessmethoden zum Einsatz. Sie zählen zu den reflektorlos messenden Verfahren und werden z.B. bei KERN 2003 ausführlich beschrieben. Kurz lassen sie sich wie folgt charakterisieren:

- Triangulationsverfahren

Beim Triangulationsverfahren beruht die Streckenmessung auf dem geometrischen Prinzip der Messung eines parallaktischen Winkels bei bekannter Basislänge. Der Laserstrahl wird unter einem bestimmten Winkel ausgesendet, von einem Objekt reflektiert und trifft auf eine lichtempfindliche Diode im Scanner. Die Streckenlänge zwischen Aussendeoptik und getroffener Diode stellt die Basis dar. Über trigonometrische Beziehungen lässt sich die Entfernung zum Objekt ableiten. Die Genauigkeit der Entfernungsmessung ist stark abhängig vom Verhältnis der Basislänge zur Objektentfernung. Sie liegt beispielsweise für das Modell S25 vom Hersteller Mensi (inzwischen Trimble) bei 0,3 mm bis 30 mm bei Objektentfernungen von 2 bis 25 Metern. Mit diesem Instrument können bis zu 100 Punkte pro Sekunde gemessen werden. Das Triangulationsverfahren wird aufgrund seiner hohen Genauigkeit bei geringer Reichweite hauptsächlich in der industriellen Messtechnik eingesetzt. Stärker verbreitet sind Laserscanner, die Streckenlängen nach den beiden nächstgenannten Methoden messen.

- Phasenvergleichsverfahren

Das Phasenvergleichsverfahren basiert auf der Modellierung einer kontinuierlichen elektromagnetischen Trägerwelle. Es wird neben einigen Laserscanner-Typen vor allem bei elektronischen Tachymetern standardmäßig zur Streckenmessung verwendet. Detailliert wird das Verfahren unter anderem bei WITTE & SCHMIDT 2006 und DEUMLICH & STAIGER 2002 beschrieben. An dieser Stelle sei nur das Grundprinzip erklärt. In Abbildung 2.3 ist die Funktionsweise dargestellt. Der von einem Sender emittierten Lichtwelle mit der Trägerwellenlänge λ_T wird durch Amplitudenmodulation eine zweite Welle mit der Modulationswellenlänge λ_M überlagert. Der ausgesendete Lichtstrahl wird von einem Objekt reflektiert und trifft auf den Empfänger. Das Doppelte der gesuchten Streckenlänge d setzt sich aus den ganzzahligen Sinusschwingungen der modulierten Welle und einer nicht vollständigen Schwingung $\Delta\lambda_M$, der Phasenverschiebung, zusammen. Bei der praktischen Umsetzung liegt ein wesentliches Problem in der Zählung der ganzen Wellendurchgänge. Dies wird häufig durch die Überlagerung der Trägerwelle mit nicht nur einer Modulationswellenlänge, sondern mit mehreren Wellen unterschiedlicher Schwingungslängen gelöst. Mit diesem Messprinzip können bei der Streckenmessung auf Reflektoren Reichweiten bis zu mehreren Kilometern erzielt werden.

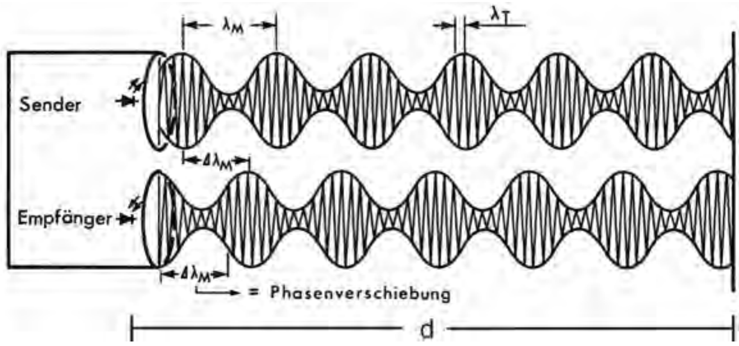


Abbildung 2.3: Prinzip der Distanzmessung nach dem Phasenvergleichsverfahren (nach WITTE & SCHMIDT 2006)

Bei Laserscannern wird oft mit zwei, bzw. drei Modulationswellenlängen gearbeitet. Das Modell Imager 5006 von Zoller+Fröhlich erzielt damit beispielsweise Reichweiten von bis zu 79 Meter bei Messfrequenzen von bis zu 500 KHz. Das Messrauschen liegt bei ca. 3 mm für eine Entfernung von 25 m. Es ist ein Maß für die Streuung der Punkte, beispielsweise bei der Messung auf eine ebene Fläche.

- Impulsverfahren

Das Impulsverfahren basiert auf der Laufzeitmessung eines Laserimpulses. Vom Sender wird ein Impuls mit bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit ausgesandt, von einem Objekt reflektiert und vom Empfänger wieder aufgenommen. Der zeitliche Abstand zwischen Aussenden und Empfangen wird gemessen und daraus die gesuchte Strecke d abgeleitet.

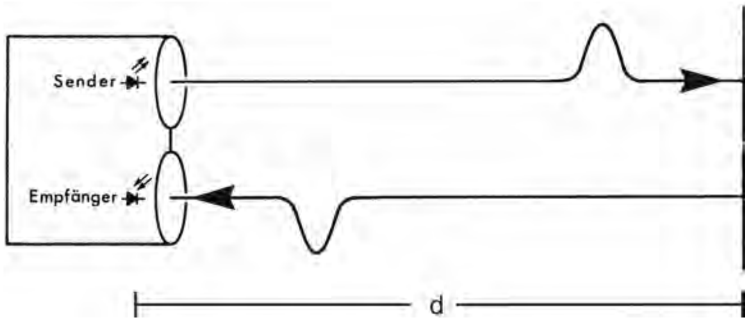


Abbildung 2.4: Prinzip der Distanzmessung nach dem Impulsverfahren (WITTE & SCHMIDT 2006)

Gegenüber dem Phasenvergleichsverfahren weist das Impulsverfahren bei Laserscannern eine geringere Messfrequenz (<= 50 KHz) bei einer größeren Reichweite auf. So können mit den aktuellen Instrumenten von Trimble und Leica Strecken bis zu 400 Meter gemessen werden, das Modell Ilris 3D von der Firma Optech kann sogar Entfernungen größer 1500 Meter bestimmen. Bezüglich der Genauigkeit des Impulsverfahrens geben die Laserscanner-Hersteller ein Messrauschen von 2 bis 5 mm bei einer Entfernung von 50 Metern an.

Für die in dieser Arbeit behandelte Bauwerksüberwachung mit terrestrischen Laserscannern eignen sich Instrumente, die nach dem Phasenvergleichsverfahren oder dem Impulsverfahren arbeiten. Mit steigender Bauwerksgröße haben die Impulslaser aufgrund ihrer größeren Reichweite Vorteile. Für den Nachweis schneller Deformationen werden Distanzen bevorzugt mit dem Phasenvergleichsverfahren gemessen, da es deutlich höhere Abtastraten ermöglicht.

2.1.3 Unterscheidung nach Gesichtsfeld und Strahlablenkung

Neben der räumlichen Distanz werden mit terrestrischen Laserscannern zwei Raumwinkel gemessen, um daraus dreidimensionale kartesische Koordinaten abzuleiten. Die Messelemente sind auch als Kugel- bzw. Polarkoordinaten bekannt. Sie werden mit Polabstand oder Zenitwinkel θ, Richtungswinkel φ und Raumstrecke d bezeichnet. Methoden zur Messung der Raumstrecke d wurden im vorangehenden Kapitel behandelt. Die unterschiedlichen Varianten der Strahlablenkung zur Bestimmung der beiden Raumwinkel θ und φ bilden ebenso wie das Gesichtsfeld eine weitere Möglichkeit, Laserscanner zu klassifizieren. Abbildung 2.5 zeigt den geometrischen Zusammenhang zwischen Kugelkoordinaten und kartesischen Koordinaten. Beide Varianten, Punkte im Raum zu definieren, lassen sich leicht ineinander umrechnen. Im Laufe dieser Arbeit wird dies häufiger verwendet, beispielsweise für die Einführung von Polarkoordinaten in die Ähnlichkeitstransformation zur Referenzierung von Laserscans in Kapitel 4.2.3.

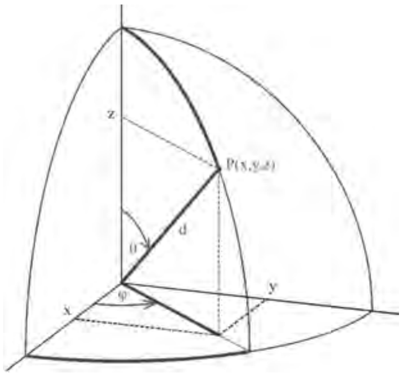
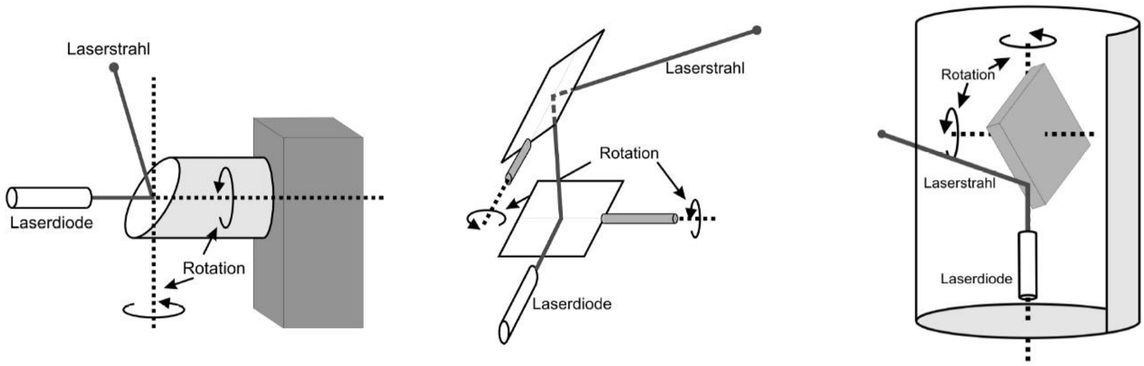


Abbildung 2.5: Kugelkoordinaten und räumliche kartesische Koordinaten

Die Umrechnungsvorschrift zwischen Kugelkoordinaten und kartesischen Koordinaten und lautet in Vektorschreibweise nach MERZIGER 1996:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi \\ d \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi \\ d \cdot \cos\theta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} d \\ \theta \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \arccos\left(z/d \right) \\ \arctan\left(y/x \right) \end{bmatrix}. \tag{2.1}$$

Drei übliche Verfahren zur Strahlablenkung sind in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Modellvorstellung der Kugelkoordinaten mit den beiden sich im Koordinatenursprung schneidenden, orthogonalen Achsen x und z, von denen aus die zwei Raumwinkel gemessen werden, lässt sich nur bedingt auf die Varianten A – C übertragen. In Variante A wird der Laserstrahl in Richtung der x-Achse emittiert, trifft auf einen rotierenden, um 45° angeschrägten Spiegel und wird dadurch orthogonal abgelenkt. Die Rotation des Spiegels bestimmt den Zenitwinkel. Die Variation des Horizontalwinkels erfolgt durch die Drehung des Systems um seine Stehachse. Die beiden rotierenden Achsen schneiden sich in einem Punkt, der gleichzeitig Nullpunkt der Streckenmessung ist. Damit ist das Modell der Kugelkoordinaten vollständig abgebildet. Das konstante Offset zwischen Schnittpunkt und Laserdiode wird bei der Distanzmessung berücksichtigt.



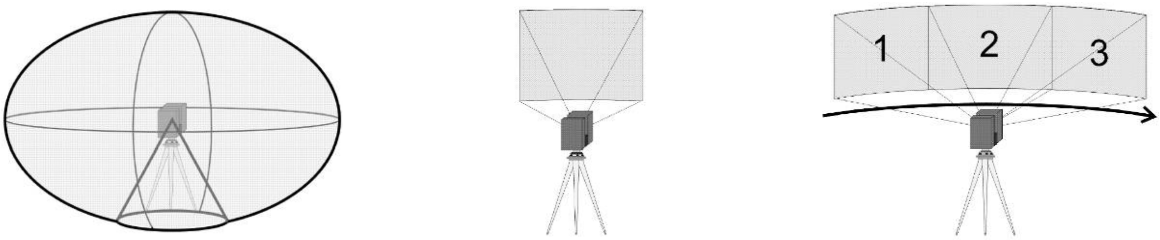
A) Rotierender, angeschrägter Spiegel | B) Oszillierende Spiegel | C) Rotierender/Oszillierender Polygonspiegel

Abbildung 2.6: Unterscheidung nach Strahlablenkung (HESSE 2007)

Bei Variante B beruht die Strahlablenkung auf zwei oszillierenden Planspiegeln, deren Drehachsen orthogonal zueinander stehen und sich nicht in einem Punkt schneiden. Das bei der Streckenmessung zu berücksichtigende Offset ist eine Funktion des ersten Drehwinkels. Daher ist die Umrechnung in das System der Kugelkoordinaten bei dieser Umsetzung weitaus komplexer.

Bei Variante C wird der Laserstrahl in Richtung der Z-Achse ausgesendet, trifft auf einen oszillierenden, bzw. rotierenden Polygonspiegel und wird dadurch abgelenkt. Der Zenitwinkel ist eine Funktion der Form und Lage des Polygonspiegels. Die Ablenkung des Lasers in Richtung des Horizontalwinkels erfolgt wie bei Variante A durch Drehung des Systems um seine Stehachse. Die beiden Rotationsachsen schneiden sich ebenfalls nicht in einem Punkt. Das Offset der Streckenmessung ist wie der Zenitwinkel eine Funktion von Form und Lage des Polygonspiegels.

Das Gesichtsfeld kennzeichnet den maximalen Aufnahmebereich eines Scanners, beschrieben durch die Wertebereiche der beiden Raumwinkel. Die theoretischen Grenzen liegen bei 360° für Richtungswinkel und Zenitwinkel, wobei je nach Scannertyp nur einer der beiden Raumwinkel einen Vollkreis beschreibt. Man unterscheidet im Allgemeinen die in Abbildung 2.7 gezeigten Typen.



Panoramascanner Kamerascanner Hybridscanner

Abbildung 2.7: Unterscheidung nach Gesichtsfeld (HESSE 2007)

Panoramascanner ermöglichen eine fast vollständige Erfassung ihrer Umgebung. Eine kegelförmige Begrenzung des Gesichtfelds rund um den Standpunkt resultiert aus einer Abschattung durch den Scanner selbst. Die Strahlablenkung in Richtung der Stehachse erfolgt bei aktuellen Scannern dieser Bauart nach Variante A. Eine zusätzliche Drehung des Instruments in festen Schrittweiten um seine Stehachse bestimmt den zweiten Raumwinkel (Abbildung 2.6, A). Bei lotrechter Aufstellung des Scanners wird somit die Umgebung durch Einzelmessungen in vertikalen 360°-Profilen abgetastet, sodass eine 180°-Drehung um die Stehachse für eine komplette Abdeckung ausreicht. Als Streckenmessmethode verwenden Panoramascanner in der Regel das Phasenvergleichsverfahren. Aufgrund der hohen Messfrequenz bei eingeschränkter Reichweite eignen sie sich besonders zur schnellen und vollständigen Erfassung von Innenräumen, Industrieanlagen und als Erfassungssensor in Mobile-Mapping-Systemen. Zwei aktuelle Produkte sind der Imager 5006 von Zoller+Fröhlich sowie der LS 880 von Faro. Weitere Informationen zu diesen Scannern finden sich auf den Herstellerwebseiten.

Kamerascanner besitzen im Vergleich zu Panoramascannern ein deutlich eingeschränktes Gesichtsfeld. Die Strahlablenkung erfolgt über zwei oszillierende Spiegel (Abbildung 2.6, B). Deren Arbeitsbereich bestimmt das Gesichtsfeld des Scanners. Eine Drehung um die Stehachse findet nicht statt. Ein aktueller Vertreter dieses Typs ist das Modell Ilris-3D der Firma Optech. Er besitzt ein Gesichtsfeld von 40° für beide Raumwinkel. Als Streckenmessmethode wird das Impulsverfahren mit einer Reichweite von bis zu 1500 Metern verwendet. Um die Nachteile des eingeschränkten Gesichtsfelds zu kompensieren, kann der Scanner mit einer rotierenden Basis und einer Schwenkeinrichtung kombiniert werden. Auf diese Weise kann schrittweise ein größerer Ausschnitt der Umgebung gescannt werden. Aufgrund seiner sehr großen Reichweite eignet sich dieser Scanner besonders für die Erfassung und Überwachung langgestreckter Bauwerke wie Brücken, aber auch natürlicher, schlecht zugänglicher Objekte wie Rutschungshänge oder Gletscher.

Eine Weiterentwicklung der Kamerascanner stellen die Hybridscanner dar. Die Strahlablenkung in Richtung des Zenitwinkels erfolgt über einen oszillierenden Spiegel oder ein rotierendes, bzw. oszillierendes Spiegelpolygon (Abbildung 2.6, C). Das Gesichtsfeld ist für diesen Raumwinkel eingeschränkt. Der Arbeitsbereich des Horizontalwinkels liegt hingegen bei 360°, da Instrumente dieses Typs ähnlich wie die Panoramascanner in festen Schrittweiten um die Stehachse rotieren. Als Streckenmessverfahren kommt das Impulsverfahren zum Einsatz. Aktuelle Systeme dieser Bauart gibt es beispielsweise von Leica, Trimble und Riegl. Aufgrund ihrer Eigenschaften eignen sich Hybridscanner zur Erfassung und Überwachung räumlich ausgedehnter Bauwerke.

Am Geodätischen Institut in Hannover standen zum Zeitpunkt der Geräteuntersuchungen und praktischen Anwendungen der in dieser Arbeit entwickelten Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS zwei Laserscanner zur Verfügung: Der Panoramascanner Imager 5003 von Zoller+Fröhlich mit einer maximalen Zielweite von 53 m sowie der Impulsscanner GX 3D von Trimble mit einer maximalen Zielweite von 200 m bzw. 350 m bei geringeren Genauigkeiten. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Okertalsperre, die als Überwachungsobjekt ausgewählt wurde, kam von den beiden Instrumenten nur der Trimble-Scanner in Frage. Daher wurden die in Kapitel 4.1 beschriebenen Geräteuntersuchungen und die in Kapitel 5 präsentierten Testmessungen mit dem GX 3D durchgeführt. Das Instrument kann der

Gruppe der Hybridscanner zugeordnet werden. Es ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die vertikale Strahlablenkung ist durch einen oszillierenden Spiegel realisiert, der ein Bestandteil der patentierten Scanningoptik von Trimble ist. Weitere Informationen zum geräteinternen Strahlverlauf sowie automatisch angebrachten Korrekturen an die rohen Messwerte werden vom Hersteller nicht kommuniziert.

Abbildung 2.8: Trimble GX 3D (Quelle: Trimble)

Die folgende Tabelle fasst einige technische Daten des Scanners zusammen.

Tabelle 2.1: Technische Daten des Trimble GX 3D (Herstellerangaben)

Lasertyp:	Impulslaser, 532 nm, grüner Laser
Reichweite:	200 m (Standard), 350 m (maximal)
Standardabweichung der Streckenmessung:	1,4 mm @ 50 m; 2,5 mm @ 100 m; 3,6 mm @ 150 m
Standardabweichung der Richtungsmessung:	3,7 mgon horizontal; 4,3 mgon vertikal
Räumliche Auflösung:	3,2 mm @ 100 m
max. Scangeschwindigkeit:	5.000 Punkte/Sekunde
Gesichtsfeld (Vertikal/Horizontal):	60°/360°
Ausstattungsmerkmale:	Elektronischer Zweiachskompensator, integrierte Videokamera

2.2 Verknüpfung und Georeferenzierung - Registrierung

Bei Messungen mit terrestrischen Laserscannern liegen die Ergebnisse, Koordinaten und Intensitätswerte zunächst in einem lokalen kartesischen dreidimensionalen Scanner-System vor. Es ist definiert durch den Ursprung im Gerätezentrum, die Orientierung der drei Koordinatenachsen und einen Gerätemaßstab der Distanzmessung. Bei den meisten Instrumenten fällt die z-Achse des lokalen Systems mit der Stehachse des Scanners zusammen. In Abbildung 2.9 ist eine typische Aufnahmekonfiguration schematisch dargestellt. Ein im Grundriss quadratisches, räumliches Objekt wird gescannt. Um das Objekt vollständig zu erfassen, reicht ein Scanner-Standpunkt nicht aus. Das Beispiel zeigt drei Standpunkte S_1-S_3 sowie ein übergeordnetes Koordinatensystem G.

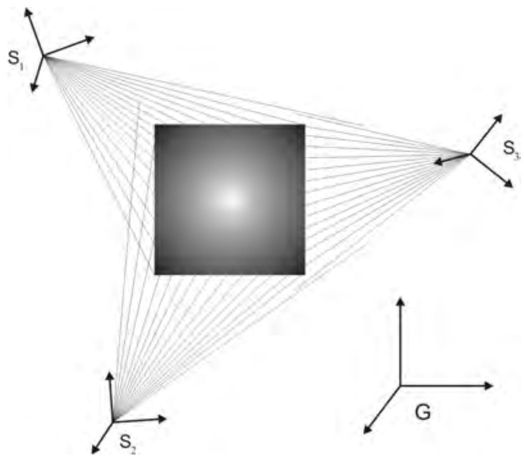


Abbildung 2.9: Aufnahmekonfiguration zur vollständigen Objekterfassung

Als Ergebnis der Messungen liegen drei Punktwolken vor. Sie enthalten teilweise überlappende Objektausschnitte, aufgenommen aus drei verschiedenen Richtungen. Für eine Weiterverarbeitung der Scannerdaten, ist es meist erforderlich, alle Punkte in ein einheitliches Koordinatensystem zu transformieren. Wird als gemeinsames Koordinatensystem ein beliebiges lokales System ohne festen Bezug zur Umgebung gewählt (beispielsweise eines der drei Scannersysteme S_1-S_3), so nennt man diesen Vorgang Standpunktverknüpfung. Erfolgt die Transformation aller Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem (beispielsweise ein amtliches Landessystem), spricht man von Georeferenzierung. Die Kombination der beiden Arbeitsschritte Standpunktverknüpfung und Georeferenzierung wird als Registrierung bezeichnet. In der Literatur werden die Begriffe nicht einheitlich verwendet. Die hier vorgestellte und in der Arbeit weiterhin benutzte Definition wird beispielsweise von STAIGER 2005B und RESHETYUK 2009 gebraucht.

Beide Arbeitsschritte, Verknüpfung und Georeferenzierung, basieren auf mathematischen Transformationen. Es gibt verschiedene Ansätze, die benötigten Transformationsparameter zu bestimmen. Weit verbreitet ist die Ableitung identischer Punkte über Zielmarken und die anschließende Schätzung der Transformationsparameter nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate. Andere Methoden beruhen auf der Nutzung bekannter aber auch unbekannter geometrischer Merkmale. Nach einer allgemeinen Einführung zu räumlichen Transformationen werden im Folgenden einige Verfahren zur Bestimmung der Transformationsparameter vorgestellt. In aktuellen Arbeiten (z.B. HESSE 2007) erfolgt die Georeferenzierung von kinematischen Laserscans über eine Navigationslösung. Dabei werden die benötigten Orientierungsparameter direkt gemessen und durch eine Kalman-Filterung optimiert. Für Aufgaben der Bauwerksüberwachung sind die dabei erzielbaren Genauigkeiten nicht ausreichend, daher wird diese Methode hier nicht weiter vertieft.

2.2.1 Räumliche Transformationen

Unter einer Transformation im geodätischen Sinne wird im Allgemeinen die eindeutige Abbildung der Koordinaten geodätischer Punkte von einem Koordinatensystem in ein anderes verstanden (WELSCH U. A. 2000). Mit Laserscannern werden dreidimensionale Punktkoordinaten in kartesischen, also geradlinigen, orthogonalen Koordinatensystemen bestimmt. Als mögliche Transformationsparameter kommen daher eine Verschiebung (Translation) des Ursprungs in den drei Koordinatenrichtungen, Rotationen um die drei Achsen sowie ein Maßstabsfaktor in Betracht. Eine solche Transformation ist durch sieben Parameter festgelegt. Sie wird als räumliche Ähnlichkeitstransformation, als 3D-Helmerttransformation oder als 7-Parameter-Transformation bezeichnet. Abbildung 2.10 zeigt schematisch eine Ähnlichkeitstransformation zwischen zwei Koordinatensystemen. Der Punkt P ist in beiden Systemen durch seinen Ortsvektor ($\mathbf{x}_P$ bzw. $\mathbf{X}_P$) definiert.

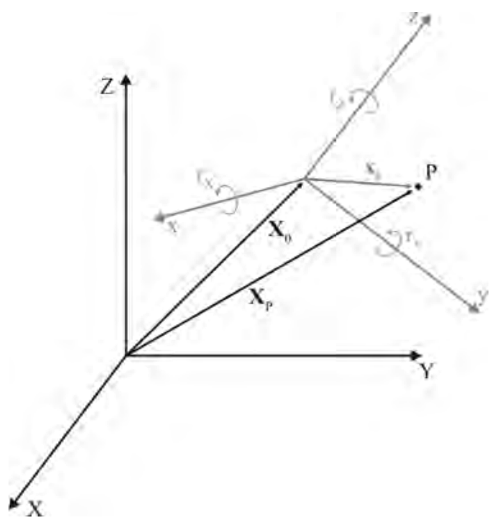


Abbildung 2.10: Räumliche Ähnlichkeitstransformation

Das zu transformierende System (Ausgangssystem) ist in Grau und mit Kleinbuchstaben (xyz), das Zielsystem ist in Schwarz und mit Großbuchstaben (XYZ) gekennzeichnet. Das graue System kann auf das schwarze abgebildet werden, indem zunächst die drei Koordinatenachsen durch Rotationen um die drei so genannten Eulerwinkel (r_x, r_y, r_z) parallel gestellt werden. Anschließend können durch Verschieben des Ursprungs ($\mathbf{X}_0$) die drei Achsen beider Systeme zur Deckung gebracht werden. Um die Skalen der Koordinatenachsen zu vereinheitlichen, kann zusätzlich ein Maßstabsfaktor m eingeführt werden. In Matrizenschreibweise lautet die Transformationsvorschrift für den Punkt P:

$$\mathbf{X}_P = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}_P \qquad (2.2)$$

bzw. ausgeschrieben:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_0 + (1+m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_P . \tag{2.3}$$

R bezeichnet die Drehmatrix. Sie setzt sich aus den drei Drehungen um die Koordinatenachsen zusammen, die nacheinander durchgeführt werden. Die Reihenfolge ist nicht beliebig. In dieser Arbeit wird, wenn nicht anders erwähnt, folgende Drehreihenfolge verwendet:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_z &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & \sin r_x \\ 0 & -\sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & -\sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos r_z & \sin r_z & 0 \\ -\sin r_z & \cos r_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos r_y \cos r_z & \cos r_y \sin r_z & -\sin r_y \\ \sin r_x \sin r_y \cos r_z - \cos r_x \sin r_z & \sin r_x \sin r_y \sin r_z + \cos r_x \cos r_z & \sin r_x \cos r_y \\ \cos r_x \sin r_y \cos r_z + \sin r_x \sin r_z & \cos r_x \sin r_y \sin r_z - \sin r_x \cos r_z & \cos r_x \cos r_y \end{bmatrix} . \end{aligned} \tag{2.4}$$

Es wird zunächst die Drehung um die z-, dann um die y- und schließlich um die x-Achse durchgeführt. Die Rotationsmatrix **R** ist orthonormal, d.h. sie hat die folgende Eigenschaft:

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1} . \tag{2.5}$$

Die Bestimmung der sieben Transformationsparameter erfolgt meist über identische Punkte in beiden Koordinatensystemen. Pro identischen Punkt können entsprechend Formel (2.3) drei Gleichungen aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} f_{i_1}(\mathbf{l}) &: X_i = X_0 + m \cdot (r_{11} x_i + r_{12} y_i + r_{13} z_i) \\ f_{i_2}(\mathbf{l}) &: Y_i = Y_0 + m \cdot (r_{21} x_i + r_{22} y_i + r_{23} z_i) \\ f_{i_3}(\mathbf{l}) &: Z_i = Z_0 + m \cdot (r_{31} x_i + r_{32} y_i + r_{33} z_i) \quad i = 1, 2, ..., n \end{aligned} . \tag{2.6}$$

Für eine eindeutige Lösung werden sieben Gleichungen, entsprechend sieben Koordinaten, von wenigstens drei identischen Punkten benötigt, die nicht auf einer Geraden liegen. Sind mehr Punkte und somit mehr als sieben Gleichungen vorhanden, liegt ein überbestimmtes Gleichungssystem vor. Eine gebräuchliche Lösung zur Schätzung der überbestimmten Transformationsparameter ist die Ausgleichung nach kleinsten Quadraten im Gauß-Markov-Modell. Als Beobachtungen dienen die Koordinaten des Zielsystems. Sie werden im Beobachtungsvektor **l** zusammengefasst. Die ausgeglichenen Parameter werden so geschätzt, dass nach der Transformation die Abstände zwischen den Koordinaten der identischen Punkte in beiden Systemen (Restklaffungen bzw. Restklaffen) in ihrer Quadratsumme minimal sind. Die Restklaffungen entsprechen bei der Helmerttransformation den Verbesserungen an die Beobachtungen $\hat{\mathbf{v}}$. Voraussetzung für die Schätzung ist die Linearisierung der Transformationsgleichungen (Verbesserungsgleichungen, s. (2.6)). Dazu werden hinreichend genaue Näherungswerte $\mathbf{x}_0$ für die Parameter benötigt. Eine Möglichkeit diese zu berechnen ist bei LUHMANN 2000 beschrieben. Mit Hilfe der Näherungswerte werden bei der Linearisierung Differentialquotienten berechnet, die in der Designmatrix **A** zusammengefasst werden. Unter Berücksichtigung der stochastischen Informationen zu den Beobachtungen, die in der Kofaktormatrix $\mathbf{Q_{ll}}$ zusammengefasst sind, lauten die Formel zur Berechnung der geschätzten Transformationsparameter und ihrer Kofaktormatrix schließlich:

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \left(\mathbf{A}^T (\mathbf{Q_{ll}})^{-1} \mathbf{l} \right), \quad \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_0 + \Delta\hat{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = \left(\mathbf{A}^T (\mathbf{Q_{ll}})^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} . \tag{2.7}$$

Die Verbesserungen und ihre Kofaktormatrix ergeben sich zu:

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}} = \mathbf{Q_{ll}} - \mathbf{A}\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}\mathbf{A}^T . \tag{2.8}$$

Der empirische Varianzfaktor berechnet sich als Quotient aus den Verbesserungen und der Redundanz der Schätzung:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T \mathbf{Q_{ll}}^{-1} \hat{\mathbf{v}}}{f} . \tag{2.9}$$

Im allgemeiner formulierten Gauß-Helmert-Modell werden die Transformationsparameter ebenfalls nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate geschätzt. Der Beobachtungsvektor **l** beinhaltet die Koordinaten des Zielsystems und des zu transformierenden Systems. In diesem Modell werden die Koordinaten des Zielsystems nicht als varianzfreie Referenz, sondern als beobachtete Größen mit stochastischen Informationen betrachtet. Für die meisten Anwendungen bietet das

Gauß-Helmert-Modell deswegen eine realitätsnähere Modellierung als das Gauß-Markov-Modell. Die Gleichungen des funktionalen Modells werden hier als Bedingungen formuliert. Hierzu wird die Transformationsvorschrift in Formel (2.2) umgestellt:

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}^{T}(\mathbf{X}_{P} - \mathbf{X}_{0}) - m \cdot \mathbf{x}_{P} . \tag{2.10}$$

Für die Bedingungsgleichungen folgt somit pro identischen Punkt:

$$\begin{aligned} f_{i_1}(\mathbf{l},\mathbf{x}) &: 0 = r_{11}(X_i - X_0) + r_{21}(Y_i - Y_0) + r_{31}(Z_i - Z_0) - m \cdot x_i \\ f_{i_2}(\mathbf{l},\mathbf{x}) &: 0 = r_{12}(X_i - X_0) + r_{22}(Y_i - Y_0) + r_{32}(Z_i - Z_0) - m \cdot y_i \\ f_{i_3}(\mathbf{l},\mathbf{x}) &: 0 = r_{13}(X_i - X_0) + r_{23}(Y_i - Y_0) + r_{33}(Z_i - Z_0) - m \cdot z_i \quad i = 1,2,...,r \end{aligned} \; . \tag{2.11}$$

Die Parameterschätzung setzt eine Linearisierung der $3 \cdot r$ Bedingungsgleichungen voraus. Hierzu werden die Gleichungen partiell nach den Näherungswerten der zu schätzenden Transformationsparameter $\mathbf{x}_0$ (→ Designmatrix **A**) und nach den Beobachtungen **l** (→ Designmatrix **B**) abgeleitet. Die Lösung erfolgt als Extremwertaufgabe mit Nebenbedingung nach Lagrange. Die Extremwertaufgabe wird durch die Minimierung der gewichteten Verbesserungsquadratsumme formuliert, die Nebenbedingung lautet:

$$\mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}} + \mathbf{w} = \mathbf{0}, \quad \text{mit } \mathbf{w} = f(\mathbf{l}, \mathbf{x}_0) . \tag{2.12}$$

Das resultierende Normalgleichungssystem mit dem Korrelatenvektor **k**

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}\mathbf{B}^{T} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^{T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ \Delta\hat{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{0} . \tag{2.13}$$

wird über Inversion der Blockmatrix gelöst:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k} \\ \Delta\hat{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \mathbf{B}\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}\mathbf{B}^{T} & \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^{T} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{11} & \mathbf{Q}_{12} \\ \mathbf{Q}_{21} & \mathbf{Q}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} . \tag{2.14}$$

Es folgt:

$$\mathbf{k} = -\mathbf{Q}_{11}\mathbf{w} . \tag{2.15}$$

sowie

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = -\mathbf{Q}_{21}\mathbf{w}, \quad \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}_0 + \Delta\hat{\mathbf{x}} \quad \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = -\mathbf{Q}_{22} . \tag{2.16}$$

Die Verbesserungen und deren Kofaktormatrix berechnen sich zu:

$$\hat{\mathbf{v}} = -\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}\mathbf{B}^{T}\mathbf{k}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = -\mathbf{Q}_{\mathbf{ll}}\mathbf{B}^{T}\mathbf{Q}_{11}\mathbf{B} . \tag{2.17}$$

Der empirische Varianzfaktor wird analog zum Gauß-Markov-Modell nach Formel (2.9) ermittelt. Zur Überprüfung der Schätzergebnisse erfolgt ein Modelltest. Hierzu und zu weiteren Details der beiden Schätzverfahren sei an dieser Stelle auf die Literatur z.B. KOCH 2004 und NIEMEIER 2002 verwiesen.

Eine alternative Darstellung der Rotationsmatrix bietet die Verwendung von Quaternionen. Diese sind eine Erweiterung der reellen Zahlen, ähnlich den komplexen Zahlen. Die Einführung von Quaternionen geht auf den irisch-englischen Mathematiker und Physiker William Rowan Hamilton zurück. Eine Quaternion **q** ist definiert als:

$$\mathbf{q} = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z \quad \text{mit } q_0, q_x, q_y, q_z \in \mathbb{R}^3 . \tag{2.18}$$

Für die neuen Zahlen i, j, k gelten ähnliche Rechenregeln wie für den Imaginärteil komplexer Zahlen. So werden sie untereinander mit

$$i \cdot j \cdot k = i^2 = j^2 = k^2 = -1 \tag{2.19}$$

multipliziert. Gemäß der Schreibweise komplexer Zahlen lassen sich Quaternionen in einen Skalar- oder Realteil und einen dreidimensionalen Vektor- bzw. Imaginärteil aufspalten. Als Kombination von Skalar und Vektor ist folgende Darstellung verbreitet:

$$\mathbf{q}=\left[q_0,\begin{bmatrix}q_x\\q_y\\q_z\end{bmatrix}\right]=[s,\mathbf{v}]\,. \tag{2.20}$$

Bei HORN 1987 wird gezeigt, wie auf der Basis von Quaternionen eine Rotationsmatrix hergeleitet werden kann. Geometrisch gesehen lässt sich die Drehung eines Koordinatensystems als Rotation um den Ursprungseinheitsvektor **v** beschreiben. Die entsprechende orthogonale Rotationsmatrix ist durch vier Parameter definiert und wie folgt besetzt:

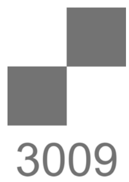
$$\mathbf{R}_{(\mathbf{q})}=\begin{bmatrix}q_0^2+q_x^2-q_y^2-q_z^2 & 2\left(q_xq_y-q_zq_0\right) & 2\left(q_xq_z+q_yq_0\right)\\ 2\left(q_xq_y+q_zq_0\right) & q_0^2-q_x^2+q_y^2-q_z^2 & 2\left(q_yq_z-q_xq_0\right)\\ 2\left(q_xq_z-q_yq_0\right) & 2\left(q_yq_z+q_xq_0\right) & q_0^2-q_x^2-q_y^2+q_z^2\end{bmatrix}. \tag{2.21}$$

Die Verwendung von Quaternionen bei der Aufstellung der Rotationsmatrix für eine räumliche Ähnlichkeitstransformation bietet einen wichtigen Vorteil gegenüber der Verwendung von Eulerwinkeln. Aufgrund der bilinearen Struktur der betroffenen Verbesserungsgleichungen sind keine exakten Näherungswerte für die vier Parameter erforderlich (RIETDORF 2005). Eulerwinkel sind dagegen geometrisch besser interpretierbar und leichter verständlich. Im Laufe dieser Arbeit wird auf die Nutzung von Quaternionen verzichtet, da die Beschaffung von Näherungswerten wegen der besonderen Aufnahmekonfigurationen unproblematisch ist. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 4.2.3 erneut vertieft eingegangen.

2.2.2 Registrierung über identische Punkte

Die Registrierung von Laserscans beinhaltet die Standpunktverknüpfung und die Georeferenzierung. Für beide Arbeitsschritte werden räumliche Ähnlichkeitstransformationen verwendet. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden bei einer 3D-Helmerttransformation sieben Parameter für den Übergang von einem lokalen Scannersystem (Ausgangssystem) zu einem Zielsystem ermittelt. Um die gesuchten Transformationsparameter bestimmen zu können, kommen im Wesentlichen zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz: Die Parameterschätzung über die Objektgeometrie (s. Kapitel 2.2.3) und die hier zunächst behandelte Schätzung über identische Punkte. Hierzu müssen wenigstens 3 räumlich verteilte Punkte in beiden Systemen bekannt sein. Mit Laserscannern ist es nicht möglich, diskrete Punkte gezielt zu messen. Daher werden künstliche Zielmarken genutzt, um aus den Punktwolken auf die Position markierter Einzelpunkte zu schließen. Die in der Praxis eingesetzten Verfahren zur Ableitung diskreter Punkte aus einer rasterförmig gemessenen Sequenz sind in ihrer Methodik vergleichbar. Im Wesentlichen kann zwischen räumlichen Passkörpern und ebenen Zielmarken unterschieden werden. Eine kleine Auswahl zeigt Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Laserscanning Zielzeichen einiger Hersteller

Räumliche Passkörper		Ebene Zielmarken	
			
Leica, Trimble u. a.	Riegl	Trimble	Zoller+Fröhlich

Weit verbreitete räumliche Zielmarken sind Passkugeln. Sie werden gescannt und anschließend kann über eine Ausgleichung der gesuchte Mittelpunkt geschätzt werden. Die entsprechenden Funktionen sind in der jeweiligen Steuer- und Auswertesoftware der Scanner enthalten. Die Genauigkeit der Schätzung hängt im Wesentlichen von der Anzahl der gemessenen Punkte auf der Kugel und deren Streuverhalten ab. Abbildung 2.11 zeigt die gescannte Punktwolke einer Passkugel und eine ausgleichende Kugel. Die Berechnung wurde mit der Trimble Software PointScape in der Version 3.2 durchgeführt. Der gesuchte identische Punkt liegt in diesem Fall einige cm unterhalb der Kugel, was in der Grafik durch die senkrechte gestrichelte Linie und das Kreuz symbolisiert wird. Der entsprechende Wert für die Höhe der Kugel über einem Referenzpunkt kann in der Software eingegeben werden. Die erzielbaren Wiederholgenauigkeiten sind < 1 mm für eine Kugel mit einem Durchmesser von 76 mm (Trimble-Standardkugel) im Entfernungsbereich bis 25 m. Um vergleichbare Genauigkeiten bei größeren Entfernungen zu erzielen, muss der Kugelradius entsprechend vergrößert werden. Problematisch für die Schätzung des Kugelmittelpunktes wirken sich Überstrahl-Effekte bei der Messung der Kugelränder aus. STAIGER 2003 spricht in diesem Zusammenhang von einem Kometenschweif. Die störenden Auswirkungen lassen sich entweder manuell oder durch geometrische Filteralgorithmen beheben, indem beispielsweise die Kugelränder bei der Schätzung nicht berücksichtigt werden. Dies führt allerdings zu einer Verringerung des nutzbaren Kugelausschnitts und somit zu einer ungenaueren Schätzung des Kugelmittelpunktes. Ähnliche Effekte lassen sich bei der Verwendung von Passzylindern zur Ableitung identischer Punkte beobachten.

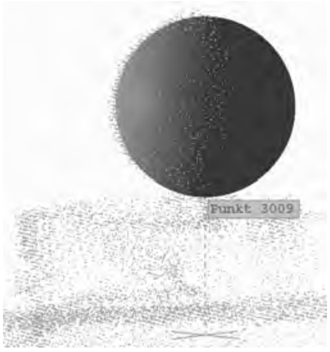


Abbildung 2.11: Gescannte und geschätzte Passkugel (Trimble PointScape 3.2)

Die Oberflächen der Passkörper reflektieren den Laser des jeweiligen Herstellers besonders gut. Der in Tabelle 2.2 gezeigte Zylinder der Firma Riegl besitzt eine retro-reflektierende Oberfläche. Die Rückstrahlwerte für diesen Passkörper sind im Vergleich zur üblichen Umgebung so hoch, dass die Steuersoftware die Passzylinder in der Punktwolke automatisch erkennt und dem Anwender einen hochauflösenden Scan dieser Bereiche zur bestmöglichen Mittelpunktsschätzung anbietet. Passkörper mit weniger stark reflektierenden Oberflächen müssen vom Anwender manuell gefunden und gesondert gescannt werden.

Für eine Georeferenzierung von Punktwolken werden die Passkörper über eine Adaptierung auf koordinierten Punkten aufgebaut. Dies kann, wie bei der Passkugel in Tabelle 2.2 gezeigt, über einen handelsüblichen Dreifuß mit entsprechendem Aufbau geschehen. Im Gegensatz zu den räumlichen Zielzeichen werden bei ebenen Zielmarken die identischen Punkte nicht über eine spezielle Geometrie, sondern über unterschiedliche Rückstreuwerte identifiziert. Hierzu wird ein bestimmtes Muster auf einen ebenen Träger aufgebracht. Beispiele für solche Muster sind in Tabelle 2.2 abgebildet. Bei der Zielmarke von Trimble ist ein weißer Kreis auf eine quadratische, retro-reflektierende Fläche zentrisch gedruckt. Das fein gezeichnete Kreuz in der Mitte der Zielmarke dient der Bestimmung der Zielpunktkoordinaten durch ein elektronisches Tachymeter, sodass der Punkt zur Georeferenzierung verwendet werden kann. Wird die Zielmarke gescannt, differieren die Intensitätswerte deutlich, sodass über einen Schwellwert die Punkte des Kreises von den umgebenden Messungen getrennt werden können. Der Mittelpunkt des Kreises kann über eine Schwerpunktbildung oder eine Kreisausgleichung der Randpunkte ermittelt werden. Abbildung 2.12 zeigt das Ergebnis der Mittelpunktsbestimmung anhand einer gescannten Trimble-Zielmarke. Die Marke hat eine Kantenlänge von 15 cm und wird bis zu einer Entfernung von 50 m mit einer Wiederholgenauigkeit < 1 mm von der Trimble-Software detektiert.

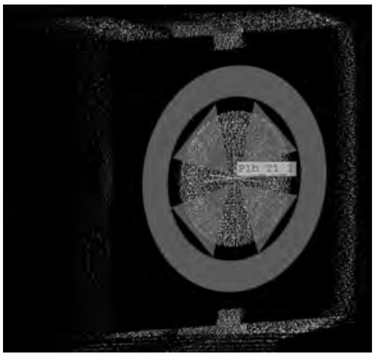


Abbildung 2.12: Gescannte und detektierte Zielmarke (Trimble PointScape 3.2)

Die Zielmarke von Zoller+Fröhlich besitzt ein Muster aus dunkelgrauen und weißen Quadraten. Im Intensitätsbild können die Farbübergänge als Kanten identifiziert werden. Bringt man die Kanten zum Schnitt, erhält man den Mittelpunkt der Zielmarke. Dieser kann zur Referenzierung ebenfalls tachymetrisch angemessen werden. Die Marke hat die Größe eines DIN A4 Blattes. Die Punktbeschriftung kann bei entsprechender Scan-Auflösung im Intensitätsbild gelesen werden und erleichtert dem Anwender somit die Zuordnung der Zielmarken. Beim Scannen der ebenen Zielmarken tritt ebenfalls ein Kometenschweif an den Rändern auf. Abbildung 2.12 zeigt dies deutlich. Er ist hier allerdings nicht so problematisch, da durch Weglassen der Randbereiche die Erkennbarkeit der Zielmarke nicht beeinträchtigt wird. Durch eine entsprechende Adaptierung können Zielmarken ebenfalls in Zwangszentrierung verwendet werden.

Bei der praktischen Handhabung haben beide Signalisierungsarten ihre Vorteile. Räumliche Passkörper können von allen Seiten aus gescannt werden, ohne neu auf den jeweiligen Scanner-Standpunkt ausgerichtet werden zu müssen. Ebene Zielmarken können nur bis zu einem bestimmten Schnittwinkel sinnvoll gescannt werden, lassen sich dafür einfacher an Objekten wie Wänden, Mauern, etc. befestigen. Die Genauigkeit der Mittelpunktsbestimmung, hängt im

Wesentlichen von der Größe des Zielzeichens ab. Handelsübliche Zielmarken sind für Entfernungen bis maximal 100 m vom Scanner ausgelegt. Gerade beim Einsatz von Laserscannern zur Überwachung ausgedehnter Bauwerke ist eine hochgenaue Registrierung über große Entfernungen die Basis einer erfolgreichen Messung. Für die praktischen Beispiele dieser Arbeit wurde daher eine eigene Zielmarke entwickelt, die in Kapitel 4.2.2 vorgestellt wird.

Voraussetzung für genau und zuverlässig bestimmte Transformationsparameter über identische Punkte ist eine ausreichende Anzahl und eine gute räumliche Verteilung von Zielzeichen. Erfahrungswerte zeigen, dass 6-8 Zielzeichen eine hinreichende Überbestimmung bei der Parameterschätzung liefern können, wenn sie das gesamte Messvolumen gut repräsentieren. Wird der Scanner nahezu lotrecht aufgebaut, ist zur Bestimmung der Eulerwinkel r_x und r_y (s. Abbildung 2.10) eine breite Verteilung über die z-Achse wichtig. Für die Schätzung des Eulerwinkels r_z ist eine Streuung über den gesamten Horizont anzustreben. Die Bestimmung des Maßstabs hängt von unterschiedlichen Entfernungen der Zielzeichen zum Scanner ab. Sind die Zielzeichen derart verteilt, können die Translationsparameter ebenfalls gut bestimmt werden. Abbildung 2.13 zeigt beispielhaft eine solche Verteilung.

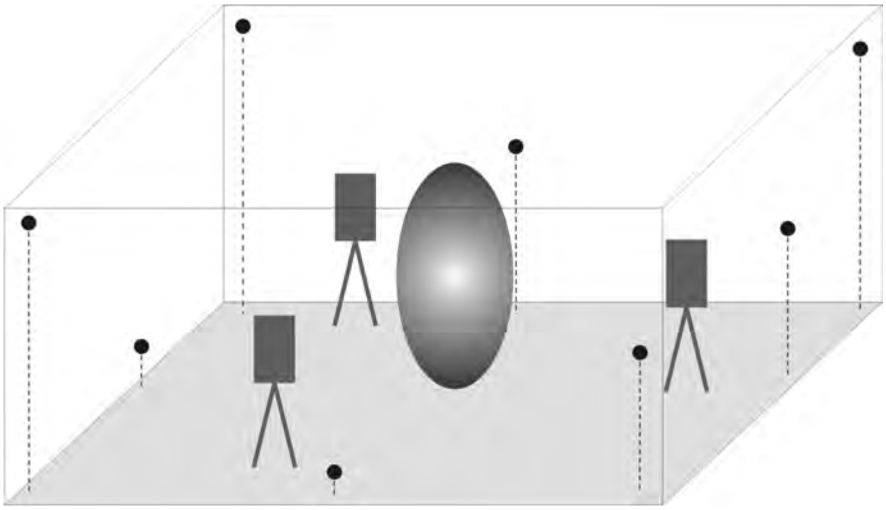


Abbildung 2.13: Räumliche Verteilung von Zielzeichen im Messvolumen

Die jüngste Generation der Laserscanner (u.a. der für diese Arbeit verwendete Trimble GX 3D) verfügt mit der Möglichkeit zur Zentrierung und eingebautem Zweiachskompensator über Ausstattungsmerkmale, welche die Registrierung aktiv unterstützen. Wird der Scanner über einem bekannten Punkt zentriert und seine Höhe gemessen, muss über die Translationsparameter bei der Ähnlichkeitstransformation nicht mehr verfügt werden. Der elektronische Zweiachskompensator korrigiert die Messwerte des Scanners bei nahezu lotrechter Aufstellung derart, dass die Restschiefe der Stehachse rechnerisch beseitigt wird. Wird zudem der Maßstabsfaktor des Scanners im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt, bleibt als einziger freier Transformationsparameter die Rotation um die Stehachse übrig. PAFFENHOLZ & KUTTERER 2008 führen Untersuchungen durch, das Azimut durch zusätzliche GPS-Messungen zu bestimmen und somit eine vollständige Registrierung der Punktwolke ohne Zielmarken zu erzielen. RESHETYUK 2009 erreicht mit einem vergleichbaren Ansatz Koordinatendifferenzen von kleiner 1 cm bei einer Objektentfernung bis 50 m. Diese Ergebnisse sind viel versprechend, aber in ihrer Genauigkeit für die hier behandelten Aufgaben noch nicht ausreichend.

2.2.3 Verknüpfung über Objektgeometrien

Die Registrierung von Laserscans über identische Punkte liefert bei einer ausreichenden Anzahl von Verknüpfungspunkten genaue und zuverlässige Ergebnisse. Nachteilig wirkt sich der hohe Zeitbedarf aus. Zielzeichen müssen platziert, extra gescannt und ausgewertet werden. Für die Georeferenzierung ist zudem eine Einmessung der Zielzeichen erforderlich. Daher gab und gibt es in letzter Zeit vermehrt Anstrengungen, die Transformationsparameter für die Verknüpfung einzelner Scans aus der Objektgeometrie abzuleiten. Dies können, wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, spezielle geometrische Formen am gescannten Objekt sein. Aus gescannten Kugeln, Halbkugeln, Zylindern, Kegeln, etc. können identische Punkte abgeleitet und für die Verknüpfung verwendet werden. RIETDORF 2005 beschreibt ein Verfahren zur Berechnung von Transformationsparametern mit Hilfe der Normalenvektoren und Abstandsparameter gescannter Raumebenen. Es werden wenigstens drei identische Ebenen benötigt. Die Methode eignet sich gut in Innenstädten und Innenräumen, da dort viele Raumebenen durch Straßen, Wände, Decken, etc. gegeben sind. Die Qualität der Transformation hängt von der Identifizierung identischer Ebenen, deren Verteilung und Anzahl sowie der Qualität der geschätzten Ebenenparameter ab. In Versuchen wurden unter Laborbedingungen vergleichbare Genauigkeiten wie bei Transformationen über identische Punkte erzielt. BRENNER & DOLD 2007 benutzen ebenfalls Raumebenen zur Verknüpfung einzelner Scans für die Generierung von 3D-Stadtmodellen. Der Vorteil ihrer Methode liegt in der automatischen Identifizierung geeigneter identischer Ebenen in den Punktwolken über eine Gütefunktion. Das

Verfahren ist aufgrund der erreichten Genauigkeiten nicht für Aufgaben der Bauwerksüberwachung geeignet, kann allerdings Näherungswerte für andere Verfahren liefern, die ebenfalls ohne Zielzeichen auskommen.

Viele Verknüpfungsmethoden, die auf Zielzeichen verzichten, beruhen auf dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus, der von BESL & MCKAY 1992 und CHEN & MEDIONI 1992 veröffentlicht wurde. GRÜN & AKCA 2005 sowie AKCA & GRÜN 2007 geben einen breiten Überblick über Anwendungen und Weiterentwicklungen des Algorithmus für die Verknüpfung von Punktwolken. In der ursprünglichen Version sucht der ICP-Algorithmus Paare von nah beieinander liegenden Punkten in zwei Punktwolken und transformiert diese aufeinander. Mit diesen Parametern werden die restlichen Punkte ebenfalls transformiert. Das Verfahren wiederholt diese Schritte solange, bis es konvergiert, d. h. alle korrespondierenden Punkte gefunden und deren Abstandsquadrate durch die Transformation minimiert werden. In dieser Form verlangt der Algorithmus zwei identische Punktwolken, die durch eine Transformation vollständig aufeinander abgebildet werden. In der Praxis wird das normalerweise nicht erreicht. Laserscans überdecken sich nur teilweise und werden zudem aus verschiedenen Richtungen gemessen, sodass unterschiedliche Abschattungen auftreten. Die angesprochenen Weiterentwicklungen befassen sich mit diesen Problemen und bieten Lösungswege an. Inzwischen sind Varianten von ICP in viele Softwarepakete integriert worden und funktionieren mit einer guten Näherungslösung stabil (BARNEA & FILIN 2007). Sie können als Verknüpfungsverfahren zusammengefasst werden, die Korrelationen zwischen Punktwolken zu ihrer Transformation nutzen. Die Vorteile dieser Verknüpfungsverfahren sind der Verzicht auf Zielzeichen und das Ausnutzen großer Teile der Punktwolken für die Transformation, was zu einer hohen Redundanz bei der Schätzung führt. Nachteilig wirken sich die aufwändige Suche nach korrespondierenden Bereichen sowie die Anfälligkeit gegenüber Fehlmessungen aus. Des Weiteren ist für viele Aufgaben neben der Standpunktverknüpfung auch eine Georeferenzierung entscheidend, die mit diesen Verfahren zunächst nicht gelöst wird. Problematisch für eine eindeutige Zuordnung sind zudem großflächige, ebene Objekte, deren Oberflächen wenig strukturiert sind, da diese empfindlich gegenüber Verschiebungen senkrecht zu ihren Flächennormalen sind.

Die Nutzbarkeit der korrelationsbasierenden Verknüpfungsverfahren für die Bauwerksüberwachung mit Laserscannern wird in den Kapiteln 4.2 und 5.4.4 erneut aufgegriffen. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist dabei die Möglichkeit einer Georeferenzierung der verknüpften Punktwolke. AKCA & GRÜN 2007 stellen hierzu eine Methode vor, bei der ein flächenbasierter Verknüpfungsansatz um Passpunkte ergänzt wird und somit eine Georeferenzierung ermöglicht. MONSERRAT U. A. 2007 nutzen bei wiederholten Scans stabile Bereiche im Objektraum zur Referenzierung, um Deformationen nicht stabiler Bereiche aufzudecken.

2.3 Verarbeitung von Punktwolken

Das Ergebnis einer Messung mit einem Laserscanner ist eine Punktwolke. Sie kann aus den Messungen eines einzelnen Laserscanner-Standpunktes oder mehrerer verknüpfter Scanner-Standpunkte bestehen. Eine Punktwolke ist die Gesamtheit der gemessenen Punkte. Die einzelnen Punkte werden meist entsprechend ihres Rückstrahlwertes in Graustufen oder bei der Kombination des Scanners mit einer Digitalkamera mit realitätsnahen RGB-Werten (Rot, Grün, Blau) eingefärbt. Die Punktwolke eines Objekts und seiner Umgebung kann für Visualisierungszwecke bereits das endgültige Produkt einer Laserscannermessung sein. Für viele Aufgaben ist sie aber lediglich ein Zwischenprodukt, das durch eine Weiterverarbeitung einen erhöhten Nutzwert erhält. Für die in Abbildung 2.2 dargestellten Anwendungsbereiche des Laserscannings ist fast immer eine Weiterverarbeitung der Punktwolke erforderlich. Ein Beispiel hierfür ist das Erzeugen von Grundrissplänen für die Aufgaben des Facility Managements. Hierzu kann die Punktwolke eines Gebäudes mit einer horizontalen Raumebene geschnitten und mit einem CAD-System weiterverarbeitet werden. Das Ergebnis ist ein zweidimensionaler Plan, indem Wände, Türen, Fenster und Mobiliar kartiert sind. Zudem können zusätzliche Informationen über die dritte Dimension wie Raumhöhen und Volumina aus der Punktwolke abgeleitet und in den Plan aufgenommen werden. Wie bei KERN 2003 beschrieben, ist der Prozess bis zu einem gewissen Grad automatisierbar.

Ein anderer Weg Punktwolken zu verarbeiten, ohne die räumliche Dimension zu reduzieren, ist die geometrische 3D-Modellierung erfasster Objekte. Die Methoden zur 3D-Modellierung wurden ursprünglich im Kontext der Computergrafik, einem Teilgebiet der Informatik, entwickelt. Sie sind inzwischen vielfach in kommerzielle Software integriert worden. Auch die Hersteller von Laserscannern bieten Softwarepakete an, die neben der Registrierung von Punktwolken deren Modellierung unterstützen. Beispiele sind Cyclone von Leica Geosystems, RiScanPro von Riegl und RealWoksSurvey von Trimble.

3D-Modelle bieten gegenüber der Punktwolke zwei wesentliche Vorteile:

- Die Datenmenge wird reduziert.
- Eine Attributierung und Bemaßung der erfassten Objekte und somit eine weitergehende Nutzung, z. B. in Geoinformationssystemen, wird ermöglicht. Zudem können über geeignete Modelle Parameter mit einer höheren Genauigkeit als der Einzelpunktgenauigkeit des Scanners abgeleitet werden. Dieser Aspekt ist für den Einsatz von TLS für die Bauwerksüberwachung relevant und wird in Kapitel 3.2 an einigen Beispielen sowie in Kapitel 4.3.1 vertieft behandelt.

KERN 2003 stellt drei unterschiedliche Ansätze zur räumlichen Modellierung vor. Es wird zwischen Drahtgitter-, Flächen- und Volumenmodellen unterschieden. Für Anwendungen des terrestrischen Laserscannings zur Bauwerksüberwachung kommen hauptsächlich Flächenmodelle zum Einsatz. Daher werden die zwei anderen hier nur kurz angesprochen.

Drahtgittermodelle definieren räumliche Objekte anhand ihrer repräsentativen Punkte und Kanten. Die durch die Umrisse begrenzten Flächen werden nicht berücksichtigt. Da Punktwolken Objekte eher flächenhaft beschreiben und diskrete Ecken und Kanten dabei nicht direkt erfasst werden, finden Drahtgittermodelle bei der Verarbeitung von Punktwolken seltener Verwendung.

Volumenmodelle sind geschlossene Darstellungen von geometrischen Objekten. Topologisch betrachtet kann daher eine Unterscheidung zwischen innerhalb und außerhalb des Modells erfolgen. Objekte der realen Welt können durch die Kombination verschiedener geometrischer Primitive (Constructive Solid Geometry - CSG), durch die Unterteilung in viele gleichartige Raumelemente (Zellzerlegung) oder durch die geschlossene Darstellung mit begrenzenden Flächen (Boundary-Representation) modelliert werden. Mit diesen Methoden können realitätsnahe Abbilder von räumlichen Objekten anhand einer Punktwolke erzeugt werden.

Flächenmodelle beschreiben die Oberflächen von Objekten. Meist sind mehrere Flächen notwendig, um ein Objekt vollständig zu modellieren. Anhand des Flächenmodells wird deutlich, dass die drei Grundmodellarten Gemeinsamkeiten haben und auf den ersten Blick nicht immer streng zu trennen sind: Wird ein Objekt geschlossen durch Flächen modelliert, entsteht ein Volumenmodell. Nimmt man nur die Begrenzungslinien der Flächen und deren Schnittpunkte, erhält man ein Drahtgittermodell. Im Endeffekt entscheidet die zugrunde liegende Datenstruktur, welches Modell tatsächlich vorliegt.

Die einzelnen Flächen gescannter Objekte können auf verschiedene Arten modelliert werden. Drei Varianten werden im Folgenden zunächst allgemein vorgestellt. Insbesondere die Modellierung durch Flächen 2. Ordnung findet in dieser Arbeit Verwendung.

2.3.1 Delaunay-Triangulation

Durch eine Triangulation (Dreiecksvermaschung) werden ungeordnete Punktmengen zu Dreieckesnetzen und somit zu einer geschlossenen Fläche vermascht. Die Dreiecke können nach verschiedenen Kriterien gebildet werden. Die Delaunay-Triangulation ist die gebräuchlichste Variante. Sie beruht auf der Forderung, dass innerhalb des Umkreises eines Dreiecks kein weiterer Dreieckspunkt liegen darf. Diese so genannte Umkreisbedingung wird durch Abbildung 2.14 verdeutlicht. Im linken Teil der Grafik wird die Umkreisbedingung verletzt, da sich ein Punkt innerhalb des Umkreises um die drei anderen befindet. Im rechten Beispiel sind die Dreiecke so gewählt, dass die Umkreisbedingung erfüllt ist.

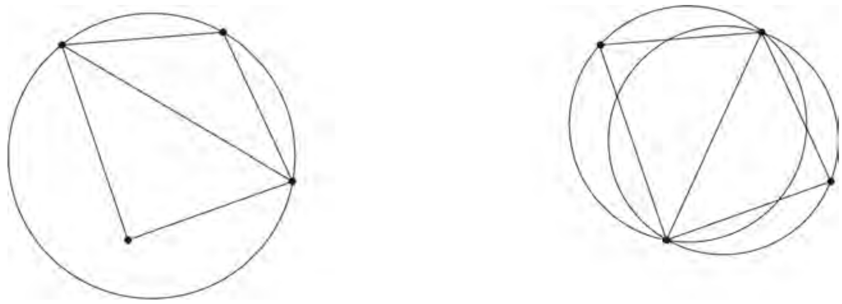


Abbildung 2.14: Umkreisbedingung bei der Delaunay-Triangulation

Die Delaunay-Triangulation ist ursprünglich für die Vermaschung von zweidimensionalen Punkthaufen entwickelt worden. Für die Vermaschung räumlicher Punkte, wie sie durch eine Laserscanner-Messung entstehen, werden meist so genannte 2,5D-Daten verwendet. Sie werden durch Projektion dreidimensionaler Daten auf eine räumliche Fläche erzeugt. Allgemein lässt sich eine räumliche Fläche in Parameterdarstellung mit den Parametern u und v und ihrem Wertebereich B darstellen als:

$$\mathbf{x}(u,v) = \begin{bmatrix} x(u,v) \\ y(u,v) \\ z(u,v) \end{bmatrix}, (u,v) \in B \subseteq \mathbb{R}^2 . \qquad (2.22)$$

2,5D-Koordinaten eines Punktes sind definiert durch die Flächenparameter u und v sowie die Höhe des Punktes über der Fläche. Das Beispiel in Abbildung 2.15 zeigt die Delaunay-Triangulation einer Punktwolke. Als Projektionsfläche wird die xy-Koordinatenebene verwendet, die in Parameterdarstellung wie folgt definiert ist:

$$\mathbf{x}(x,y) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix}, (x,y) \in B \subseteq \mathbb{R}^2 . \tag{2.23}$$

Die Dreiecksbildung wird in dieser Ebene durchgeführt. Die räumliche Struktur der Daten führt dazu, dass mit ansteigendem Gradienten in z-Richtung, die Dreiecke in dieser Richtung gedehnt werden (rechte Grafik), während in der xy-Projektion alle Dreiecke in etwa gleich groß sind (linke Grafik). Daraus kann man schließen, dass die Scanner-Messungen in Richtung der z-Achse durchgeführt wurden.

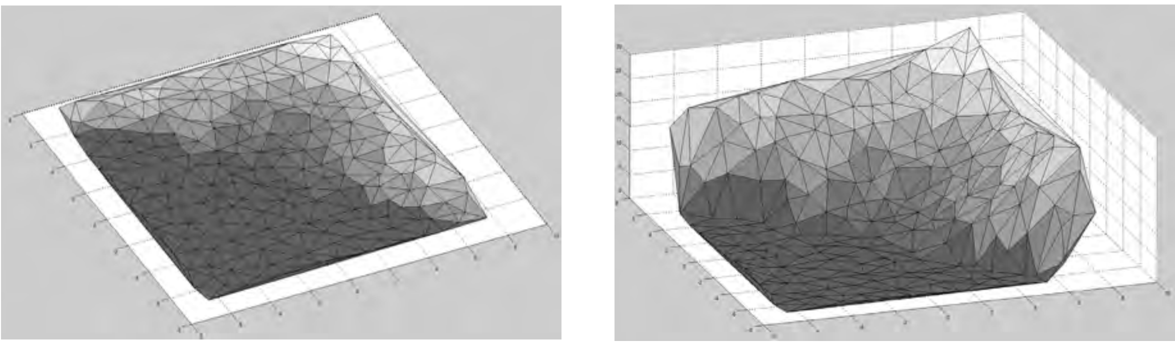


Abbildung 2.15: Räumliche Delaunay-Triangulation mit 2,5D-Daten

Sollen für eine flächenhafte Darstellung räumlicher Objekte die Punktwolken durch eine Delaunay-Triangulation vermascht werden, gibt es je nach Aufgabenstellung verschiedene Herangehensweisen.

Eine Möglichkeit ist, die Punktwolken vor ihrer Registrierung einzeln zu vermaschen und nach der Registrierung die vermaschten Flächen zu vereinen. Für die Triangulation werden die Punktwolken standpunktweise in Polarkoordinaten umgerechnet und auf einer Kugelfläche mit Mittelpunkt im Scannerursprung vermascht. Dieses Vorgehen wird bei RIETDORF 2005 und bei ROHRBERG 2007 näher beschrieben.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, nach der Registrierung in der vereinigten Punktwolke flächenhafte Teilbereiche zu segmentieren, einzeln mit 2,5D Daten zu vermaschen und anschließend wieder zusammenzuführen. Alternativ kann die Triangulation in der vereinigten Punktwolke mit 3D- anstatt mit 2,5D-Daten durchgeführt werden. Dieses Vorgehen ist allerdings sehr rechenintensiv, da benachbarte Punkte zunächst mit einem Abstandskriterium und einem Winkelkriterium für die entstehenden Dreiecke identifiziert werden müssen.

Die Vorteile einer Modellierung durch Dreiecksvermaschung liegen in dem weitgehend automatisierbaren Ablauf, der relativ schnell zu flächigen Objekten auf Basis einer Punktwolke führt. Nachteilig wirken sich dabei ein starkes Punktrauschen, Fehlmessungen und nicht interessierende Objekte in der Punktwolke aus. Letztere führen dazu, dass die Messungen vor einer Triangulation manuell bereinigt werden müssen. Des Weiteren wird die Datenmenge durch die Modellierung nicht reduziert, außer die Punktmenge wird zuvor verkleinert, indem beispielsweise nur jeder k-te Punkt verwendet wird.

Wegen der genannten Vor- und Nachteile bildet die Dreiecksvermaschung oftmals eine Vorstufe zu einer weitergehenden Modellierung mit Flächen zweiter Ordnung oder Freiformflächen.

2.3.2 Flächen zweiter Ordnung

Die flächenhafte Modellierung von Punktwolken mit Flächen zweiter Ordnung, auch als quadratische Formen oder Quadriken bezeichnet, unterscheidet sich wesentlich von der Dreiecksvermaschung. Bei einer Triangulation werden die originären Messwerte durch Dreiecksflächen verbunden. Bei der Modellierung mit quadratischen Formen wird eine parametrisierbare geometrische Fläche bestmöglich an die Punktwolke angepasst. Typische Flächen zweiter Ordnung sind die Oberflächen von Kugeln, Ellipsoiden, Paraboloiden, Zylindern, Kegeln, usw. Viele künstliche Objekte wie Teile von Gebäuden, Industrieanlagen und Maschinen werden als Flächen zweiter Ordnung konstruiert. Werden solche Objekte gescannt, können die entsprechenden Bereiche der Punktwolke durch die passende quadratische Form modelliert werden.

Die allgemeine Gleichung für Flächen zweiter Ordnung lautet in Matrizenschreibweise:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{M} \mathbf{x} + \mathbf{m}^T \mathbf{x} + \alpha = 0 . \tag{2.24}$$

Sie enthält den Koordinatenvektor **x** eines Punktes der Fläche**,** die Formmatrix **M,** den Vektor **m** und den Skalar α**,** die wie folgt gebildet werden:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_1 & a_4 & a_5 \\ a_4 & a_2 & a_6 \\ a_5 & a_6 & a_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{bmatrix} a_7 \\ a_8 \\ a_9 \end{bmatrix}, \quad \alpha = a_{10} \,. \tag{2.25}$$

Ausmultipliziert erhält man für Gleichung (2.24) somit den Ausdruck:

$$a_1x^2 + a_2y^2 + a_3z^2 + 2a_4xy + 2a_5xz + 2a_6yz + a_7x + a_8y + a_9z + a_{10} = 0 \,. \tag{2.26}$$

Durch einen Koeffizientenvergleich kann aus der allgemeinen Form die jeweils benötigte Quadrik abgeleitet werden (DRIXLER 1993). Eine in dieser Arbeit noch mehrfach benutzte Linearform ist die Raumebene. Sie wird in der Hesse'schen Normalenform durch den zu ihr orthogonal stehenden Normalenvektor **n** und den Abstand zum Koordinatenursprung d definiert. Jeder Punkt **x** der Ebene erfüllt die Gleichung:

$$\mathbf{n}^T \cdot \mathbf{x} + d = 0 \quad \text{mit:} \quad \mathbf{n}^T = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}. \tag{2.27}$$

Daraus folgt für die Modellparameter a_1-a_{10}:

$$\begin{aligned} &a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = a_6 = 0 \\ &a_7 = n_x, \quad a_8 = n_y, \quad a_9 = n_z, \quad a_{10} = d. \end{aligned} \tag{2.28}$$

Für die Schätzung der Modellparameter einer gescannten Ebene eignet sich der Algorithmus von DRIXLER 1993. Er kommt ohne Näherungswerte aus und schätzt die Ebenenparameter unter der Vorgabe, dass die Abstände der Punkte zur Ebene in ihrer Quadratsumme minimiert werden. Der Algorithmus sei hier kurz erläutert.

Die zu schätzenden Parameter sind die drei Komponenten von **n** sowie der Abstandsparameter d. Für jeden gemessenen Punkt $\mathbf{x}_i$ wird eine Verbesserungsgleichung aufgestellt:

$$\hat{\mathbf{n}}^T \cdot \mathbf{x}_i - \hat{d} = \hat{v}_i, \quad i = 1, 2, ..., n \tag{2.29}$$

Geometrisch interpretiert, beschreibt die Verbesserung $\hat{v}_i$ den Abstand des Punktes $\mathbf{x}_i$ von der Ebene. Für n > 3 gemessene Punkte ergibt sich ein überbestimmtes lineares Gleichungssystem mit der Designmatrix **A** und dem Verbesserungsvektor $\hat{\mathbf{v}}$:

$$\mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{n}} - \mathbf{e} \cdot \hat{d} = \hat{\mathbf{v}}, \quad \text{mit:} \, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ & \vdots & \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \dim(\mathbf{e}) = n \times 1 \tag{2.30}$$

Die Schätzung der Ebenenparameter erfolgt unter der Annahme gleichgenauer und unkorrelierter Messwerte. Hierzu wird zunächst der Abstandsparameter d durch Reduzierung der gemessenen Punkte $\mathbf{x}_i$ auf deren Schwerpunkt $\mathbf{x}_s$ eliminiert:

$$x_i^* = x_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \quad y_i^* = y_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i, \quad z_i^* = z_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i, \quad i = 1, 2, ..., n \,. \tag{2.31}$$

Die zentrierten Koordinatenvektoren $\mathbf{x}_i^*$ bilden die modifizierte Designmatrix $\mathbf{A}^*$:

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} x_1^* & y_1^* & z_1^* \\ & \vdots & \\ x_n^* & y_n^* & z_n^* \end{bmatrix}. \tag{2.32}$$

Zur Lösung des linearen Gleichungssystems wird die Spektralzerlegung ihrer quadratischen Form berechnet:

$$\mathbf{A}^{*T} \cdot \mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1 & \mathbf{m}_2 & \mathbf{m}_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T \\ \mathbf{m}_2^T \\ \mathbf{m}_3^T \end{bmatrix}. \tag{2.33}$$

Dabei bezeichnen λ_1 - λ_3 die aufsteigend nach ihrer Größe sortierten Eigenwerte mit den zugehörigen, zueinander orthogonalen und auf die Länge Eins normierten Eigenvektoren $\mathbf{m}_1$, $\mathbf{m}_2$ und $\mathbf{m}_3$. Der Eigenvektor zum minimalen Eigenwert ($\mathbf{m}_1, \lambda_1$) ist der gesuchte Normalenvektor der Raumebene $\hat{\mathbf{n}}$.

Der zuvor eliminierte Abstandsparameter berechnet sich als:

$$\hat{d} = n^{-1} \cdot \mathbf{e}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{n}} . \tag{2.34}$$

Die Genauigkeit der Ebenenschätzung kann anhand der Kofaktoren und des empirischen Varianzfaktors der Ebenenparameter beurteilt werden. Die Kofaktormatrix für die Komponenten des Normalenvektors berechnet sich als:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{n}}\hat{\mathbf{n}}} = \frac{1}{\lambda_2}\mathbf{m}_2\mathbf{m}_2^T + \frac{1}{\lambda_3}\mathbf{m}_3\mathbf{m}_3^T . \tag{2.35}$$

Für den Kofaktor des Abstandsparameters folgt:

$$q_{\hat{d}\hat{d}} = n^{-2}\mathbf{e}^T\mathbf{A}\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{n}}\hat{\mathbf{n}}}\mathbf{A}^T\mathbf{e} . \tag{2.36}$$

Der empirische Varianzfaktor ergibt sich nach DRIXLER 1993 zu:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\lambda_1}{n-3} . \tag{2.37}$$

Ist die passende quadratische Form für ein gescanntes Objekt à priori nicht bekannt, kann sie durch ein Verfahren der automatischen Formerkennung identifiziert werden. Ein solches wird von HESSE & KUTTERER 2006 für die Analyse von TLS-Punktwolken vorgestellt. Dazu werden zunächst die zehn Modellparameter a_1-a_{10} in einem Gauß-Helmert-Modell mit den gescannten Punkten als Beobachtungen geschätzt. Die anschließende Formerkennung erfolgt mit der Determinantenmethode (KUTTERER & SCHÖN 1999) oder der Eigenwertmethode (DRIXLER 1993). Beide Methoden liefern die gleichen, durch statistische Tests überprüfbaren, Ergebnisse. Nach der Identifizierung werden die für die spezielle Form benötigten Parameter in einer erneuten Ausgleichung geschätzt.

An dieser Stelle wird kurz auf die Determinantenmethode eingegangen, da sie im Verlauf dieser Arbeit bei der Modellwahl für die Okertalsperre (vgl. Kapitel 5.2.1) verwendet wird. Für die ausführliche Darstellung der Methode sei auf die erwähnte Literatur verwiesen.

Die Determinantenmethode verwendet die vier bewegungsinvarianten Parameter δ, Δ, B und J, die auf Basis der Formmatrix **M** und der erweiterten Formmatrix

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{m} \\ \mathbf{m}^T & \alpha \end{bmatrix} \tag{2.38}$$

berechnet werden.

Im Einzelnen werden die vier Größen wie folgt gebildet:

$$\begin{aligned} &\delta = \det(\mathbf{M}^*), \quad \Delta = \det(\mathbf{M}) \\ &B = \det(\mathbf{M}_1^*) + \det(\mathbf{M}_2^*) + \det(\mathbf{M}_3^*) \\ &J = \det(\mathbf{M}_1) + \det(\mathbf{M}_2) + \det(\mathbf{M}_3). \end{aligned} \tag{2.39}$$

Dabei wird durch det($\mathbf{M}_k$) der k-te Hauptminor (Hauptunterdeterminante) von **M** bezeichnet.

Mithilfe der vier in Formel (2.39) berechneten Größen erfolgt die Formerkennung wie in Abbildung 2.16 dargestellt. Die Entscheidung, ob die jeweils getestete Größe gleich, kleiner oder größer als Null ist, wird durch einen Signifikanztest getroffen.

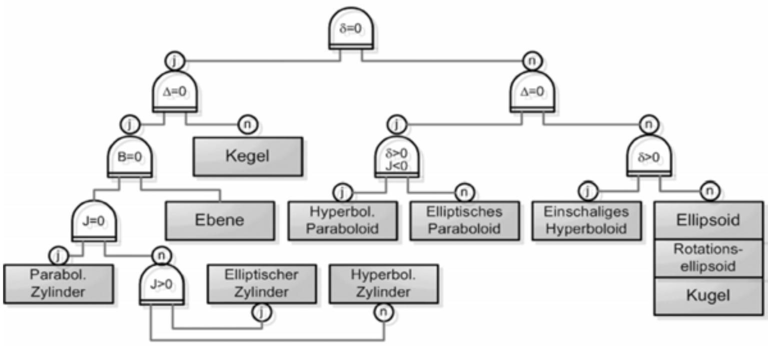


Abbildung 2.16: Testbaum der automatischen Formerkennung (HESSE & KUTTERER 2006)

Mit dem vorgestellten Verfahren steht eine automatisierbare Methode zur Verfügung, mit der für gescannte Objekte die bestmögliche quadratische Form gefunden und angepasst werden kann. Damit kann eine Vielzahl der bei Laserscanner-Messungen vorkommenden künstlichen Objektflächen modelliert werden. Objekte die nicht als Quadrik konstruiert sind, können durch Freiformflächen, beispielsweise durch NURBS, verarbeitet werden, die im folgenden Unterkapitel behandelt werden.

2.3.3 NURBS

Freiformflächen werden verwendet, um Oberflächen zu modellieren, die sich nicht geschlossen parametrisieren lassen. Hierzu werden abschnittsweise Flächen definiert, an deren Übergängen die Stetigkeit durch Regeln gewährleistet wird. Eine inzwischen weit verbreitete Form sind die so genannten NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Sie gehen auf zwei Mitarbeiter französischer Automobilfirmen zurück. Pierre Étienne Bézier (Renault) und Paul de Casteljau (Citroën) entwickelten um 1960 unabhängig voneinander Verfahren, um mathematisch nicht definierte Oberflächen von Fahrzeugteilen zu modellieren. Für die Bauwerksüberwachung mit Laserscanning können sie verwendet werden, wenn das zu überwachende Objekt exakt nachgebildet werden soll. Für die in dieser Arbeit entwickelte Methode kommen sie derzeit nicht zum Einsatz, sollen aber der Vollständigkeit halber nicht unerwähnt bleiben.

Wesentliche mathematische Eigenschaften von NURBS-Kurven und ihre Erweiterung zu NURBS-Flächen werden bei KERN 2003 zusammengefasst, der die Kapitel 4 und 5 von TORIYA & CHIYOKURA 1991 sowie PIEGL & TILLER 1997 als Quellen nennt. Eine ausführliche Darstellung findet sich zudem bei MÜLLER 2006. ROHRBERG 2007 gibt einen Überblick über die praktische Handhabung von NURBS zur Modellierung von Punktwolken.

NURBS basieren auf B-Spline Kurven. B-Splines sind abschnittsweise polynomiale Kurven, deren Form sich einem Polygon aus n+1 Kontrollpunkten $\mathbf{P}_i$ annähert. Formel (2.40) zeigt die Definition eines räumlichen B-Splines $\mathbf{R}(t) = [x(t)\ y(t)\ z(t)]^T$ in parametrischer Darstellung.

$$\mathbf{R}(t) = \sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(t)\mathbf{P}_i \quad \text{mit: } 2 \leq k \leq n+1 \tag{2.40}$$

Die B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,k}(t)$ sind Polynome vom Grad k-1 und für Abschnitte des Kurvenparameters t: $t_i \leq t < t_{i+1}$ definiert. Außerhalb dieses Intervalls haben sie den Wert Null. Die monoton aufsteigenden Intervallgrenzen t_i, t_{i+1} werden als Knoten bezeichnet und in einem Knotenvektor **t** zusammengefasst. Die Dimension des Vektors setzt sich additiv aus der Anzahl der Kontrollpunkte und dem Kurvengrad zusammen: r = k + n. Die Polynome werden so gebildet, dass sie an den Abschnittsgrenzen (k-2)-mal stetig differenzierbar sind. Dadurch werden glatte Übergänge zwischen den einzelnen Abschnitten gewährleistet. Die Verschiebung eines Kontrollpunktes $\mathbf{P}_i$ bewirkt eine lokale Anpassung des Splines im Bereich der angrenzenden Knoten: $[t_i, t_{i+k}]$. Andere Bereiche des Splines sind von der Verschiebung nicht betroffen.

Der Übergang von B-Spline-Kurven zu rationalen B-Spline-Kurven erfolgt durch die Einführung von Gewichten w_i je Kontrollpunkt $\mathbf{P}_i$, wie in Formel (2.41) beschrieben. Dadurch wird erreicht, dass auch Kegelschnitte (Kreis, Ellipse, etc.) modelliert werden können, was mit ungewichteten, nicht-rationalen B-Splines nicht möglich ist.

$$\mathbf{R}(t) = \frac{\sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(t) w_i \mathbf{P}_i}{\sum_{i=0}^{n} N_{i,k}(t) w_i} \tag{2.41}$$

In ihrer allgemeinsten Form haben rationale B-Spline-Kurven keine Einschränkungen (non uniform) hinsichtlich der Abstände ihrer Knoten und werden als NURBS-Kurven bezeichnet (KERN 2003).

NURBS-Flächen werden analog zu NURBS-Kurven mit den B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,k}(u)$ und $N_{j,l}(v)$ gebildet. Sie sind durch ein $(n+1) \times (m+1)$ Netz von Kontrollpunkten $\mathbf{P}_{ij}$ mit den Gewichten w_{ij} über den nicht uniformen Knotenvektoren **u** und **v** definiert.

$$\mathbf{S}(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) w_{ij} \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) w_{ij}}. \tag{2.42}$$

Die Verschiebung eines Kontrollpunktes $\mathbf{P}_{ij}$ wirkt sich wie bei B-Spline Kurven nur lokal im Bereich der angrenzenden Knoten: $[u_i, x_{i+k}] \times [v_j, v_{j+l}]$ aus. Andere Bereiche der Fläche sind von der Verschiebung nicht betroffen.

Bei der Modellierung von Punktwolken mit NURBS-Flächen gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Eine Schwierigkeit besteht in der Parametrisierung der Ausgangsdaten, um die Knotenvektoren aufzustellen. Hierzu ist es hilfreich, wenn die Flächen der Punktwolke durch eine Dreiecksvermaschung und/oder eine Modellierung durch quadratische Formen vorverarbeitet wurden. ROHRBERG 2007 widmet sich dieser Thematik ausführlich. Nach der Parametrisierung erfolgt die Anpassung der NURBS-Flächen an die Punktwolke. Hierzu können die Kontrollpunkte so berechnet werden, dass die Abstände der gemessenen Punkte zu der Fläche in ihrer Quadratsumme minimiert werden. Dadurch kann eine sehr gute Approximation der Punktwolke erzielt werden. Eine weniger optimale Möglichkeit besteht darin, die Fläche durch Interpolation direkt den gemessenen Punkten anzupassen, da dann fehlerhafte Punkte das Ergebnis stark beeinflussen können.

IOANNIDIS U. A. 2006 verwenden NURBS für die Modellierung eines Kühlturms. Hierauf wird in Kapitel 3.2.1 vertieft eingegangen.

2.4 Untersuchung und Kalibrierung terrestrischer Laserscanner

Die Überwachung von Bauwerken stellt höchste Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit geodätischer Messungen. Neben ihrer sorgfältigen Planung, Ausführung und Auswertung darf die regelmäßige Untersuchung der verwendeten Messsysteme nicht vernachlässigt werden. Sie soll Abweichungen des Systems vom Normalverhalten aufdecken, dokumentieren und modellieren. Das wird im Allgemeinen als Kalibrierung des Messsystems bezeichnet und wird u. a. von einigen Universitäten als Dienstleistung angeboten. Hierzu zählt beispielsweise die Kalibrierung elektrooptischer Distanzmesser. Bei einer Kalibrierung werden keine Eingriffe am Messsystem vorgenommen. Dies würde eine Justierung bedeuten und sollte bei komplexen Systemen wie einem Laserscanner nur vom Hersteller oder einem autorisierten Labor durchgeführt werden. Die Kalibrierung von Laserscannern ist ein aktuelles Thema geodätischer Forschung, dessen derzeitiger Stand in Kapitel 2.4.2 dargestellt wird. Zuvor werden allgemein die Begriffe Genauigkeit, Messsystem und Kalibrierung eingeführt.

2.4.1 Genauigkeit und Kalibrierung von Messsystemen

Die Genauigkeit einer Messung kennzeichnet deren Annäherung an den gesuchten Wert, den so genannten wahren Wert der Messgröße. Eine Messung wird als Realisierung einer Messgröße bezeichnet und mit einem Messsystem erzielt. Um die Genauigkeit von Messungen gewährleisten zu können, muss das Messsystem regelmäßig im Rahmen einer Kalibrierung geprüft werden. An dieser Stelle werden zunächst die Begriffe Genauigkeit einer Messung und Messsystem definiert, die für das Verständnis von Kalbrierungen wichtig sind.

Die Genauigkeit einer Messung setzt sich nach WELSCH U. A. 2000 aus der Präzision und der Richtigkeit zusammen. Die Präzision bezeichnet die Streuung der Messwerte bei wiederholten Messungen unter vergleichbaren Bedingungen. Das Ausmaß der Annäherung des Erwartungswerts der Messungen an den wahren Wert wird als Richtigkeit bezeichnet. Der Erwartungswert kann bei ausreichend vielen Wiederholungen durch den Mittelwert approximiert werden. Anders ausgedrückt setzt sich die Differenz einer Messung vom gesuchten Wert aus einem zufälligen und einem systematischen Anteil zusammen. Ein Genauigkeitsmaß für die Realisierung einer Messgröße x ist deren Messunsicherheit σ_x. Sie besteht aus einem zufälligen Anteil σ_ε und einem systematischen Anteil σ_Δ die quadratisch addiert werden. Formel (2.43) verdeutlicht den Zusammenhang.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\Delta^2} \tag{2.43}$$

Das Ziel geodätischer Messungen ist in der Regel die Bestimmung bestimmter Parametern und eine Aussage zu ihrer Genauigkeit. Das kann beispielsweise ein Koordinatenvektor mit der zugehörigen Varianz-Kovarianzmatrix sein. Die Berechnung dieser Matrix basiert auf einer realistischen Abschätzung für die Messunsicherheiten der beteiligten Messungen. Dies setzt voraus, dass sowohl die zufälligen als auch die systematischen Abweichungen beurteilt werden. Das Streuverhalten einer Messgröße x kann durch n Wiederholungsmessungen ermittelt und durch ihre empirische Standardabweichung s_x quantifiziert werden.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} v_i^2} \quad \text{mit}: v_i = x_i - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2.44}$$

Unter der Voraussetzung, dass keine systematischen Abweichungen vorliegen oder diese rechnerisch beseitigt werden, stellt die empirische Standardabweichung eine erwartungstreue Schätzung der Messunsicherheit dar. Andernfalls spricht man von einer verzerrten, meist zu optimistischen Schätzung. Die Bestimmung der systematischen Anteile ist aufwändig, da sie vertiefte Kenntnisse des Messsystems voraussetzt.

Diese Bestimmung ist ein wichtiger Teil der Kalibrierung von Messsytemen. Abbildung 2.17 zeigt den schematischen Aufbau eines geodätischen Messsystems nach HENNES & INGENSAND 2000. Danach lässt es sich in Module und Komponenten unterteilen, die wiederum differenziert nach Sensoren, Aktoren und Software betrachtet werden können.

Ein motorisiertes Tachymeter besteht beispielsweise aus wenigstens zwei Modulen: Instrument und Reflektor. Das Instrument enthält die drei Komponenten Distanz-, Richtungs- und Zenitwinkelmessung. Dabei beinhaltet die Komponente Richtungsmessung einen Teilkreis als Sensor, die Motorisierung als Aktor und Software zur Steuerung und Datenverarbeitung. Eine modifizierte Adaptierung des Schemas für einen terrestrischen Laserscanner zeigt Abbildung 2.18.

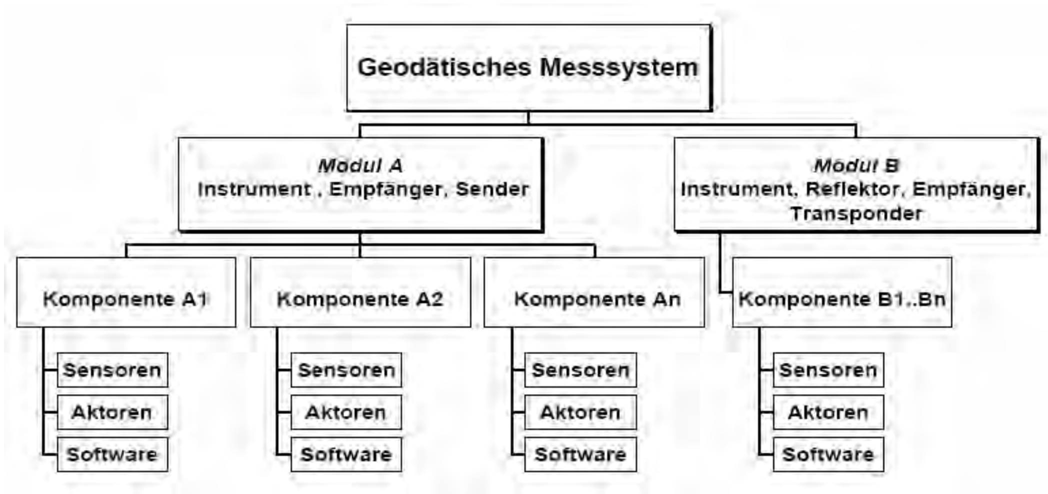


Abbildung 2.17: Geodätisches Messsystem nach Hennes & Ingensand 2000

Laut Deutschem Kalibrierdienst (DKD) bedeutet Kalibrieren die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den angegebenen Werten eines Messgerätes (hier: Messsystem) und den durch genaue Normale festgelegten Werten. Schwarz 1995 definiert eine Kalibrierung ähnlich als das Feststellen von Messabweichungen an fertigen Messgeräten. Zur Prüfung sollten Maßverkörperungen verwendet werden, die an die staatlichen Normale angeschlossen sind.

Durch gezielte Versuche kann es gelingen, mögliche Fehlerursachen zu isolieren und deren Effekte auf das Messergebnis getrennt zu modellieren und rechnerisch zu kompensieren. Für diese Herangehensweise ist der Begriff Komponentenkalibrierung geprägt worden. Dem gegenüber steht der Begriff Systemkalibrierung (Hennes & Ingensand 2000). Das Messsystem wird dabei als Einheit, als so genannte Blackbox betrachtet. Da die Wirkungsweise der einzelnen Komponenten nicht bekannt oder zumindest nicht trennbar ist, wird das System als Ganzes einer Prüfung unterzogen und mit einer einzigen Kalibrierfunktion bedacht. Ein Beispiel für die Vermischung von Komponenten- und Systemkalibrierung ist die Bestimmung der Additionskonstanten der Distanzmesseinheit eines elektronischen Tachymeters. Sie stellt auf der einen Seite eine Komponente des Messsystems Tachymeter dar, bildet aber auf der anderen Seite zusammen mit dem bei der Kalibrierung verwendeten Reflektor ein eigenes Messsystem. Daran wird deutlich, dass die Grenzen zwischen System- und Komponentenkalibrierung fließend sind. Für beide Arten der Kalibrierung gilt, dass sie streng genommen nur für den Zeitpunkt ihrer Durchführung Gültigkeit haben. Eine zeitliche Stabilität der erzielten Parameter kann nur durch regelmäßige Untersuchungen beurteilt werden.

2.4.2 Kalibrierung terrestrischer Laserscanner

Im vorangehenden Kapitel wurde herausgestellt, wie wichtig die Unterscheidung zwischen zufälligen und systematischen Fehlern bei der Untersuchung geodätischer Messsysteme ist. Am Beispiel einer gescannten Passkugel (s. Abbildung 2.11) lassen sich für das System TLS zufällige und systematische Abweichungen verdeutlichen. Wird in die Punktwolke eine ausgleichende Kugel geschätzt, so beschreiben die Abweichungen der gemessenen Punkte von der geschätzten Kugel das Streuverhalten des Systems, also die zufälligen Abweichungen. Die systematischen Abweichungen zeigen sich, wenn die Lage des geschätzten Kugelmittelpunkts gegenüber dem Scannerzentrum mit einem unabhängigen hochgenauen Messverfahren bestimmt und mit dem Ergebnis aus der Scannermessung verglichen wird. Auftretende Lagedifferenzen können verschiedene Ursachen haben. Anhand Abbildung 2.18 wird eine Auswahl von Einflussfaktoren deutlich.

Das Schema stellt eine leicht modifizierte Adaption eines geodätischen Messsystems nach Hennes & Ingensand 2000 für die Datenerfassung mit TLS dar und ist in wesentlichen Teilen von Hesse 2007 übernommen. Es ist insofern modifiziert, als die Software aufgrund ihrer zentralen Stellung ein eigenes Modul bildet. Weiterhin sind den einzelnen Modulen bzw. Komponenten direkt mögliche Einflussfaktoren für systematische Abweichungen zugeordnet. Die meisten Bezeichnungen sind aus der Kalibrierung von Tachymetern bekannt und werden u. a. bei Deumlich & Staiger 2002 erläutert. Tachymeter und Laserscanner haben, abgesehen von den hier nicht weiter behandelten Triangulationsscannern, viele Gemeinsamkeiten. Mit beiden Systemen werden Kugelkoordinaten (s. Abbildung 2.5) gemessen, d. h. sie haben zumindest in der Modellvorstellung zwei orthogonale Achsen, Stehachse und Kippachse, die sich im Nullpunkt der Distanzmessung schneiden. Wird ein Punkt gemessen, soll sein Ortsvektor durch diesen Schnittpunkt und den

Punkt selbst definiert sein. Bei Scannern weicht die technische Umsetzung teilweise von der Modellvorstellung der Kugelkoordinaten ab, kann aber rechnerisch darauf zurückgeführt werden, wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben wurde. Daher sind die möglichen Einflüsse auf die Messung der Raumwinkel vergleichbar, auch wenn die Strahlablenkung bei Scannern unterschiedlich realisiert wird.

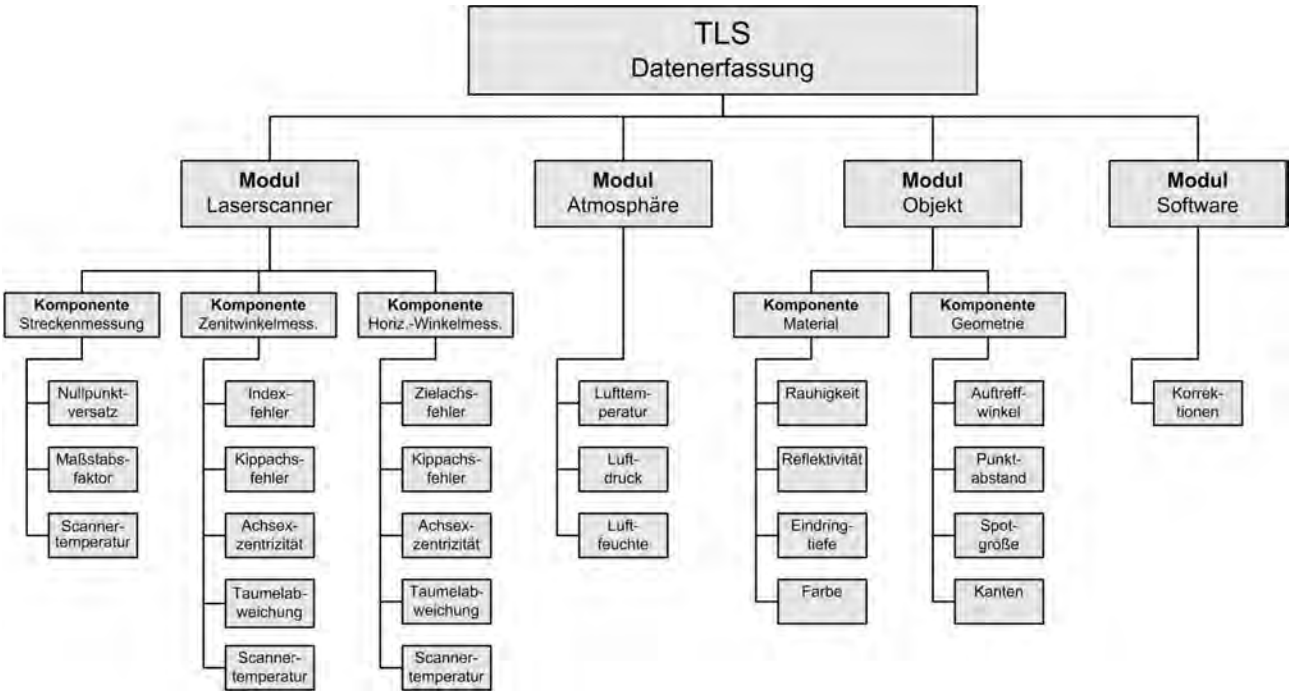


Abbildung 2.18: Module, Komponenten und mögliche Ursachen für systematische Abweichungen bei der Datenerfassung mit TLS (nach HESSE 2007)

Die in Abbildung 2.18 verwendeten Bezeichnungen für mögliche systematische Abweichungen bei den Modulen Laserscanner, Atmosphäre und Software sind Abweichungen von einer Modellvorstellung, welche die komplexen Vorgänge bei einer Messung vereinfacht wiedergibt. Aktuelle Geräteuntersuchungen von Laserscannern werden meist als Komponentenkalibrierung durchgeführt. Dies ist allerdings schwierig, da zwar Kugelkoordinaten gemessen, aber kartesische Koordinaten ausgegeben werden. Neben der reinen Umrechnung (s. Formel (2.1)) werden von der internen Scanner-Software diverse Korrekturen angebracht, die vom Nutzer nicht einsehbar sind. Für eine Komponentenkalibrierung wird daher versucht, durch gezielte Messkonfigurationen die zu untersuchende Komponente in ihrer Wirkung zu isolieren.

Bei der Messung der Raumwinkel können Abweichungen vom Modell der Kugelkoordinaten auftreten. Schneiden sich die Achsen nicht im Scannerzentrum, spricht man von Achsexzentrizitäten. Ein verschobener Nullpunkt in der Winkelmessung tritt als Index- bzw. Zielachsfehler auf. Stehen Kippachse und Stehachse nicht orthogonal zueinander, tritt ein Kippachsfehler auf. Ein Taumelfehler ist eine periodische Abweichung des Zenitwinkels bei der Scannerdrehung um die Stehachse. Systematische Fehler bei der Winkelmessung mit Laserscannern und Taumelfehler werden von NEITZEL 2006a + 2006b sowie SCHULZ 2007 anhand von Messungen auf Zielzeichen untersucht und modelliert.

Für die Komponente Streckenmessung können systematische Abweichungen entsprechend einer Geraden-Ausgleichung mit einem Nullpunktversatz und einem Maßstabsfehler modelliert werden. MECHELKE U. A. 2007 sowie SCHULZ 2007 (S. Abbildung 2.19) führen hierzu Untersuchungen mit Zielzeichen auf Referenzstrecken durch. Ein anderer Ansatz ist das Schätzen eines Maßstabsfaktors durch die Registrierung von Laserscans in einem hochgenau bestimmten 3D-Punktfeld (SCHÄFER & SCHULZ 2005).

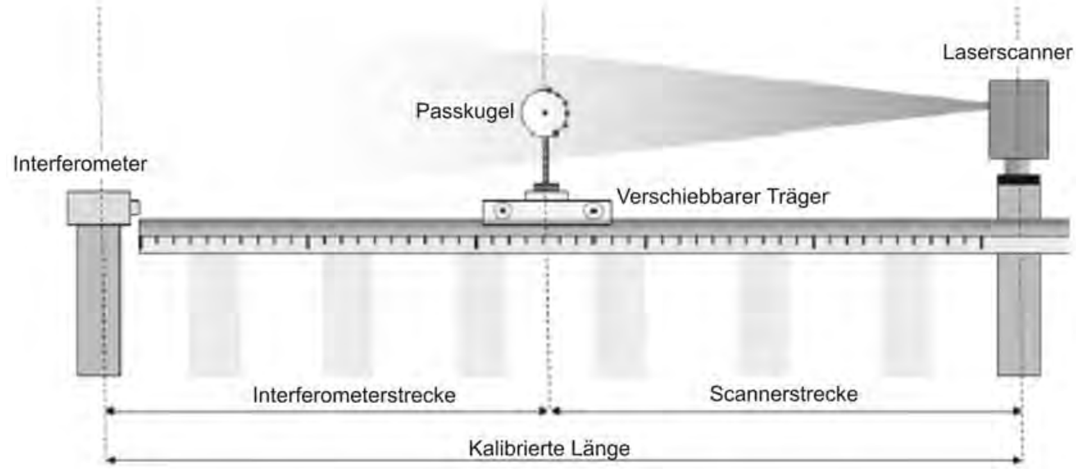


Abbildung 2.19: Kalibrierung der Streckenmessung auf einer Interferometerbahn (SCHULZ 2007)

Einen integrierten Ansatz zur Kalibrierung von Laserscannern stellen RIETDORF 2005 sowie BAE & LICHTI 2007 vor. Sie führen bei der Registrierung von Laserscans über identische Ebenen zusätzliche Parameter für systematische Abweichungen bei Distanz- und Winkelmessungen ein. Die Parameter werden in einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten geschätzt und statistisch bewertet. SCHNEIDER & MAAS 2007 sowie SCHNEIDER & SCHWALBE 2008 schätzen Korrekturparameter der polaren Messelemente eines Laserscanners bei der gemeinsamen Registrierung von Scanner und Digitalkamera in einer Bündelausgleichung und bewerten diese statistisch.

Nach Inbetriebnahme des Scanners können während der Aufwärmphase Abweichungen durch thermische Effekte an den einzelnen Bauteilen auftreten. HESSE 2007 hat hierzu Untersuchungen durchgeführt, mit denen ein signifikanter Einfluss auf die Winkel- und Distanzmessung nachgewiesen werden kann.

Das Modul Atmosphäre ist für Scannermessungen relevant, da der Laserstrahl durch das Medium Luft beeinflusst wird. Der Brechungsindex der Luft kann durch Atmosphärenmodelle beschrieben werden. In der Geodäsie ist das Modell von Barrel und Sears (1939) weit verbreitet. Das Modell quantifiziert die Ausbreitungsgeschwindigkeit und den Brechungswinkel von Lichtwellen in der Luft in Abhängigkeit von deren Temperatur, Druck und Feuchte. Werden diese Parameter gar nicht oder falsch bestimmt, treten systematische Effekte bei den Ergebnissen auf, die allerdings bei Messungen im Nahbereich zu vernachlässigen sind (KERN 2003). Für geodätische Überwachungsmessungen mit Zielweiten im mittleren und großen Entfernungsbereich (s. Abbildung 2.2) ist der Einfluss allerdings von Bedeutung.

Das Modul Objekt nimmt bei Laserscannern, ähnlich wie bei reflektorlos messenden Tachymetern eine wichtige Stellung ein. Das Messergebnis wird durch die Eigenschaften von Material und Geometrie des angemessenen Objekts beeinflusst. Das Material beeinflusst aufgrund seiner Oberflächeneigenschaften die Laserscannermessungen, und zwar hauptsächlich die Distanzmessung. So können je nach Rauhigkeit, Eindringtiefe und Farbe für die einzelnen Scanner-Fabrikate Differenzen im Millimeter-Bereich auftreten (KERN 2003, BÖHLER U. A. 2004). Der Einfluss der Objektgeometrie hinsichtlich des Auftreffwinkels auf das Scanergebnis wurde u. a. von SCHÄFER & SCHULZ 2005 und MECHELKE U. A. 2007 untersucht. Es zeigt sich, dass mit kleiner werdendem Auftreffwinkel das Rauschniveau ansteigt. Wird bei Scannermessungen der Punktabstand am Objekt kleiner als die Spotgröße des Laserstrahls gewählt, überlappen sich die einzelnen Messungen und führen zu stark korrelierten Ergebnissen, deren Genauigkeit oftmals zu optimistisch abgeschätzt wird. Kanten im Objekt können den Laserspot aufteilen und somit die Messungen systematisch verfälschen. KERN 2003 führt dies näher aus.

Das Modul Software regelt die interne Datenverarbeitung des Scanners. Dabei können diverse Fehler auftreten, die in der Regel nur durch eine neue Software-Version des Herstellers behoben werden können. Es ist zudem schwierig für den Nutzer diese Fehler aufzudecken, da in der Regel die verwendeten Algorithmen nicht zugänglich sind. Daher ist es die Aufgabe des Herstellers, regelmäßig die eigene Software zu überprüfen und die Kunden bei Bedarf mit einem Update zu versorgen.

Einen Vorschlag zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern unterbreitet HEISTER 2006. Er stellt eine Weiterentwicklung gegenüber den bisher vorgestellten Arbeiten dar, weil entsprechend der VDE/VDI Richtlinie 2634 „Optische 3D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung" eine Vergleichbarkeit verschiedener Scanner-Fabrikate hergestellt wird. Dies gelingt über standardisierte Prüfverfahren, deren Ergebnis Genauigkeitsaussagen zu den Kenngrößen Antastabweichung, Abstandsabweichung und Ebenheitsmessabweichung sind. Allerdings beschränkt sich das Verfahren weitgehend auf die Bestimmung von Genauigkeitsaussagen und stellt somit kein einheitliches Kalibrierverfahren dar. Nur das Kriterium Abstandsabweichung bietet eine Rückführbarkeit der Längenmessung. Hierzu werden zwei Passkugeln über verschiedene kalibrierte Basislängen fest verbunden und an verschiedenen Positionen in einem räumlichen Messvolumen (s. Abbildung 2.20) mit einem Scanner angemessen. Aus den Abweichungen zwischen den kalibrierten Basislängen und den aus Scannermessungen abgeleiteten Kugelabständen soll auf systematische Längenabweichungen geschlossen werden.

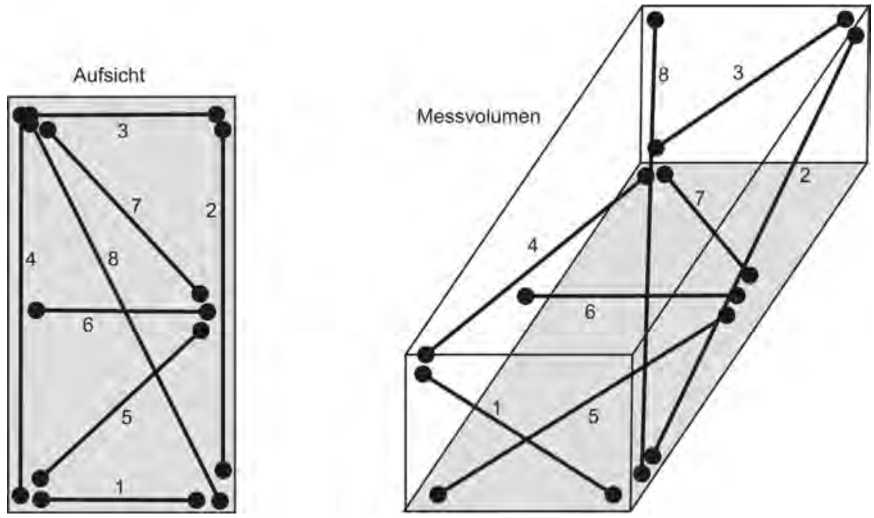


Abbildung 2.20: Empfehlung zur Anordnung der Prüfkörper nach HEISTER 2006

An der Vielzahl der angesprochenen Publikationen sowie der darin behandelten Ansätze zur Kalibrierung von Laserscannern wird deutlich, dass es keine generelle Methode gibt. Zu viele unterschiedliche Messprinzipien kommen zum Einsatz. Beispielsweise ermöglichen Panoramascanner mit rotierendem Spiegel Messungen in zwei Lagen und lassen daher die explizite Bestimmung von Achsfehlern zu. Bei Kamera- und Hybridscannern mit oszillierendem/n Spiegel/n ist die Bestimmung schwieriger. Ein verallgemeinertes Verfahren zur Kalibrierung aller Scannertypen ist daher kaum realisierbar. Der Ansatz von HEISTER 2006 bietet die Möglichkeit, vergleichbare Genauigkeitsangaben für alle Laserscanner zu erzielen. Die Idee sollte daher weiter verfolgt werden. Hinsichtlich der Bestimmung systematischer Abweichungen bestimmter Scannertypen und der Ableitung entsprechender Kalibrierparametern werden weiterhin individuelle Lösungen für die einzelnen Fabrikate gefragt sein. Dabei sollten sowohl Komponenten basierte als auch integrierte Ansätze verfolgt werden.

Die Untersuchungen des in dieser Arbeit eingesetzten Scanners werden in Kapitel 4.1 ausführlich vorgestellt. Als Ergebnis der Untersuchungen wird in Abschnitt 4.2.3 ein erweiterter Transformationsansatz für die Registrierung von Punktwolken vorgestellt, der die Schätzung zusätzlicher Parameter ermöglicht.

3 Bauwerksüberwachung

Geodätische Überwachungsmessungen (Deformationsmessungen) sind ein wesentlicher Bestandteil der Ingenieurvermessung. Sie befassen sich laut DIN 18709 Teil 2 mit der Feststellung von Bewegungen und Verformungen eines Messobjektes. Typische Messobjekte finden sich laut PELZER 1987 in den drei Bereichen:

- Konstruktiver Ingenieurbau,
- Maschinen- und Anlagenbau,
- Boden- und Felsmechanik, Ingenieurgeologie.

Das terrestrische Laserscanning eignet sich aufgrund seiner großen Bandbreite für Messobjekte aus allen drei Kategorien (s. Abbildung 2.2). In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf dem konstruktiven Ingenieurbau. Hierzu zählen Talsperren, Brücken, Türme, Hochhäuser, usw. Geodätische Überwachungsmessungen für diese Art Messobjekt werden auch als Bauwerksüberwachung bezeichnet. Eine Kontrolle von Bauwerken ist notwendig, um ihre Funktion zu gewährleisten und ihre Standsicherheit nachzuweisen. Insbesondere Bauwerke mit einem erhöhten Gefährdungspotential wie Brücken und Stauanlagen müssen sorgfältig überwacht werden. Hierzu zählen neben den geodätischen Verfahren visuelle, mechanische und chemische Kontrollen. In dieser Arbeit soll herausgestellt werden, welchen Beitrag das terrestrische Laserscanning zur geometrischen Überwachung und zu einem vertieften Verständnis des Deformationsverhaltens von Bauwerken leisten kann. Im Folgenden wird eine allgemeine Einführung in die Thematik Geodätische Deformationsmessungen gegeben. Anschließend werden aktuelle Projekte vorgestellt, bei denen TLS für die Bauwerksüberwachung eingesetzt wird.

Die allgemeinen Ausführungen zu Deformationsmessungen basieren zu großen Teilen auf WELSCH U. A. 2000. Es stellt ein Standardwerk für die Planung und Auswertung von Überwachungsmessungen dar.

3.1 Geodätische Deformationsmessungen

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit geodätischen Deformations- bzw. Überwachungsmessungen. Die Begriffe werden synonym verwendet, obwohl streng genommen Deformationen nicht direkt gemessen werden, sondern aus Überwachungsmessungen abgeleitet werden können. Die Ausführungen befassen sich mit Arten von Deformationen, mit Fragen der Diskretisierung von Bauwerken und mit unterschiedlichen Auswertemodellen, wobei insbesondere das Kongruenzmodell näher betrachtet wird. In dem Zusammenhang werden auch Aspekte zum geodätischen Datum behandelt.

Die Betrachtungen geben einen Überblick zum aktuellen Stand der Teilbereiche geodätischer Überwachungsmessungen, die für diese Arbeit relevant sind, bzw. Verwendung finden. Sie sind geprägt von der klassischen geodätischen Herangehensweise, zu überwachende Objekte durch relativ wenige punktartige Messstellen zu diskretisieren, die hochgenau und möglichst redundant bestimmt werden. Das terrestrische Laserscanning bietet durch seine nahezu flächenhafte Abtastung von Objekten neue Möglichkeiten, die bestehenden Verfahren zu ergänzen und weiterzuentwickeln. Darauf wird in den kommenden Unterabschnitten jeweils nur kurz eingegangen. Ab Kapitel 3.2 wird diese Thematik ausführlich behandelt.

3.1.1 Arten von Deformationen

Geodätische Überwachungsmessungen haben das Ziel, Deformationen von Messobjekten zu bestimmen. Im geodätischen Sprachgebrauch umfassen Deformationen Bewegungen und Verformungen von Objekten. Mit Bewegungen sind so genannte Starrkörperbewegungen gemeint. Man unterscheidet Translationen und Rotationen des gesamten Messobjekts. Solche Bewegungen lassen sich durch die Parameter einer Ähnlichkeitstransformation (s. Kapitel 2.2.1) beschreiben. Beispiele sind die Setzung eines Brückenpfeilers oder die Schiefstellung eines Turms.

Typische Verformungen eines Objektes sind Dehnungen, Biegungen oder Torsionen. Sie lassen sich nach PELZER 1987 wie folgt definieren:

- Dehnungen sind relative Längenänderungen, gemessen entweder in Richtung bestimmter (konstruktiver) Hauptachsen des Objekts oder als differentielle Ortsfunktion, wobei die jeweils größte und kleinste Dehnung nach Betrag und Richtung durch den Dehnungstensor beschrieben wird. Eine negative Dehnung wird häufig als Stauchung bezeichnet.
- Durchbiegungen sind Verformungen eines Körpers (Stab, Balken, Platte) senkrecht zu einer konstruktiven Hauptachse.
- Als Torsion bezeichnet man die Verwindung eines Körpers um eine konstruktive Hauptachse.

Die genannten Deformationsarten sind vereinfachende Annahmen, welche die tatsächlichen Objektdeformationen nur näherungsweise beschreiben können. In der Realität treten Mischformen der genannten und komplexere Arten von Deformationen auf. Vereinfachende Annahmen haben den Vorteil, dass sie sich durch wenige Parameter beschreiben lassen und geometrisch anschaulich sind, ohne wesentliche Informationen zu vernachlässigen.

Für Überwachungsmessungen werden Messobjekte häufig durch parametrisierbare geometrische Formen modelliert. Das bietet den Vorteil, dass sich Deformationen durch Änderungen in den Parametern beschreiben lassen. Stehen Konstruktionspläne des Bauwerks zur Verfügung, so können diese zur Modellierung herangezogen werden. Beispielsweise wird der Schornstein einer Industrieanlage meist als senkrechter Kegelstumpf konstruiert. Um seine Deformationen nachzuweisen, kann er durch einzelne Punkte auf seiner Oberfläche räumlich diskretisiert werden. Das bedeutet, dass stellvertretend für das gesamte Objekt das räumliche Verhalten von fest mit dem Bauwerk verbundenen Messstellen beobachtet wird.

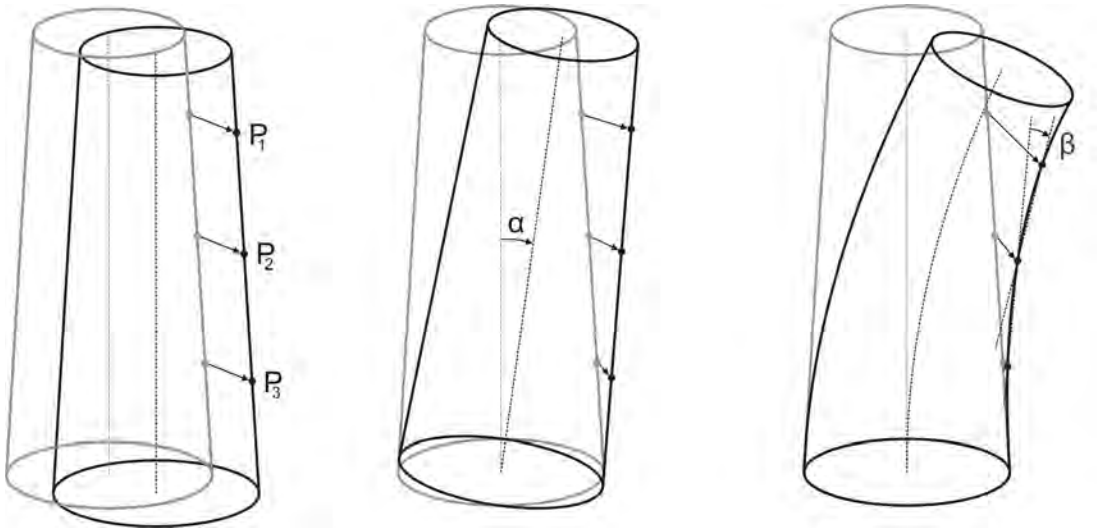


Abbildung 3.1: Beispiele für Deformationen eines Kegelstumpfes

Abbildung 3.1 zeigt drei verschiedene Deformationen eines Kegelstumpfes. Der ursprüngliche Zustand ist jeweils in Grau, der deformierte in Schwarz dargestellt. Zwischen den beiden Zuständen liegt eine Zeitdifferenz. Dadurch wird das Objekt nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich diskretisiert. Man spricht in diesem Zusammenhang von Beobachtungsepochen. Jede Epoche entspricht der Beobachtung des Objektzustands zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die räumliche Diskretisierung erfolgt durch drei Punkte (P_1 – P_3), die in einem vertikalen Profil an der Oberfläche des Kegels angebracht sind. Die Position der Punkte wird zu zwei Zeitpunkten bestimmt. Die Verschiebungsvektoren zeigen ihre Bewegung zwischen den beiden Epochen. Die Aspekte der Diskretisierung von Bauwerken werden in Abschnitt 3.1.2 ausführlich behandelt.

Im linken Beispiel von Abbildung 3.1 ist das Objekt ist in seiner Lage verschoben. Daher sind alle drei Vektoren räumlich parallel und gleich lang. Im mittleren Beispiel resultiert die Bewegung der diskreten Punkte aus einer Schiefstellung des Kegelstumpfes um den Winkel α. Die Verschiebungsvektoren sind nicht parallel, liegen aber in einer räumlichen Ebene mit den Rotationsachsen (gestrichelt dargestellt) des Kegels in beiden Zuständen. Die Länge der Vektoren nimmt von Punkt P_1 zu Punkt P_3 linear zu. Das rechte Beispiel zeigt eine Verformung (genauer: Biegung) des Objekts. Die Verschiebungsvektoren sind ebenfalls nicht parallel und liegen in der gleichen räumlichen Ebene wie bei der Schiefstellung des Kegelstumpfes. Ihre Länge nimmt in diesem Fall nicht linear, sondern quadratisch zu. Des Weiteren tritt ein Winkel $\beta > 0°$ zwischen den zwei räumlichen Geraden auf, welche durch die drei Punkte im deformierten Zustand definiert sind. Die eine Gerade verläuft durch die Punkte P_1 und P_2, die andere durch die Punkte P_2 und P_3.

3.1.2 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt wurde, werden zu überwachende Bauwerke räumlich und zeitlich diskretisiert. Physikalisch gesehen, stellt ein Bauwerk ein mechanisches Kontinuum dar. Um seine Deformationen in Raum und Zeit vollständig zu erfassen, muss sein physikalisches Verhalten permanent und gänzlich beobachtet werden. Das ist zum einen technisch kaum realisierbar und zum anderen wirtschaftlich nicht vertretbar. Aus diesem Grund werden Bauwerke für Überwachungsaufgaben abstrahiert, d. h. in gewisser Weise idealisiert. Dazu können am Bauwerk verteilt diskrete Messstellen angebracht werden, die epochenweise geodätisch beobachtet werden. Diese Messstellen haben theoretisch gesehen keine räumliche Ausdehnung und werden daher im geodätischen Sprachgebrauch als Punkte bezeichnet. Die Bewegungen der Messstellen (Punkte) zwischen den Epochen repräsentieren die Bewegung des Bauwerks. Dadurch findet ein Übergang von einer kontinuierlichen zu einer zeitlich und räumlich diskreten Betrachtungsweise statt. Hierzu sind für die Bauwerksüberwachung einige Aspekte zu beachten:

- Anzahl der Messstellen

Die Anzahl der Messstellen ist meist ein Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Messdauer auf der einen sowie Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Zustandsbestimmung auf der anderen Seite. Je mehr Messstellen an einem Bauwerk installiert werden, desto höher sind die Installationskosten und desto länger dauert eine Messepoche. Gleichzeitig verbessern sich mit einer größeren Anzahl von Messstellen die Genauigkeit und auch die Zuverlässigkeit des abgeleiteten Deformationsverhaltens.

- Verteilung der Messstellen

Neben der Anzahl ist auch die Verteilung der Messstellen am Bauwerk von Bedeutung für die Bestimmung der Deformationen. Die Messstellen sollten gleichmäßig über das gesamte Bauwerk verteilt sein. Zudem sollten Bereiche des Bauwerks, an denen Deformationen erwartet werden, dichter mit Messstellen ausgerüstet werden, als Bereiche an denen weniger oder keine Deformationen zu erwarten sind. Für die bestmögliche Platzierung von Messstellen ist der interdisziplinäre Austausch, beispielsweise mit dem verantwortlichen Statiker von großer Bedeutung.

Die Bedeutung von Anzahl und Verteilung der Messstellen kann anhand von Abbildung 3.1 verdeutlicht werden. Sind ausschließlich Starrkörperbewegungen zu erwarten, reichen wenige Punkte aus. In der Realität kann allerdings selten von reinen Starrkörperbewegungen ausgegangen werden. Sollen auch Verformungen nachgewiesen werden, setzt dies eine höhere Anzahl von Messstellen mit einer an die erwartete Verformung angepassten Verteilung über das Bauwerk voraus. An dieser Stelle wird das Potential von TLS für die Bauwerksüberwachung deutlich. Aktuell werden hauptsächlich klassische geodätische Messverfahren wie reflektorbasierte Tachymetrie, GPS und Nivellement für die geometrische Bauwerksüberwachung eingesetzt. Sie liefern hochgenaue und zuverlässige Ergebnisse, haben aber den Nachteil, dass für jede Messstelle Installationen (Reflektor, Antenne, Bolzen) am Bauwerk notwendig sind, welche die Kosten und die Messdauer signifikant erhöhen.

Mit terrestrischem Laserscanning können grundsätzlich in kurzer Zeit sehr viele Punkte bestimmt werden, ohne dass Installationen am Bauwerk notwendig sind. Das führt zu einer sehr hohen räumlichen Diskretisierung des Bauwerks. Liegt bei den oben genannten Verfahren der Abstand der Messstellen am Gebäude bei einigen Metern, können mit TLS Punktabstände am Objekt im Millimeter-Bereich erzielt werden. Allerdings sind diese Punkte aufgrund der rasterförmigen Abtastung durch den Scanner nicht reproduzierbar. Daher wird das terrestrische Laserscanning auch als flächenhaft messendes Verfahren bezeichnet. Objektdeformationen sind nun aus Flächenparametern oder aus abgeleiteten, reproduzierbaren Punkten zu bestimmen (s. Kapitel 3.2, 4.3).

Nachteilig wirkt sich aus, dass aktuell der Fehlerhaushalt von TLS (s. Kapitel 2.4.2) nicht hinreichend gut bekannt ist. Daher wird für einzelne Punkte hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit nicht das Niveau der genannten Messverfahren erreicht. Durch mathematische Auswerteverfahren und die Kombination mit den etablierten geodätischen Messverfahren kann dieser Nachteil kompensiert werden. Aktuelle Ansätze dazu fasst Kapitel 3.2 zusammen. Eine eigene Methodik wird in Kapitel 4 entwickelt und in Kapitel 5 an einem Beispiel erprobt.

- Häufigkeit und Dauer der Messungen.

Die Häufigkeit der Messepochen ist ebenso wie die Anzahl der Messstellen das Ergebnis einer Abwägung zwischen der Minimierung der Diskretisierungsfehler und praktischen Beschränkungen wie den Kosten. Abbildung 3.2 stellt den Zusammenhang zwischen kontinuierlichem Bauwerksverhalten und zeitlich diskretisierten Messungen dar.

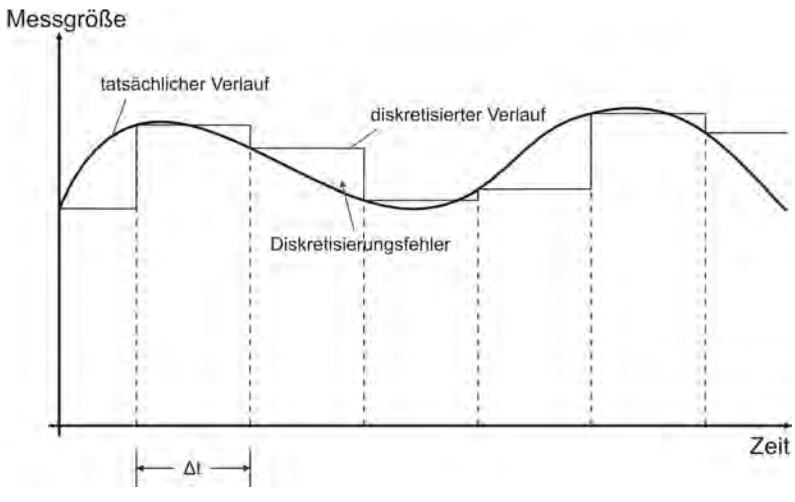


Abbildung 3.2: Diskretisierungsfehler einer Messgröße nach WELSCH U. A. 2000

Es wird deutlich, dass mit wachsendem Zeitabstand Δt zwischen zwei Messungen die Differenz zwischen tatsächlichem und diskretisiertem Verlauf der Messgröße, der so genannte Diskretisierungsfehler, größer werden kann. Liegen Erfahrungswerte über den zeitlichen Verlauf des Bauwerksverhaltens aus Modellen und/oder empirischen Daten vor, können Häufigkeit und Zeitpunkt der Messungen entsprechend geplant werden. Ziel sollte sein, die Messepochen zu den Extremzuständen des Bauwerks durchzuführen und den erwarteten Verlauf zwischenzeitlich durch weitere Epochen zu kontrollieren. Besitzt das Bauwerk ein erhöhtes Gefährdungspotential und sind Extremzustände zu erwarten, aber zeitlich nicht vorhersehbar, sollten die Zeitabstände zwischen den Messungen klein sein. Werden die Messstellen dauerhaft und automatisiert in kurzen Abständen (Stunden, Minuten, Sekunden) beobachtet, wird dies als kontinuierliche Überwachung bezeichnet. Hierzu werden beispielsweise fest installierte motorisierte Tachymeter oder auch permanent aufzeichnende GPS Empfänger eingesetzt. Dies ist theoretisch auch mit terrestrischen Laserscannern möglich, wird derzeit allerdings noch nicht praktiziert.

Hinsichtlich der zeitlichen Diskretisierung ist auch die Dauer einer Messepoche zu beachten. Theoretisch darf eine Messung zu einem diskreten Zeitpunkt keine zeitliche Ausdehnung haben. In der Praxis ist das jedoch nicht realisierbar. Daher ist anzustreben, dass sich das Bauwerk während der Messdauer nicht signifikant deformiert. Meist ist das Bauwerksverhalten nicht manuell beeinflussbar, daher ist die Messmethode entsprechend der erwarteten Geschwindigkeit der Deformation zu wählen.

Laserscanning wird im kinematischen Fall für die Überwachung schneller Deformationen und im statischen Fall zur Überwachung langsamer Deformationen eingesetzt (s. Abbildung 2.2). Mit schnellen Deformationen sind Bauwerksbewegungen und –verformungen innerhalb von Sekunden und Minuten gemeint. Beispiele dafür sind Schwingungsmessungen an Windenergieanlagen und Deformationsmessungen an Schleusentoren während eines Schleusungsvorgangs wie sie von Kutterer & Hesse 2006 vorgestellt werden. In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk auf der Auswertung statischer Scans zur Bauwerksüberwachung. Das Beispiel in Kapitel 5 behandelt die Überwachung einer Talsperre. Eine vollständige Messepoche benötigt derzeit ungefähr einen Arbeitstag. Die Deformationen der Talsperre verlaufen so langsam, dass diese Messdauer hinsichtlich der zeitlichen Diskretisierung unproblematisch ist.

3.1.3 Auswertemodelle bei Überwachungsmessungen

Die bisherigen Betrachtungen zu Bauwerksüberwachungen befassen sich mit verschiedenen Arten von Deformationen und mit räumlichen und zeitlichen Diskretisierungen des Bauwerks, um diese zu bestimmen. Die kommenden Ausführungen behandeln mögliche Ursachen von Deformationen sowie die Frage, ob und wie diese bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden können.

Ursachen von Deformationen und deren zeitlicher Verlauf

Wie bereits erwähnt, stellt ein Bauwerk, physikalisch gesehen, ein mechanisches Kontinuum dar. Es befindet sich im Gleichgewicht mit den einwirkenden Kräften und reagiert auf deren Variationen. Innerhalb gewisser Grenzen reagiert das Bauwerk mit elastischen Deformationen. Erst wenn die einwirkenden Kräfte zu groß werden und/oder das Bauwerk aufgrund von Abnutzungserscheinungen statisch instabil wird, kommt es zu plastischen Deformationen und schließlich zum statischen Versagen.

Typische, auf ein Bauwerk einwirkende Kräfte, sind Windlasten, Temperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung, Wasserstandsänderungen und Verkehrslasten. Im Kontext von Überwachungsmessungen werden sie als Eingangsgrößen bezeichnet, auf die ein Objekt mit Deformationen reagiert. Der zeitliche Verlauf der Deformationen resultiert aus dem Verlauf der Eingangsgrößen. Nach Pelzer 1987 kann der zeitliche Verlauf der üblichen Eingangsgrößen auf drei Grundtypen zurückgeführt werden:

- Periodische Variationen der Eingangsgröße führen zu phasenverschobenen periodischen Deformationsverläufen mit abweichender Amplitude. Typische periodisch verlaufende Eingangsgrößen sind der Wasserstand unter Gezeiteneinfluss oder die tägliche Temperaturkurve. So reagiert ein durch die Tide beeinflusster Tunnel mit zeitlich versetzten und vom Betrag her kleineren Hebungen und Senkungen auf den periodisch wechselnden Wasserstand.
- Mit sprunghaften Änderungen werden Verläufe bezeichnet, bei denen die Eingangsgröße sich plötzlich ändert und auf einem neuen Niveau stabilisiert. Sprunghafte Änderungen führen zu einer schnell ansteigenden Deformation, deren Geschwindigkeit langsam abnimmt. Ein Beispiel ist eine Lawine, die auf ein Bauwerk trifft und dadurch gestoppt wird.
- Die lineare Änderung einer Eingangsgröße und das resultierende Deformationsverhalten zeigt Abbildung 3.3. Der Wert der Eingangsgröße y steigt ab einem Zeitpunkt t_A für eine Zeitspanne Δt linear an und verläuft anschließend wieder konstant. Das Bauwerk reagiert mit einer langsam ansteigenden Deformation x, deren Geschwindigkeit zum Zeitpunkt $t_A+\Delta t$ am größten ist und danach wieder langsam abklingt. Ein Beispiel für eine linear verlaufende Eingangsgröße ist eine Absenkung des Grundwassers für größere Bauvorhaben oder in der Umgebung von Tagebaugebieten.

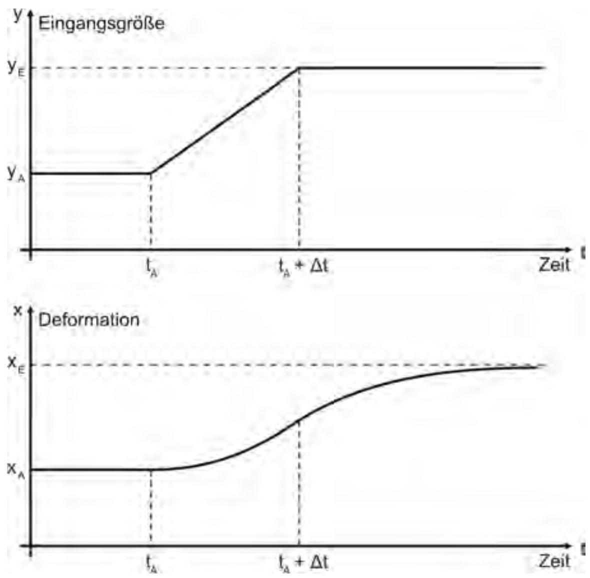


Abbildung 3.3: Deformation infolge der linearen Änderung einer Einflussgröße nach WELSCH U. A. 2000

In der Realität wirken immer mehrere Eingangsgrößen auf ein Bauwerk. Einen funktionalen Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und Deformation herzustellen, verlangt ein vertieftes Verständnis des Bauwerks, seiner beeinflussten und beeinflussenden Umgebung und der Wirkung der wesentlichen Eingangsgrößen. In diesem Zusammenhang wird auch von dem System Bauwerk gesprochen. Dessen Modellierung erfordert eine Zusammenarbeit aller daran beteiligten Disziplinen, u a. sind das Statiker, Bauingenieure, Geologen und Geodäten.

Auswertemodelle

Für die Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen haben sich vier Konzepte etabliert. Sie sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Auf der ersten Unterteilungsebene werden deskriptive und kausale Modelle unterschieden. Die deskriptiven Modelle beschränken sich auf die Beschreibung der Deformationen, ohne die Wirkung der Eingangsgrößen zu modellieren. Zu ihnen zählen das Kongruenzmodell und das kinematische Modell. Bei den kausalen Modellen wird die Deformation als Funktion der Eingangsgrößen modelliert. Sie werden in statische und dynamische Modelle unterteilt.

Beim Kongruenzmodell werden weder die Zeit noch die Wirkung der Eingangsgrößen modelliert. Es wird der geometrische Zustand des Bauwerks zu zwei oder mehr Epochen verglichen. Dabei wird auf geometrische Identität (Kongruenz) hin überprüft. In der Praxis werden wirkende Eingangsgrößen für qualitative Interpretationen möglicher Deformationen registriert. So werden beispielsweise für die Auswertungen von Überwachungsmessungen an einer Talsperre im Kongruenzmodell zumindest der Wasserstand und die Temperaturverhältnisse als wesentliche Einflussparameter erfasst, um Deformationen bewerten zu können, auch wenn ein funktionaler Zusammenhang nicht modelliert wird.

Das kinematische Modell betrachtet die Bauwerksdeformationen als Bewegung der Zeit. Die Bewegung wird beispielsweise durch Polynom- oder trigonometrische Ansätze modelliert. Dies setzt theoretische Kenntnisse über das Bauwerksverhalten und somit über die Eingangsgrößen voraus. Unterliegt das Bauwerk dominierenden periodischen Einflüssen, so wird seine Deformation ebenfalls periodisch verlaufen.

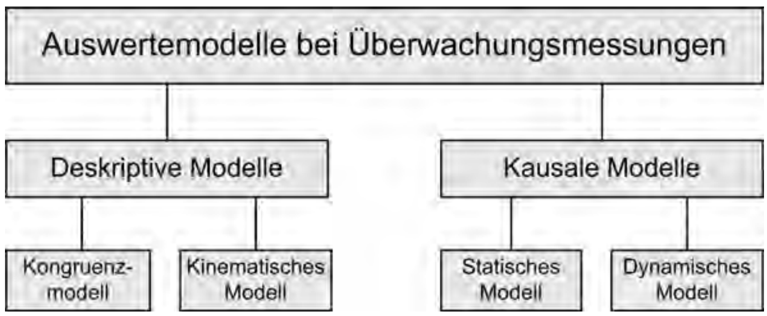


Abbildung 3.4: Auswertemodelle bei Überwachungsmessungen nach WELSCH U. A. 2000

Statische Modelle setzen wirkende Kräfte und resultierende Deformationen in einen funktionalen Zusammenhang. Sie kommen bei Bauwerken zum Einsatz, die keinen schnellen Deformationen unterliegen, da die Zeit im Modell nicht berücksichtigt wird. Statische Modelle setzen das weiter oben angesprochene vertiefte Verständnis über das System Bauwerk und seine physikalische Struktur voraus. Sie werden deshalb den Strukturmodellen zugeordnet.

Dynamische Modelle quantifizieren Bauwerksdeformationen als Funktion von Eingangsgrößen und Zeit. Sie werden entweder den angesprochenen Strukturmodellen oder den Verhaltensmodellen zugeordnet. Bei Verhaltensmodellen ist die innere physikalische Struktur des Systems Bauwerk nicht bekannt. Der funktionale Zusammenhang wird aus empirischen Größen abgeleitet.

Der in dieser Arbeit entwickelte methodische Ansatz zur Bauwerksüberwachung mit TLS kann theoretisch bei allen vier genannten Auswertemodellen integriert werden. In der praktischen Erprobung des Ansatzes an der Okertalsperre im Harz wird das Kongruenzmodell angewendet, um die Stabilität der Referenzpunkte zu überprüfen, da es ohne vertiefte Kenntnisse des Bauwerks und der Umgebung umsetzbar ist. Eine ausführliche Darstellung des Kongruenzmodells folgt in Kapitel 3.1.4.

Relative und absolute Deformationen

Bei der Einrichtung von Messstellen zur Überwachung eines Bauwerks (Objekts) muss im Vorfeld geklärt werden, ob etwaige Bewegungen und Verformungen als relative oder absolute Deformationen oder als Kombination beider betrachtet werden sollen. Bei relativen Betrachtungen wird die gegenseitige Lage diskreter varianter Messstellen epochenweise bestimmt. Werden Punktbewegungen bezüglich eines festen, übergeordneten Bezugssystems erfasst, spricht man von absoluten Deformationsmessungen.

Eine Kombination beider Verfahren zur Überwachung eines ausgedehnten räumlichen Objektes zeigt Abbildung 3.5. Das zu überwachende Objekt ist durch Objektpunkte räumlich diskretisiert. Die Messstellen sind untereinander durch geodätische Beobachtungen (Richtungs- und Streckenmessungen, GPS-Basislinien, Höhenunterschiede, etc.) so verknüpft, dass ihre gegenseitige Position bestimmt werden kann. Ändern sich ihre relative Positionen, kann daraus auf Verformungen des Objekts im Sinne von Abschnitt 3.1.1 geschlossen werden. Um Bewegungen des gesamten Objekts, beispielsweise eine Hebung oder Senkung festzustellen, erfolgt eine Anbindung der Objektpunkte an einen festen Referenzrahmen, der durch Stützpunkte realisiert ist. Die Stützpunkte liegen außerhalb des Einflussgebietes des Objekts und sind dauerhaft vermarkt. Die Annahme ihrer räumlichen Stabilität wird durch gegenseitige Kontrollmessungen und durch ihre messtechnische Anbindung an weiter zurück liegende Sicherungspunkte überprüft.

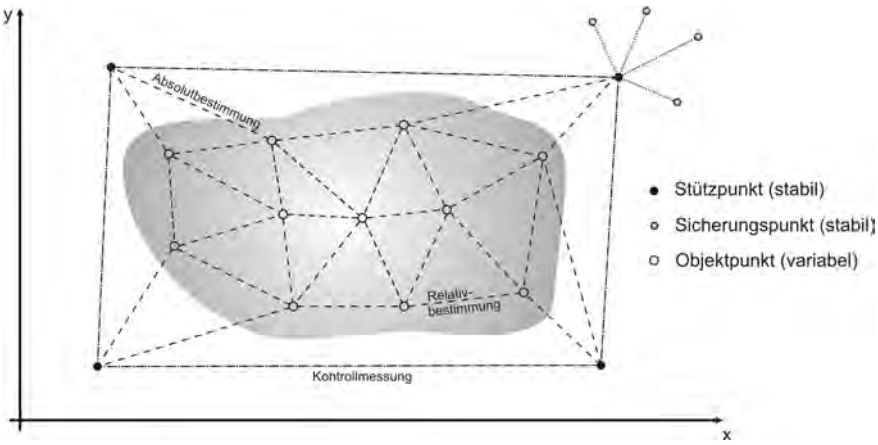


Abbildung 3.5: Geometrisches Objektmodell nach PELZER 1987

Um die räumliche Stabilität der Stütz- und Sicherungspunkte anhand der Kontrollmessungen sowie der Objektpunkte anhand der Absolut- und Relativbestimmungen zu beurteilen, werden statistische Methoden verwendet. Diese werden im folgenden Kapitel 3.1.4 näher erläutert.

Hinsichtlich der Nutzung von TLS zur Bauwerksüberwachung stellt sich ebenfalls die Frage von relativen und/oder absoluten Deformationsmessungen. Absolute Betrachtungen setzen eine Georeferenzierung der Punktwolken voraus. Dies erfolgt über Transformationen der in den lokalen Scanner-Systemen gemessenen Punktwolken in das System der Stütz- und Sicherungspunkte (s. Kapitel 2.2). Anhand der registrierten Punktwolken zu verschiedenen Epochen können absolute Bauwerksdeformationen abgeleitet werden. Sollen ausschließlich relative Deformationen betrachtet werden, kann auf die Georeferenzierung der Scans verzichtet werden. Die Verknüpfung der Punktwolken ist in diesem Fall ausreichend. Die Ableitung von Objektdeformationen erfolgt zum Beispiel aus der Überlagerung zweier verknüpfter Punktwolken aus verschiedenen Epochen. Aktuelle Ansätze und Untersuchungen zur Bauwerksüberwachung mit TLS werden in Kapitel 3.2 erläutert. Dort wird ebenfalls zwischen absoluten und relativen Ansätzen unterschieden. Der in den Kapiteln 4 und 5 dieser Arbeit behandelte Ansatz zur Bauwerksüberwachung mit TLS wurde entwickelt, um absolute Deformationen nachzuweisen.

3.1.4 Das Kongruenzmodell

Im Kongruenzmodell werden zwei oder mehr Epochen auf Identität hin überprüft. Wie im vorangehenden Abschnitt erläutert, werden Deformationen dabei nicht als Funktion von Eingangsgrößen dargestellt und auch die Zeit wird nicht modelliert. Ausführlich wird das Modell bei PELZER 1987, WELSCH U. A. 2000 und NIEMEIER 2002 beschrieben. An dieser Stelle werden die wichtigsten Formeln und Zusammenhänge für die Auswertung zweier Epochen von beobachteten geodätischen Netzen dargestellt. Als geodätische Netze werden durch Beobachtungen miteinander verknüpfte diskrete Punkte bezeichnet. Das Beispiel in Abbildung 3.5 stellt ein geodätisches Netz dar. Die Schätzung der gesuchten Parameter, also die Koordinaten der diskreten Punkte, erfolgt meist durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten, im Rahmen einer Netzausgleichung (ausführlich beschrieben und hergeleitet in: WELSCH U. A. 2000, NIEMEIER 2002). Hierfür stehen kommerzielle Softwarepakete zur Verfügung. Für die in dieser Arbeit gerechneten Netze wurde das am Geodätischen Institut Hannover entwickelte Programm HANNA (HANnoversche NetzAusgleichung) verwendet. Die ausgeglichenen Punktkoordinaten dienen als Referenzpunkte für die Registrierung der Laserscanner-Punktwolken und als unabhängige Kontrolle der daraus abgeleiteten Deformationen (s. Kapitel 4 und 5). Hier wird zunächst auf den Aspekt des geodätischen Datums eingegangen, bevor im weiteren Verlauf die Kongruenzanalyse für ein in zwei Epochen gemessenes, zweistufiges Netz näher dargestellt wird.

Datumsverfügung und Datumsübergang

Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswertung geodätischer Netze zur Deformationsanalyse ist die Datumsverfügung. Als geodätisches Datum wird die örtliche Festlegung eines Koordinatensystems bezeichnet. Für die hier behandelten räumlichen Netze geschieht dies durch die sieben Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (s. Kapitel 2.2.1). Es wird über die Lagerung, die Orientierung und den Maßstab des Netzes verfügt. Dies geschieht bei Überwachungsnetzen meist über die Koordinaten vermarkter Punkte. Bei der Auswertung der Messungen gibt es hinsichtlich der Datumsverfügung zwei wesentliche Herangehensweisen: Die Netzausgleichung unter Zwang und die freie Netzausgleichung.

Bei der Ausgleichung räumlicher Netze unter Zwang werden die Koordinaten von wenigstens drei Punkten als unveränderlich in die Ausgleichung eingeführt. Trifft diese Annahme nicht zu, d. h. hat sich ihre gegenseitige Lage zwischenzeitlich verändert, treten bei der Auswertung der Beobachtungen Spannungen auf, welche auf die als veränderlich betrachteten Punkte übertragen werden.

Die freie Netzausgleichung kompensiert diesen Nachteil, indem bei der Auswertung keine Punkte als unveränderlich betrachtet werden. Die Koordinaten aller Netzpunkte werden als unbekannte Parameter betrachtet, zu deren Schätzung in einem linearisierten Modell Näherungswerte benötigt werden. Die Lagerung des beobachteten Netzes erfolgt spannungsfrei auf diesen Näherungswerten. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist bei einer Deformationsanalyse darauf zu achten, in jeder Epoche die gleichen Näherungswerte zu verwenden. Erfolgt die Lagerung des Netzes auf allen Netzpunkten, wird dies als Gesamtspurminimierung bezeichnet. Auswertetechnisch hat das zur Folge, dass für alle ausgeglichenen Parameter die Spur der Kovarianzmatrix minimiert wird. Zieht man zur Lagerung des Netzes nur ausgewählte Punkte, die so genannten Datumspunkte, heran, spricht man von einer Teilspurminimierung. Bei Überwachungsmessungen wird häufig ein zweistufiger Netzaufbau, ähnlich Abbildung 3.5, gewählt. Die Lagerung des Netzes erfolgt auf den fest vermarkten und a priori als stabil angenommenen Stütz- und Sicherungspunkten, die als Datumspunkte verwendet werden. Für diese Punkte wird die Spur der Kovarianzmatrix minimiert, d. h. diese Netzpunkte werden am genauesten bestimmt. Die Objektpunkte werden nicht zur Lagerung des Netzes genutzt, da sie als Teil des zu überwachenden Objektes a priori als variabel in ihrer Position betrachtet werden. Aufgrund der genannten Eigenschaften wird für die Auswertung des in dieser Arbeit behandelten Überwachungsnetzes einer Talsperre eine freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung verwendet.

Für die Kongruenzanalyse ist es erforderlich, dass beide Epochen im gleichen Datum vorliegen. Das impliziert die Verwendung derselben Datumspunkte und identischer Näherungswerte für die zu schätzenden Koordinaten. Werden bei der Ausgleichung der einzelnen Epochen verschiedene Datumspunkte verwendet oder stellen sich bei der Analyse einige Datumspunkte als instabil heraus, wird ein rechnerischer Datumsübergang genutzt. Hierfür hat sich das Verfahren der S-Transformation etabliert. Es wird ausführlich von ILLNER 1985 behandelt und auch bei KOCH 2004 hergeleitet.

Die Transformationsvorschrift für einen ausgeglichenen Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$ und dessen Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}}$ von einem Datum j in ein Datum k lautet:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{x}}_j, \quad \dim\left(\hat{\mathbf{x}}_k\right) = (u,1) \\ \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}_k} &= \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{x}\hat{x}_j} \cdot \mathbf{S}^T. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Die verwendete Matrix **S** berechnet sich wie folgt:

$$\mathbf{S} = \mathbf{I} - \mathbf{G} \cdot \left(\mathbf{G}_P{}^T \cdot \mathbf{G} \right)^{-1} \cdot \mathbf{G}_P{}^T, \quad \mathbf{G}_P = \mathbf{E} \cdot \mathbf{G} \,. \tag{3.2}$$

Dabei setzt sich für ein räumliches Netz die Matrix **G** blockweise pro (auf den Schwerpunkt zentrierten) Punkt P so zusammen:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -z'_P & y'_P & x'_P \\ 0 & 1 & 0 & z'_P & 0 & -x'_P & y'_P \\ 0 & 0 & 1 & -y'_P & x'_P & 0 & z'_P \end{bmatrix}. \tag{3.3}$$

Die Matrix **G** wird für alle Netzpunkte aufgestellt. Sie hat für ein 3D-Netz die Dimension (u, 7). Die sieben Spalten von **G** resultieren aus den sieben Parametern der räumlichen Ähnlichkeitstransformation. Über die Matrix **E** wird gesteuert, welche Punkte als Datumspunkte verwendet werden. Soll das neue Datum k dem Ergebnis einer Gesamtspurminimierung entsprechen, wird **E** als Einheitsmatrix mit der Dimension (u, u) gewählt. Bei einer Teilspurminimierung werden für jeden Punkt der im Datum k kein Datumspunkt sein soll, die Hauptdiagonalelemente von **E** mit Nullen besetzt. Die in Formel (3.2) verwendete Matrix **I** ist eine Einheitsmatrix mit der Dimension (u, u).

Kongruenzanalyse

Als Ergebnisse von zwei freien Netzausgleichungen mit Lagerung auf denselben Datumspunkten liegen zu den beiden Epochen 1 und 2 die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}_i$, ihre Kofaktormatrizen $\mathbf{Q}_{\hat{x}_i\hat{x}_i}$, die Schätzwerte $\hat{\sigma}^2_{0_i}$ des Varianzfaktors sowie die Freiheitsgrade f_i der Schätzung vor:

$$\text{Epoche i}: \quad \hat{\mathbf{x}}_i, \quad \mathbf{Q}_{\hat{x}_i\hat{x}_i}, \quad \hat{\sigma}^2_{0_i}, \quad f_i \qquad i = 1, 2\,. \tag{3.4}$$

Entsprechend dem zweistufigen Netzaufbau wird die Kongruenzanalyse in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt wird die Annahme der stabilen Datumspunkte mit einer Rückwärtsstrategie überprüft. Anschließend werden im zweiten Schritt die Objektpunkte mit einer Vorwärtsstrategie hinsichtlich ihrer Stabilität getestet.

Schritt 1: Überprüfung der Datumspunkte, Rückwärtsstrategie → Datumsfestlegung

Im ersten Schritt der zweistufigen Kongruenzanalyse werden die Datumspunkte auf Stabilität hin untersucht. Dazu werden zunächst alle Datumspunkte gemeinsam in einem Globaltest überprüft. Werden dabei Punktbewegungen festgestellt, werden sukzessive einzelne Punkte aus der Gruppe der Datumspunkte entnommen, bis eine stabile Gruppe identifiziert wird. Daher wird dieses Verfahren als Rückwärtsstrategie bezeichnet.

Zunächst wird überprüft, ob die Beobachtungen beider Epochen einer gemeinsamen Grundgesamtheit entstammen. Hierzu werden die beiden Schätzwerte für den Varianzfaktor in einem Hypothesentest verglichen. Ihr Quotient kann dabei als Fisher-verteilte Testgröße verwendet werden:

$$T = \frac{\hat{\sigma}^2_{0_1}}{\hat{\sigma}^2_{0_2}} \sim F_{f_1,f_2} \,|\, H_0 \,. \tag{3.5}$$

Unterscheiden sich die Schätzwerte nicht signifikant, ist die Basishypothese der Kongruenzanalyse erfüllt. Anschließend wird mit dem Globaltest die Kongruenz der Datumspunkte gemeinsam überprüft. Dazu wird die von PELZER 1971 eingeführte Fisher-verteilte Testgröße F wie folgt gebildet:

$$F = \frac{\mathbf{d}^T \cdot \mathbf{Q}^+_{\mathbf{dd}} \cdot \mathbf{d}}{s_0^2 \cdot h} \sim F_{h,f} \,|\, H_0, \quad h = \mathrm{rg}(\mathbf{Q}_{\mathbf{dd}})\,. \tag{3.6}$$

Der Vektor **d** wird als Differenz der Datumspunkte zu beiden Epochen ($\hat{\mathbf{x}}_1^D$, $\hat{\mathbf{x}}_2^D$) berechnet, die jeweils eine Teilmenge der Parametervektoren $\hat{\mathbf{x}}_i$ aus Formel (3.4) darstellen. Die Kofaktormatrix zu **d** ergibt sich nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz unter der Voraussetzung dass Korrelationen zwischen den Epochen vernachlässigt werden können, wie in Formel (3.7) beschrieben. Da $\mathbf{Q}_{\mathbf{dd}}$ singulär ist, wird für die quadratische Testgröße F die Pseudoinverse $\mathbf{Q}_{dd}{}^+$ verwendet. Die Größe h entspricht dem Spaltenrang von $\mathbf{Q}_{\mathbf{dd}}$.

$$\mathbf{d} = \hat{\mathbf{x}}_2^D - \hat{\mathbf{x}}_1^D, \quad \mathbf{Q}_{\mathbf{dd}} = \mathbf{Q}^D_{\hat{x}_1\hat{x}_1} + \mathbf{Q}^D_{\hat{x}_2\hat{x}_2} \tag{3.7}$$

Der gemeinsame empirische Varianzfaktor s_0^2 und die gemeinsamen Freiheitsgrade f berechnen sich aus den Varianzfaktoren und Freiheitsgraden der beiden Epochen:

$$s_0^2 = \frac{\Omega_1 + \Omega_2}{f_1 + f_2} = \frac{\Omega}{f}, \quad \Omega_i = f_i \cdot \hat{\sigma}_{0_i}^2, \quad i = 1, 2 \,. \tag{3.8}$$

Liegt die Testgröße F im Annahmebereich der Nullhypothese H_0, werden die getesteten Konfigurationen der Datumspunkte mit der Sicherheitswahrscheinlichkeit 1-α als kongruent beurteilt. Andernfalls werden iterativ die als verschoben zu betrachtenden Datumspunkte identifiziert und in der Folge nicht weiter als Datumspunkte verwendet. Hierzu wird mithilfe der S-Transformation sukzessive ein Punkt aus der Gruppe der Datumspunkte entfernt und anschließend wieder hinzugenommen. Dies wird nacheinander für alle Datumspunkte durchgeführt und jeweils die Testgröße F neu berechnet. Die Konfiguration mit der kleinsten Testgröße bildet anschließend die neue Basiskonfiguration. Die Iteration läuft so lange, bis für die Basiskonfiguration die Testgröße innerhalb des Annahmebereichs der Nullhypothese liegt. Diese Punkte bilden für die weiteren Untersuchungen die Datumspunkte und definieren somit das geodätische Datum des Überwachungsnetzes.

Schritt 2: Überprüfung der Objektpunkte, Vorwärtsstrategie

Durch die Identifizierung der stabilen Stütz- und Sicherungspunkte in Schritt 1 liegt das geodätische Datum für die Untersuchung der Objektpunkte fest. Im Folgenden wird dargestellt, wie mit Hilfe einer Vorwärtsstrategie die Objektpunkte, welche das zu untersuchende Bauwerk repräsentieren, auf Stabilität hin überprüft werden können.

Es wird pro Objektpunkt ein Durchlauf gerechnet. In jedem Durchlauf werden die Vektoren der Datumspunkte $\hat{\mathbf{x}}_1^D$ und $\hat{\mathbf{x}}_2^D$ um einen Objektpunkt erweitert und gemeinsam getestet. Der Test wird entsprechend Formel (3.6) als Globaltest durchgeführt. Erweist sich der Objektpunkt mit der Gruppe der Datumspunkte als verträglich, wird er als nicht verschoben angenommen. Andernfalls gilt er als verschoben. Auf diese Weise werden alle Objektpunkte getestet.

Anhand der Ergebnisse der zweistufigen Kongruenzanalyse können absolute und relative Einzelpunktbewegungen zwischen den zwei Epochen signifikant nachgewiesen werden. Bei ausreichender räumlichen Diskretisierung können daraus Verformungen und Bewegungen des Bauwerks abgeleitet und anschließend interpretiert werden. Für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik zur Bauwerksüberwachung mit TLS kommt die zweistufige Kongruenzanalyse zur Datumsfestlegung für die Registrierung der Punktwolken und als Kontrolle der daraus abgeleiteten Deformationen zum Einsatz.

3.2 Bauwerksüberwachung mit TLS

Für die Überwachung von Bauwerken mit TLS werden hohe Anforderungen an die Mess- und Auswertemethodik gestellt. Um den oftmals angestrebten Millimeter für das Genauigkeitsniveau abgeleiteter Ergebnisse zu erreichen, sind insbesondere die Gesichtspunkte Instrumentenkalibrierung, Registrierung gemessener Punktwolken und die Objektmodellierung vertieft zu behandeln. Der aktuelle Stand bezüglich der Kalibrierung von Laserscannern wurde in Kapitel 2.4 diskutiert. Eine Auswahl aktueller Veröffentlichungen zum Einsatz von TLS für Deformationsuntersuchungen wird in den folgenden Kapiteln ausführlich vorgestellt. Bei allen aufgeführten Arbeiten spielt die Modellierung des Messobjektes eine entscheidende Rolle. Aufgrund der Eigenschaften von TLS (rasterförmige Abtastung des Objekts, hohe Punktdichte, schwer überprüfbare Einzelpunktgenauigkeit) werden Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsaussagen nicht aus den Messungen selbst, sondern aus abgeleiteten Größen gewonnen. Hierzu sind geeignete Modelle erforderlich.

Hinsichtlich des Überwachungsansatzes können die Arbeiten in zwei Gruppen eingeteilt werden: Aufdeckung relativer oder absoluter Deformationen mit TLS. Relative Deformationen lassen sich durch Differenzbildung zweier oder mehrerer Epochen beschreiben. Dazu wird ein entsprechendes Objektmodell durch Messungen realisiert und epochenweise überlagert. Beispiele dazu werden in Kapitel 3.2.1 behandelt. Wird zudem angestrebt, absolute Deformationen (z. B. Translationen und/oder Rotationen) des Objekts aufzudecken, ist es erforderlich, die Messungen innerhalb eines geodätischen Bezugssystems zu registrieren, d. h. die Punktwolken in einen stabilen Referenzrahmen zu transformieren. Ansätze hierzu werden in Kapitel 3.2.2 vorgestellt.

Bezüglich der weiteren in Kapitel 3.1 behandelten Aspekte von Überwachungsmessungen gilt für die vorgestellten Arbeiten zusammenfassend:

- Die Art der Objektdeformation wird in allen Arbeiten thematisiert.
- Die räumliche Diskretisierung des Objekts ist aufgrund des Messverfahrens bei allen Beispielen hoch. Die zeitliche Diskretisierung ist dem Verlauf der erwarteten Deformation angepasst.

- Das Auswertemodell wird nicht thematisiert, ist aber in den meisten Fällen das Kongruenzmodell. Nur bei einer kinematischen Anwendung in SCHÄFER U. A. 2004 wird auch ein kinematisches Modell verwendet. Ansonsten beschränken sich die Beispiele, entsprechend der Motivation dieser Arbeit, auf statische Anwendungen von TLS. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen und resultierender Deformation wird nicht modelliert.
- Die Stabilität des geodätischen Datums wird für die absoluten Betrachtungen vorausgesetzt, aber nicht überprüft.

Für die Bauwerksüberwachung mit TLS sind neben den genannten Aspekten der Deformationsanalyse besondere Gesichtspunkte von Bedeutung. Sie werden in vier Fragestellungen formuliert, nach denen die im Folgenden vorgestellten Arbeiten betrachtet werden. Im Einzelnen sind dies:

A Wird das Genauigkeitsniveau für abgeleitete Parameter durch die Modellierung erhöht?

Bei der Erfassung eines Objekts mit einem Laserscanner streuen die Punkte aufgrund zufälliger Messfehler um dessen Oberfläche, was durch das Messrauschen quantifiziert werden kann. Aufgrund des hohen räumlichen Auflösevermögens von TLS können durch eine geeignete Objektmodellierung Parameter für einen Epochenvergleich abgeleitet werden, deren Genauigkeitsniveau deutlich höher als das Messrauschen ist. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Schätzung der Mittelpunktskoordinaten einer gescannten Passkugel, wie sie in Abbildung 2.11 dargestellt ist.

B Wird die äußere Genauigkeit der abgeleiteten Parameter realistisch abgeschätzt?

Die aus dem Messrauschen berechnete Genauigkeit abgeleiteter Parameter wird als Präzision oder innere Genauigkeit bezeichnet. Die äußere Genauigkeit kann durch eine überbestimmte und unabhängige Aufnahme des Objekts von verschiedenen Scanner-Standpunkten und/oder durch zusätzliche Messverfahren abgeschätzt werden. Insbesondere bei der überbestimmten Messung von mehreren Scanner-Standpunkten ist die Registrierung der Scans von großer Bedeutung. Sie kann zur Beurteilung der äußeren Genauigkeit beitragen, wie im Verlauf dieser Arbeit noch thematisiert wird. Alternativ oder zusätzlich kann das Fehlermodell des Scanners verwendet werden. Dazu zählen dessen mögliche systematische Abweichungen gegenüber einem Soll-Verhalten. Im Rahmen einer zeitnahen Kalibrierung können entsprechende Parameter bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt werden. Dies ist allerdings nicht unproblematisch, da u. a. beim Laserscanning die Messergebnisse wegen der reflektorlosen Distanzmessung auch immer von der Oberfläche des Objekts und den aktuellen atmosphärischen Bedingungen abhängen (s. Kapitel 2.4.2).

C Werden abgeleitete Deformationen statistisch beurteilt?

Bei einem Epochenvergleich werden Parameter aus wenigstens zwei Epochen hinsichtlich möglicher Deformationen verglichen. Durch einen Hypothesentest kann das Ergebnis des Vergleichs mit einer zu wählenden Sicherheitswahrscheinlichkeit auf seine Signifikanz hin untersucht werden. Voraussetzung hierfür ist eine realistische Abschätzung der inneren und äußeren Genauigkeit der abgeleiteten Parameter.

D Ist die Auswertung für kommende Epochen automatisierbar?

Die Auswertung von TLS-Messungen ist aufwändig und erfordert vielfach eine manuelle Bearbeitung, beispielsweise um nicht interessierende Punkte aus der Punktwolke auszuschneiden, interessierende Objekte zu segmentieren und zu modellieren sowie gewünschte Parameter abzuleiten. Für epochenweise Überwachungsmessungen ist es von Vorteil, wenn diese Schritte so weit wie möglich automatisierbar sind und somit manuelle Eingriffe reduziert werden.

Eine zusammenfassende Analyse der zusammengestellten Literaturstellen folgt am Ende von Kapitel 3.2.2. Daraus ergibt sich die Begründung für die in dieser Arbeit entwickelte Methode, die in Kapitel 4 hergeleitet wird.

3.2.1 Relative Ansätze

Bei den im Folgenden vorgestellten drei Beispielen zur Bauwerksüberwachung mit TLS werden relative Deformationen betrachtet. Obwohl diese Arbeit die Zielsetzung hat, absolute Bauwerksdeformationen aufzudecken, sind die vorgestellten Untersuchungen aufgrund ihrer grundlegenden Ansätze, Deformationen aus Punktwolken abzuleiten, von Bedeutung.

GRIMM-PITZINGER & RUDIG 2005 führen Untersuchungen zum Einsatz von TLS für die Überwachung einer Talsperre am Wörglerbach in Österreich durch. Es handelt sich bei dem Absperrbauwerk um eine 25 Meter hohe Bogenstaumauer mit einer Kronenlänge von 40 Metern. Die Luftseite der Mauer wurde in zwei Epochen mit Riegl-Scannern nach Fertigstellung des Bauwerks und zu einem künstlichen Vollstau (Jahr 2003: Z306i, Jahr 2004: Z420i) von einem Pfeiler aus beobachtet.

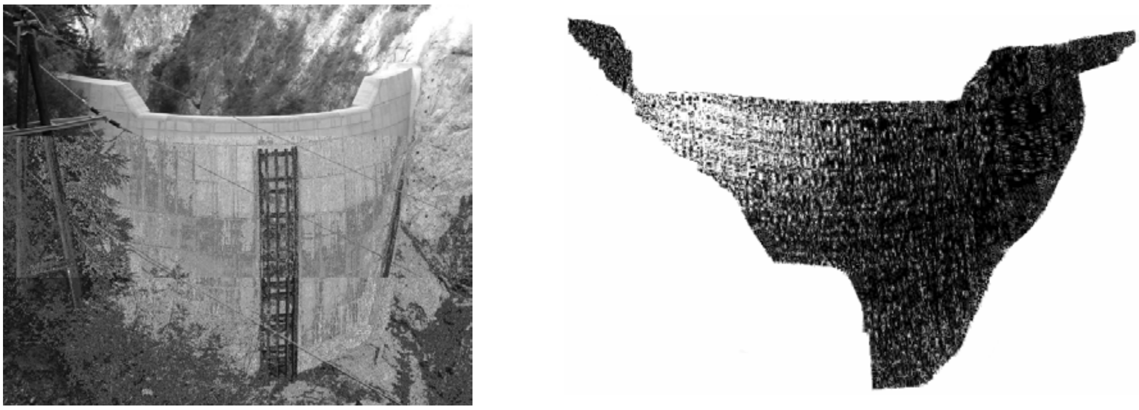


Abbildung 3.6: Wasserseite der Wörglerbach-Talsperre und Differenzbild nach der Modellierung (Grimm-Pitzinger & Rudig 2005)

Um das Messrauschen zu reduzieren, werden die Punktwolken durch B-Spline-Flächen approximiert. Dazu werden die Kontrollpunkte so berechnet, dass die Abstände der gemessenen Punkte von der modellierten Fläche in ihrer Quadratsumme minimiert werden. Für den Epochenvergleich werden die Flächen bestmöglich überlagert. Daher können absolute Deformationen nicht bestimmt werden. Differenzen zwischen den modellierten Flächen von 5 mm bis max. 1 cm werden als Verformungen der Staumauer interpretiert und durch tachymetrische Messungen bestätigt. Genauigkeits- sowie Signifikanzaussagen zu den auftretenden Differenzen erfolgen nicht. Abbildung 3.6 zeigt ein Bild der Staumauer und ein Differenzbild, welches aus der Überlagerung der modellierten Oberflächen zu beiden Epochen entsteht. Die helleren Bereiche kennzeichnen die genannten Verformungen.

Van Gosliga u. a. 2006 entwickeln eine Methode, um mit TLS zylinderförmige Tunnel auf Deformationen zu untersuchen. Zur Erprobung wurden Messungen mit einem Zoller+Fröhlich Scanner HDS 4500 an einem Straßentunnel (2. Heinenoordtunnel) in den Niederlanden durchgeführt. Der Tunnel wurde auf einer Länge von 100 m in zwei Epochen gescannt. Die Verknüpfung der Standpunkte erfolgte mit der Software Cyclone durch ein ICP-basiertes Verfahren. Zwischen den Epochen wurden künstliche Objekte mit einer Tiefe von 2-3 cm als Deformationen an der Tunnelwand angebracht. Die verknüpften Punktwolken werden abschnittsweise mit 4,5 m breiten, nahezu waagerechten Zylindern modelliert. Zwei Vergleiche werden durchgeführt: Die Berechnung von Abweichungen der gemessenen Punkte vom geschätzten Zylinder und von Abweichungen zwischen zwei Epochen. Der erste Ansatz zeigt, dass der Tunnel diverse radiale Verformungen bis zu 3 cm vom gewünschten Modell eines Zylinders aufweist, was für einen Straßentunnel unproblematisch ist. Die Residuen bei der Zylinderschätzung weisen zudem ein periodisches Signal auf, was nach Aussage der Autoren durch eine verzerrte Zylinderschätzung oder Fehler bei der Verknüpfung der einzelnen Scans erklärt werden könnte.

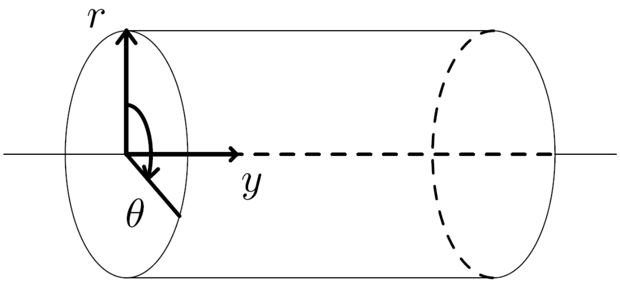


Abbildung 3.7: Zylinderkoordinaten (Van Gosliga u. a. 2006)

Für den zweiten Ansatz werden die kartesischen Punktkoordinaten in Zylinderkoordinaten (Radius r, Richtungswinkel θ, Abschnitt der Zylinderachse y, s. Abbildung 3.7) umgerechnet. Für den Epochenvergleich wird das geodätische Datum der ersten Epoche verwendet. Pro Epoche werden die gemessenen Punkte abschnittsweise gefiltert. Die Filterung erfolgt durch die Berechnung eines mittleren Radius für $[y_0\text{-}\Delta y,\ y_0\text{+}\Delta y] \times [\theta_0\text{-}\Delta\theta,\ \theta_0\text{+}\Delta\theta] = 15\ \text{cm} \times 15\ \text{cm}$ große Oberflächenstücke auf der Tunnelwand. Um signifikante Deformationen aufzudecken, wird pro Oberflächenstück die Differenz der mittleren Radien aus zwei Epochen statistisch getestet. Die Ergebnisse sind gemischt. Die meisten künstlichen Objekte werden als Deformationen erkannt, wenn ihre flächige Ausdehnung größer als das gewählte Raster ist. Aber auch nicht deformierte Bereiche werden als deformiert erkannt. Als mögliche Ursachen für falsche Testergebnisse werden eine nicht optimale Verknüpfung der einzelnen Punktwolken und ein fehlendes stochastisches Modell für die Messungen genannt. Hierzu zählen z. B. eine Abhängigkeit der Messung vom Auftreffwinkel und ein streckenabhängiger Fehler des Scanners.

Durch die Modellierung mit einem Zylinder und mittleren Radien zu Rasterelementen der Oberfläche gelingt eine Reduzierung des Rauschens, was für Folgeepochen weitgehend automatisierbar ist. Für den Epochenvergleich werden statistische Tests verwendet. Eine interne Kontrolle durch überbestimmte Messelemente findet nicht statt. Die Verknüpfung der Scans und ein fehlendes stochastisches Modell der Punktwolke erweisen sich als problematisch.

OHLMANN-BARTUSEL 2009 entwickelt die Ansätze von VAN GOSLIGA U. A. 2006 und SCHÄFER U. A. 2004 (s.u.) weiter, um Deformationen von zylinderförmigen Tunneln während der Bauphase zeitnah beurteilen zu können. Aufgrund der Aktualität dieser Veröffentlichung wird in dieser Arbeit nicht vertieft darauf eingegangen.

IOANNIDIS U. A. 2006 haben Deformationsmessungen mit Leica Laserscannern (HDS 2500 und HDS 3000) an dem 97 m hohen Kühlturm eines Kraftwerks in Megalopolis, Griechenland, durchgeführt. Die Messungen wurden vom Betreiber des Kraftwerks beauftragt, der eine vollständige Oberflächenmodellierung durch NURBS sowie die geometrischen Abweichungen des tatsächlichen Bauwerks vom theoretischen Bauwerksmodell wünschte. Die Registrierung der Scans von 11 Standpunkten aus erfolgte mit der Software Cyclone. Hierzu wurden tachymetrisch bestimmte Zielmarken sowie ICP-basierte Verfahren verwendet. Die Modellierung der registrierten Punktwolke mit NURBS ist aufwändig und erfolgt in mehreren Schritten. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

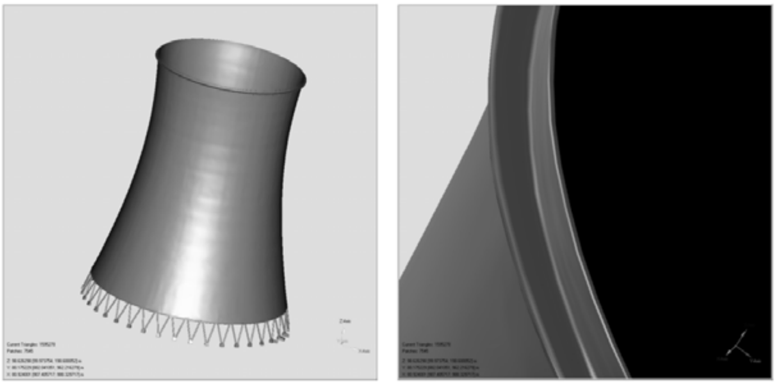


Abbildung 3.8: NURBS-Modell, Gesamtansicht und Blick von oben in den Kühlturm (IOANNIDIS U. A. 2006)

Die Modellierung wird durch tachymetrisch bestimmte Punkte (Anzahl: 1250) auf der Oberfläche des Kühlturms kontrolliert. Die Abstände der meisten Punkte von der modellierten Oberfläche betragen weniger als 3 cm, die mittlere Abweichung beträgt 1,5 cm.

Um die Abweichungen vom theoretischen Bauwerksmodell (Hyperboloid) zu bestimmen, wird es dem NURBS-Modell durch eine quadratische Minimierung der Abstände bestmöglich angepasst. Die resultierenden Differenzen zeigt Abbildung 3.9. Es treten lokale Verformungen bis zu 20 cm auf. Der durchschnittliche Abstand beträgt 2,4 cm. Die Deformationen werden vom Betreiber als unbedenklich eingestuft.

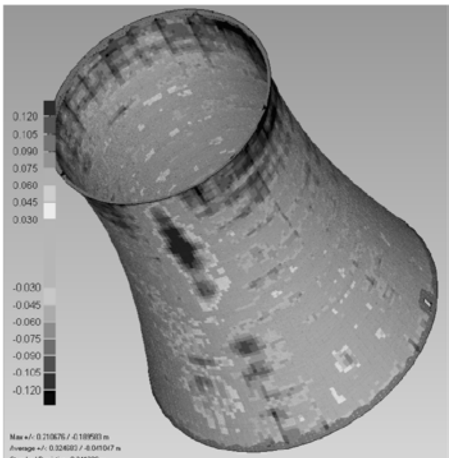


Abbildung 3.9: Abweichungen zwischen NURBS-Modell und theoretischem Bauwerksmodell (IOANNIDIS U. A. 2006)

Die beschriebenen Deformationen werden nicht auf ihre statistische Signifikanz überprüft. Die Modellierung ist sehr aufwändig und schwierig zu automatisieren. Mit dem Ansatz werden relative Deformationen beschrieben. Für absolute Betrachtungen müssten bei einer wiederholten Messung die Reproduzierbarkeit und Stabilität des geodätischen Datums gewährleistet sein.

3.2.2 Absolute Ansätze

Die nachfolgenden vier Beispiele behandeln Ansätze zur absoluten Bauwerksüberwachung mit TLS. Die ersten beiden verwenden dazu stabile Bereiche des Bauwerks als Referenz, die zwei anderen nutzen ein geodätisches Punktfeld zur Registrierung. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 werden die Arbeiten jeweils kurz nach den Fragestellungen A-D analysiert. Anschließend werden die vorgestellten Ansätze zusammenfassend diskutiert und Anforderungen an eine allgemeine Methodik zur Bauwerksüberwachung mit TLS formuliert.

SCHÄFER U. A. 2004 führen Deformationsmessungen mit einem Leica HDS 2500 an den Toren der Donauschleuse bei Gabčikovo, Slowakei durch. Die vier Tore haben Abmessungen von 18 m × 22 m × 2 m bei einer Masse von 435 Tonnen. Aus Erfahrungswerten ist bekannt, dass sich die Tore während eines Schleusungsvorgangs bis zu 40 mm in der Horizontalen und einige Millimeter in der vertikalen elastisch deformieren. Abbildung 3.10 zeigt eine Punktwolke eines Schleusentores, aufgenommen von einer Plattform aus, die sich außerhalb der Schleusenkammer seitlich vor dem Tor befindet. Gegenüber dieser Plattform auf der anderen Seite der Fahrrinne existiert eine zweite Plattform, von der aus simultan tachymetrische Messungen durchgeführt wurden, um die Laserscannermessungen unabhängig kontrollieren zu können. Die Messungen erfolgten statisch zu fünf verschiedenen Wasserständen und kinematisch während eines kompletten Schleusungsvorgangs. Für die Registrierung der statischen Scans wird ein Objektkoordinatensystem, definiert durch drei sich rechtwinklig schneidende Ebenen, verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Teil des Bauwerks von den Schleusungsvorgängen nur unwesentlich beeinflusst wird. Bei den kinematischen Messungen wurde wegen der maximal möglichen Scanrate nur ein schmaler Ausschnitt der Tore gescannt, so dass hier die Stabilität des Scanners während der Messungen vorausgesetzt werden musste.

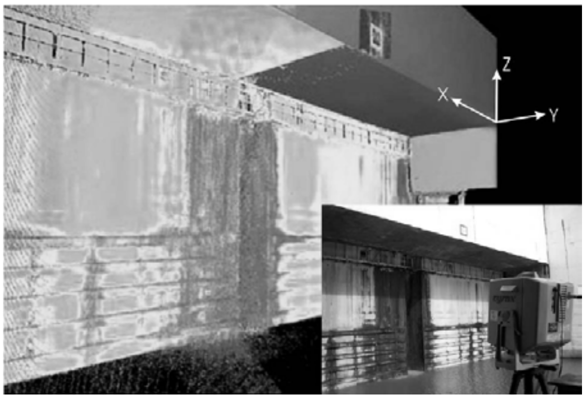


Abbildung 3.10: Punktwolke eines Schleusentores, Definition des Koordinatensystems und Standpunkt des Scanners bei der Aufnahme (SCHÄFER U. A. 2004)

Die Auswertung der Scans erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die auf der Oberfläche der Tore gemessenen Punkte (Auflösung: 100 mm × 100 mm statisch, bzw. 80 mm × 80 mm kinematisch) durch eine Triangulation vermascht. Anschließend werden sie zu einem regelmäßigen und reproduzierbaren 50 mm × 50 mm Raster interpoliert. Die y-Koordinaten der regelmäßigen Rasterpunkte dienen als Eingangswerte für die Epochenvergleiche. Abbildung 3.11 stellt den Auswertegang dar.

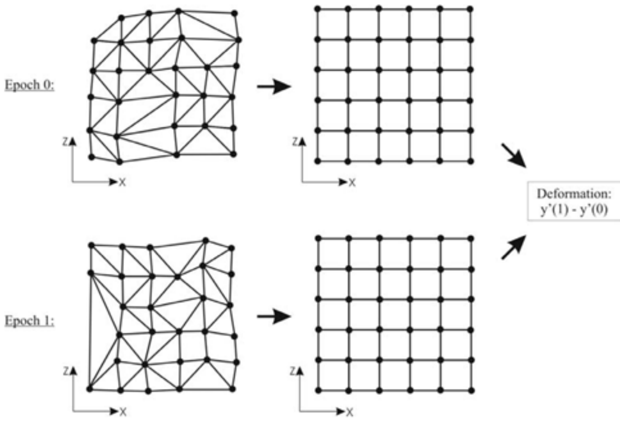


Abbildung 3.11: Auswertung der Punktwolken, Dreiecksvermaschung und Interpolation zu einem regelmäßigen Raster (SCHÄFER U. A. 2004)

Die Ergebnisse der Scannermessungen werden durch die tachymetrischen Messungen bestätigt. Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen liegen im Bereich von ± 3 mm. Die aufgedeckten Deformationen von 1,5-3,7 cm werden als signifikant bewertet, indem zuvor durchgeführte Genauigkeitsuntersuchungen zum Streckenmessverhalten des Scanners eingeführt werden. Durch das dichte, interpolierte Raster ist der Informationsgehalt der Scanner-Messungen höher als bei herkömmlichen Messverfahren. Allerdings sind die Scannermessungen nicht in sich kontrolliert und es findet keine die Genauigkeit steigernde Modellierung statt. Fehlerhafte Messungen werden durch die Interpolation zu einem regelmäßigen Raster kaum gefiltert.

LINDENBERGH & PFEIFER 2005 untersuchen das Deformationsverhalten eines Schleusentores an einem Kanal in IJmuiden, Niederlande mit einem Leica HDS2500. Es sollen Bewegungen aufgedeckt werden, die kleiner als das erwartete Messrauschen des Scanner (6 mm @ 50 m) sind. Hierzu wird das Schleusentor zweimal zu unterschiedlichen Wasserständen gescannt. Der Scanner wird zwischen den Epochen als stabil betrachtet. Alternativ erfolgt eine Registrierung der Scans mit ICP über stabile Bereiche in den Punktwolken. Zielsystem ist das erste Scanner-System. In beiden Fällen treten systematische Effekte in den Punktwolken auf. Diese äußern sich in Pseudo-Bewegungen von Objekten in den Punktwolken, die als stabil vorausgesetzt werden können. Sie betragen in der Umgebung des Schleusentores ca. 2 mm und in weiter entfernten Bereichen bis zu 6 mm. Die Effekte können von den Autoren nicht endgültig geklärt werden. Eine mögliche Erklärung wäre eine unkontrollierte Bewegung des Scanners während der Messung, verursacht durch Wind. Die angewendete Methodik wird trotz der systematischen Abweichungen verfolgt. Hierzu werden in den Punktwolken Bereiche automatisch segmentiert, die eine Ebene bilden. Über eine Ebenenausgleichung werden die zugehörigen Punkte modelliert. Abbildung 3.12 zeigt eine Punktwolke der Schleusentore. Die segmentierten Raumebenen sind durch unterschiedliche Grautöne gekennzeichnet.

Abbildung 3.12: Segmentierte Ebenen des gescannten Schleusentores, gekennzeichnet durch verschiedene Grautöne (LINDENBERGH & PFEIFER 2005)

Die Ebenen werden mit den drei Parametern a, b, c für die drei Punktkoordinaten x, y, z definiert: $ax+by+c = z$. Als Eingangsgröße für einen Epochenvergleich werden die geschätzten Ebenenparameter der zwei Epochen verwendet und mit einem statistischen Test auf Gleichheit überprüft. Die in Abbildung 3.12 mit 2 und 4 bezeichneten Ebenen weisen signifikante Änderungen ihrer Ebenenparameter auf, die Ebenen 1 und 3 zeigen keine signifikanten Veränderungen. Zudem werden die nummerierten Ebenen separat untersucht. Hierzu werden sie in rasterförmige Oberflächenelemente von 5 cm × 5 cm Kantenlänge unterteilt. Pro Element wird eine Ebene geschätzt. Die Ebenen werden einzeln auf Bewegung zwischen den Epochen getestet. Auf diese Weise können Verformungen, also lokale Abweichungen von einer Raumebene, für die segmentierten Bereiche bestimmt werden.

Aufgrund der nicht weiter untersuchten systematischen Effekte sind die Ergebnisse nur bedingt interpretierbar. Die Methode selbst bietet zwei hervorzuhebende Aspekte. Durch die Modellierung segmentierter Bereiche der Punktwolke durch ausgleichende Ebenen werden die durch die Messung verrauschten Einzelpunkte gefiltert und genauere Parameter abgeleitet. Zudem wird für den Epochenvergleich ein statistisch begründeter Hypothesentest verwendet. Beide Aspekte finden sich auch bei der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik wieder.

SCHNEIDER 2006 setzt einen Riegl Z420i an einem Fernsehturm mit kreisförmigem Grundriss in Dresden ein. Die Gesamthöhe des Bauwerks beträgt 252 m, bis zu einer Höhe von 167 m Höhe ist es als Stahlbetonkonstruktion erstellt. Ziel der Untersuchungen ist es, die räumliche Lage der Bauwerksachse und eine Verformung des Turms infolge von Sonneneinstrahlung nachzuweisen. Dazu wird der Turm von mehreren Standpunkten aus in zwei Epochen mit einem zeitlichen Abstand von vier Stunden gescannt. Die Auswertung stützt sich auf die Messungen eines Standpunktes. Dessen Registrierung erfolgt über identische Punkte, die mit Zielmarken signalisiert werden und zuvor tachymetrisch bestimmt wurden. Somit ist ein absoluter Bezug gewährleistet. Um eine Biegelinie abzuleiten, wird die Punktwolke des gescannten Turms in 15 verschiedenen Höhen mit horizontalen 5 cm starken Schichten geschnitten, wie in Abbildung 3.13 angedeutet wird. Anschließend werden die Punkte jeder Schnittmenge auf eine Ebene projiziert. Über eine Kreisausgleichung werden die Mittelpunkte in den verschiedenen Höhen geschätzt. Aus den Mittelpunkten wird die

Biegelinie des Turms abgeleitet. Die berechnete Biegelinie und ihre Veränderung aufgrund der Sonneneinstrahlung sind verglichen mit Erfahrungswerten plausibel.

Abbildung 3.13: Schnitt des Fernsehturms mit horizontalen Schichten (Schneider 2006)

Offen bleibt, ob die Verwendung mehrerer Standpunkte zu den gleichen Ergebnissen kommt. Eine interne Kontrolle der Ergebnisse ist nicht gegeben. Um das Genauigkeitspotential des verwendeten Instruments abzuschätzen, wurden vorab Untersuchungen zur Distanzmessgenauigkeit sowie testweise überbestimmte Registrierungen mittels Zielmarken durchgeführt.

Bei Alba u. a. 2006 wird die Staumauer des Lago di Cancano, Italien mit TLS auf Deformationen untersucht. Das Bauwerk staut den Fluss Adda und hat eine Höhe von 136 m bei einer Kronenlänge von 380 m. An der Staumauer existiert ein geodätisches Überwachungsnetz bestehend aus 11 Bodenpunkten (s. Abbildung 3.14). Es wird für die Registrierung der Punktwolken der drei bisherigen Epochen verwendet, die jeweils zu extremen Wasserständen durchgeführt wurden. Für die Messungen wurden zwei Scanner eingesetzt: Ein Leica HDS 3000 für Zielweiten von 50-120 m auf 5 Standpunkten und ein Riegl Z420i für Zielweiten von 200-300 m auf 2 Stationen. Um Deformationen nachzuweisen, werden die Messungen des Riegl-Scanners von Standpunkt 8000 aus verwendet, da sie aufgrund des günstigen Auftreffwinkels das geringste Rauschniveau aufweisen.

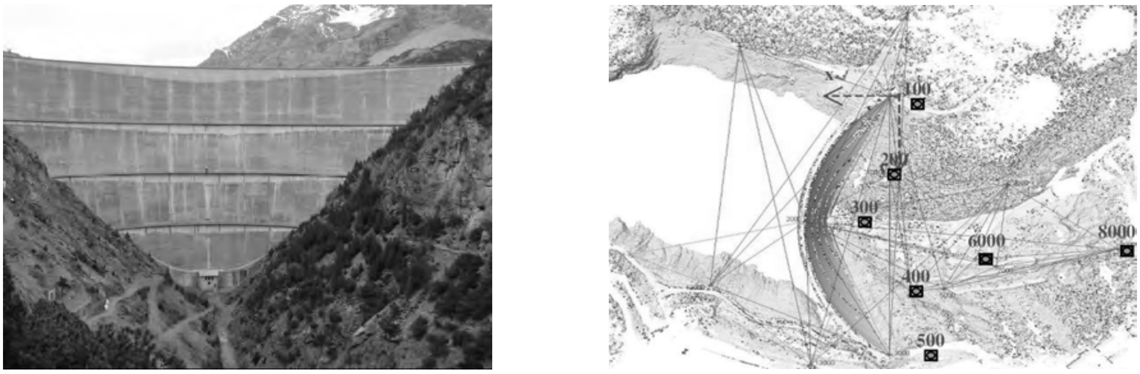


Abbildung 3.14: Luftseitige Ansicht der Staumauer und geodätisches Überwachungsnetz des Lago di Cancano (Alba u. a. 2006)

Die Registrierung der Scans erfolgt über 8 bis 9 identische Punkte pro Punktwolke. Hierzu sind flache, runde Aluminium-Scheiben mit einem Durchmesser von 12 cm und einer zentrisch aufgebrachten retro-reflektierenden, kreisförmigen Scheibe mit einem Durchmesser von 10 cm auf der luftseitigen Oberfläche der Staumauer und an stabilen Felsen angebracht. Ihre Koordinaten sind durch tachymetrische Messungen im örtlichen Überwachungsnetz bestimmt. Die empirischen Standardabweichungen der geschätzten Transformationsparameter betragen für die drei Epochen ca. 3-4 mm für die Translationen und 2-3 mgon für die Rotationen. Die Werte entsprechen Abweichungen von 3-5 mm in einer Entfernung von 100 m. Zur Kontrolle werden die nicht für die Transformation verwendeten Zielmarken in das Referenzsystem transformiert. Die Standardabweichungen ihrer Residuen betragen durchschnittlich 8-9 mm in allen drei Koordinatenrichtungen.

Die Modellierung der registrierten Punktwolken von Standpunkt 8000 für den Vergleich zweier Epochen erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Bearbeitungsschritten:

- Berechnung eines interpolierten Gitters mit 2cm Rasterweite, ausgerichtet an einer mittleren Tangente des Bauwerks,
- Berechnung einer triangulierten Oberfläche,

- Berechnung einer interpolierten polynomialen Oberfläche.

Für den Epochenvergleich werden die Ergebnisse der einzelnen Bearbeitungsschritte miteinander verglichen. Abbildung 3.15 zeigt exemplarisch die Abstände der interpolierten Gitterpunkte aus der Epoche Mai 2006 zu der triangulierten Oberfläche aus der Epoche Oktober 2005. Die grauen Bereiche werden beim Vergleich nicht berücksichtigt. Die violetten Bereiche am Rand weisen keine Abstände auf. Blau eingefärbte Abschnitte kennzeichnen Abstände von 0,5-1,8 cm und grüne Bereiche Abstände von 1,9-3,7 cm.

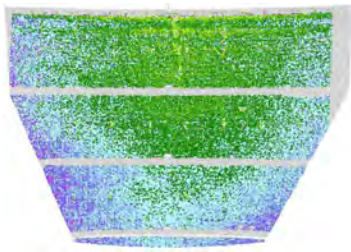


Abbildung 3.15: Abstände zwischen Gitterpunkten (05/2006) und triangulierter Oberfläche (10/2005) (ALBA U. A. 2006)

Die erzielten Ergebnisse werden durch tachymetrische Messungen bestätigt und entsprechen dem erwarteten Bauwerksverhalten. Die Untersuchungen stellen somit einen erfolgreichen Ansatz dar, absolute Bauwerksdeformationen mit TLS zu beschreiben. Allerdings sind die Ergebnisse in sich nicht kontrolliert und statistisch nicht überprüfbar, da nur ein Standpunkt verwendet wird und keine statistischen Kenngrößen abgeleitet werden. Die Untersuchungen finden im Rahmen eines längerfristigen Forschungsprojektes statt. Weitere Ergebnisse sind zu erwarten.

Diskussion der vorgestellten Ansätze

Die Bauwerksüberwachung mit TLS ist aktueller Bestandteil geodätischer Forschung und wird an verschiedenen Stellen untersucht. In diesem Kapitel wurden relevante Veröffentlichungen zu diesem Thema zusammengestellt und jeweils kurz nach vier Gesichtspunkten diskutiert. Dabei handelt es sich um die Fragestellungen:

A Wird die innere Genauigkeit durch die Modellierung erhöht?

B Wird die äußere Genauigkeit berücksichtigt?

C Werden abgeleitete Deformationen statistisch beurteilt?

D Ist die angewendete Methodik für zukünftige Epochen automatisierbar?

Tabelle 3.1 fasst die Ergebnisse kurz zusammen.

Tabelle 3.1: Zusammenfassende Bewertung der besprochenen Literaturstellen

	A	**B**	**C**	**D**
GRIMM-PITZINGER & RUDIG 2005	NURBS-Modellierung	Kontrolle durch Tachymeter	Nein	Fraglich
VAN GOSLIGA U. A. 2006	Zylinderanpassung, mittlerer Radius	Kontrolle durch künstliche Deformationen	Ja, ohne äußere Genauigkeit	Geeignet
IOANNIDIS U. A. 2006	NURBS-Modellierung	Kontrolle durch Tachymeter	Nein	Fraglich
SCHÄFER U. A. 2004	Interpoliertes Raster, kaum Filterwirkung	Kontrolle durch Tachymeter, Genauigkeitsabschätzung	Ja, ohne nähere Angaben	Geeignet
LINDENBERGH & PFEIFER 2005	Ebenenausgleichung	Nicht erklärte systematische Abweichungen	Ja, ohne äußere Genauigkeit	Geeignet
SCHNEIDER 2006	Kreisausgleichung, Biegelinie	Genauigkeitsuntersuchungen zu Distanzmessung und Registrierung	Nein	Geeignet
ALBA U. A. 2006	Interpolierende Modellierung	Kontrolle durch Tachymeter	Nein	Geeignet

Bei der Analyse der veröffentlichten Untersuchungsergebnisse anhand der vier Fragestellungen fällt auf, dass bei keinem Ansatz alle genannten Anforderungen erfüllt sind.

Die innere Genauigkeit wird bei fast allen Ansätzen durch eine Modellierung erhöht. Lediglich bei SCHÄFER U. A. 2004 sowie bei ALBA U. A. 2006 ist die Filterwirkung des Modells aufgrund interpolierender Ansätze als gering einzustufen. Bei den anderen Beispielen gelingt eine Filterung durch den Einsatz von approximierenden Flächenpolynomen (NURBS) bzw. ausgleichender Flächen oder Kreise. Bei den beiden Letztgenannten werden durch die Modellierung Parameter (Kreismittelpunkte, Normalenvektoren) abgeleitet, die als Eingangsgrößen für eine Deformationsanalyse genutzt werden können.

Eine Bewertung der äußeren Genauigkeit erfolgt in einigen Beispielen anhand von Kontrollmessungen durch elektrooptische Tachymeter. SCHNEIDER 2006 sowie SCHÄFER U. A. 2004 führen vorab Geräteuntersuchungen durch, um die innere und äußere Genauigkeit der Scannermessungen beurteilen zu können. VAN GOSLIGA U. A. 2006 kontrollieren die Ergebnisse durch den Einsatz künstlicher Deformationen und der Annahme, dass ansonsten keine Deformationen zwischen den Epochen aufgetreten sind. Eine Beurteilung der äußeren Genauigkeit der Messungen durch eine überbestimmte Konfiguration erfolgt in keinem Beispiel.

Eine statistische Beurteilung abgeleiteter Deformationen wird von LINDENBERGH & PFEIFER 2005 sowie von VAN GOSLIGA U. A. 2006 durchgeführt. SCHÄFER U. A. 2004 bewerten auftretende Differenzen aufgrund zuvor durchgeführter Genauigkeitsuntersuchungen des verwendeten Scanners als signifikant. Ein entsprechender Test wird jedoch nicht angegeben. Die anderen Beispiele beschränken sich auf die Angabe von Differenzen zwischen zwei Epochen, bzw. zwischen einem Soll- und einem Istzustand, ohne diese statistisch auf ihre Signifikanz zu untersuchen.

Die Frage, ob die vorgestellten Ansätze für zukünftige Epochen automatisierbar wären, kann nur unter Annahmen beurteilt werden, da sie von keinem Autor behandelt wird. Es gilt jedoch, dass eine Automatisierung schwieriger wird, je aufwändiger die Modellierung ist. Somit ist es für die Beispiele, bei denen NURBS-Modelle verwendet werden zumindest fraglich, ob deren Auswertung zukünftig vereinfacht erfolgen kann. Die Ansätze, bei denen einfache geometrische Modelle zum Einsatz kommen, sind für eine automatisierte Auswertung eher geeignet. So können beispielsweise für den Ansatz nach SCHNEIDER 2006 aufgrund der bekannten Geometrie des Objekts die Mittelpunkte der Schnittkreise weitgehend ohne manuelle Eingriffe berechnet werden.

Neben den vier entwickelten Fragestellungen wurde für die Ansätze vorab zusammenfassend analysiert, inwiefern sie klassische Elemente geodätischer Deformationsmessungen berücksichtigen. Es zeigt sich, dass in allen Fällen die Messungen entsprechend der zu erwarteten Deformationen geplant werden. Die räumliche Diskretisierung ist durch die Verwendung von TLS flächendeckend hoch. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt zu unterschiedlichen Belastungszuständen des Bauwerks (extreme Wasserstände bei Talsperren und Schleusen, Sonneneinstrahlung bei Fernsehturm) sowie vor und nach der Anbringung künstlicher Deformationen (Tunnel). Die Auswertemodelle geodätischer Überwachungsmessungen, wie sie in Kapitel 3.1.3 behandelt wurden, sind in keinem der Beispiele explizit ein Thema, wie bereits zu Anfang des Kapitels erwähnt wurde. Insbesondere für die Ansätze, die absolute Deformationen behandeln, ist ein stabiles geodätisches Datum über alle Epochen aber von großer Bedeutung. LINDENBERGH & PFEIFER 2005 stellen beispielsweise nicht geklärte systematische Abweichungen an stabilen Bereichen in der Umgebung des Überwachungsobjektes zwischen zwei Epochen fest. Streng genommen sind die Epochen dadurch nicht mehr absolut vergleichbar. Bei ALBA U. A. 2006 wird das geodätische Referenzsystem in der ersten Epoche bestimmt und anschließend als stabil vorausgesetzt.

Anforderungen an eine allgemeine Methodik zur Bauwerksüberwachung mit TLS

Aus den vorgestellten Beispielen zur Bauwerksüberwachung mit TLS und der anschließenden Diskussion ergeben sich Anforderungen an eine allgemeine Methode zur (absoluten) Bauwerksüberwachung mit TLS.

Es sollten die anerkannten Vorgehensweisen zu geodätischen Deformationsmessungen berücksichtigt werden. Hierzu zählen die in Kapitel 3.1 näher erläuterten Punkte: Deformationsart, die Diskretisierung des Objekts sowie die bewusste Auswahl und Anwendung eines Auswertemodells. Dabei setzen insbesondere absolute Fragestellungen ein stabiles geodätisches Datum voraus.

Speziell für das Terrestrische Laserscanning ergeben sich zudem wichtige Anforderungen, die zu Beginn von Kapitel 3.2 und kurz in der vorangehenden Diskussion in vier Fragestellungen zusammengefasst wurden.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, eine allgemeine Methode zur Bauwerksüberwachung zu entwickeln, welche die anerkannten Regeln geodätischer Deformationsmessungen berücksichtigt und zugleich die speziellen Aspekte des terrestrischen Laserscannings beachtet und dessen Potential ausnutzt.

4 Methodischer Ansatz

In Kapitel 3.2 wurden Anforderungen an eine absolute Bauwerksüberwachung mit TLS in vier Fragestellungen (A bis D) zusammengefasst. Im Wesentlichen beinhalten sie die folgenden Punkte: Modellierung/innere Genauigkeit, äußere Genauigkeit, statistische Beurteilung der Ergebnisse und Automatisierbarkeit der Auswertung. Zudem wurde darauf hingewiesen, dass etablierte Auswertemethoden und Verfahren geodätischer Überwachungsmessungen beachtet werden sollten. Aktuelle Publikationen zum Thema wurden nach diesen Gesichtspunkten analysiert. Es zeigte sich, dass bei keinem Ansatz alle Anforderungen umgesetzt wurden. In den folgenden Kapiteln wird eine allgemeine Methode zur absoluten Bauwerksüberwachung mit TLS vorgestellt, die alle genannten Anforderungen erfüllt: Zur Beurteilung der Genauigkeit und zur Reduzierung systematischer Abweichungen des eingesetzten Laserscanners werden in Kapitel 4.1 Geräteuntersuchungen durchgeführt. Die äußere Genauigkeit der Messung und Auswertung sowie die Anwendung geodätischer Deformationsanalysen wird durch den Gesichtspunkt Registrierung in Kapitel 4.2 behandelt. In Kapitel 4.3 wird der allgemeine Auswerteansatz für die Bauwerksüberwachung mit TLS entwickelt. Hierbei werden die folgenden Punkte diskutiert: Steigerung der inneren Genauigkeit durch Modellierung und Filterung, Beurteilung der inneren und äußeren Genauigkeit, statistische Beurteilung der Ergebnisse sowie Möglichkeiten der Automatisierung.

Abbildung 4.1 zeigt das Zusammenwirken der einzelnen Arbeitschritte als Flussdiagramm. Es enthält drei vertikale Handlungsstränge, die zu jeder Epoche anfallen und die jeweils mit einem Prozess (rechteckige Form) beginnen. Am Anfang stehen die Messungen, die im Folgenden nicht weiter beschrieben werden. Alle weiteren Prozesse des Diagramms sind Auswerteschritte und werden in den rot dargestellten Kapiteln dieser Arbeit behandelt bzw. entwickelt.

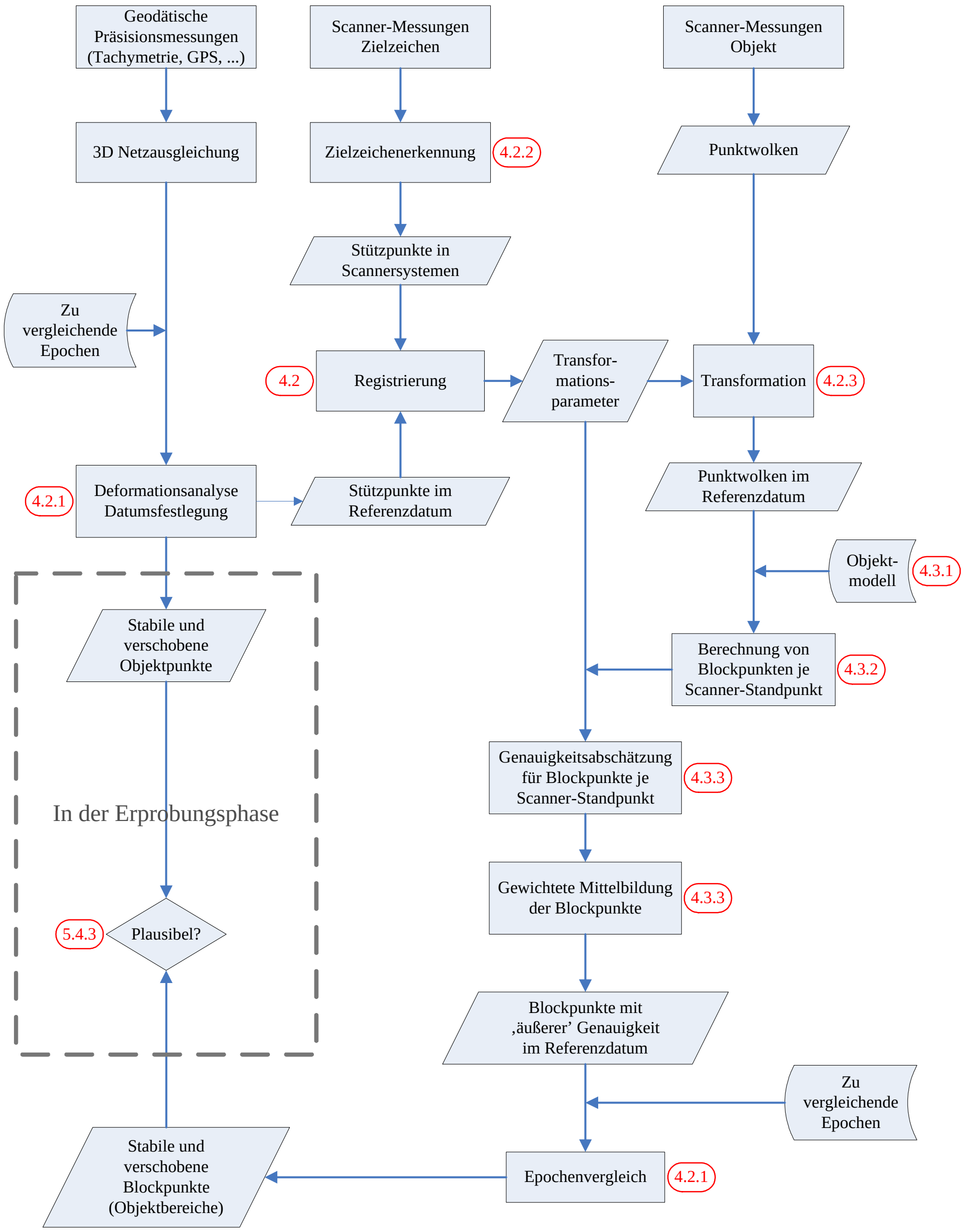


Abbildung 4.1: Methodischer Ansatz zur Bauwerksüberwachung mit TLS

Auf einen Prozess folgt ein weiterer Prozess oder als dessen Ergebnis ein Datensatz (Parallelogramm). Ergebnisse früherer Epochen und das verwendete Objektmodell gehen als gespeicherte Daten (Rechteck mit runden Flanken) in die Methodik ein. Der grau eingerahmte Teil des Diagramms stellt Punkte dar, die zunächst in der Erprobungsphase der Methode an einem neuen Objekt benötigt werden. Hat sich die Methode etabliert, ist die Messung zu fest vermarkten Objektpunkten nicht mehr notwendig. In dem Fall erübrigt sich die als Raute dargestellte Entscheidung, ob die Ergebnisse der Laserscanning-Auswertung plausibel sind.

Beginnend mit dem Prozess der Registrierung verzweigen sich die angesprochenen drei Handlungsstränge. Hier werden die Ergebnisse der Deformationsanalyse des Überwachungsnetzes sowie der gescannten und ausgewerteten Zielzeichen genutzt, um Transformationsparameter zu berechnen. Diese werden für die Transformation der gescannten Punktwolken in das geodätische Datum des zu überwachenden Objekts verwendet. Mithilfe der registrierten Punktwolken und des Objektmodells werden für jeden Scanner-Standpunkt diskrete Punkte des Objekts, so genannte Blockpunkte, abgeleitet (s. Kapitel 4.3). Deren äußere Genauigkeit wird in zwei Auswerteschritten abgeschätzt. Zunächst gehen die stochastischen Informationen der Transformationsparameter in ein Modell zur Varianzfortpflanzung ein. Diese Ergebnisse werden anschließend über alle Scanner-Standpunkte gewichtet gemittelt. Auf diese Weise werden Blockpunkte mit einer Abschätzung ihrer äußeren Genauigkeit im geodätischen Referenzdatum berechnet. Sie werden im nächsten Schritt zusammen mit den Ergebnissen früherer Epochen in einem Epochenvergleich ausgewertet. Abschließend liegen als Ergebnis stabile und signifikant verschobene Blockpunkte (Bereiche) des Bauwerks vor.

Bei der hier vorgestellten Methode wird keine flächenhafte Deformationsanalyse durchgeführt. Stattdessen werden aus den flächenhaften Laserdaten reproduzierbare diskrete Punkte abgeleitet, die für eine klassische Deformationsanalyse verwendet werden. Allerdings ermöglicht das Verfahren eine sehr hohe räumliche Auflösung des Objekts, die mit herkömmlichen Methoden nicht erzielbar wäre. Auf diese Weise erhält die Auswertung einen flächenhaften Charakter, was anhand des Beispiels in Kapitel 5 deutlich wird. Es bleibt kommenden Arbeiten vorbehalten, flächenhafte Analysen durchzuführen. Die hier abgeleiteten Blockpunkte könnten hierzu als Eingangsgrößen genutzt werden.

4.1 Untersuchung des eingesetzten Laserscanners

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben wurde, werden aktuell diverse Ansätze verfolgt, um den Fehlerhaushalt terrestrischer Laserscanner zu untersuchen und systematische Abweichungen durch Kalibrierung der Instrumente zu minimieren. Darauf aufbauend wird für diese Arbeit ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Dabei schließt an eine integrierte Systemuntersuchung die Prüfung einzelner Komponenten an. Für die Systemuntersuchung wurden in einem 3D-Labor Testmessungen in einem Referenzpunktfeld durchgeführt. Auftretende Systematiken in den Residuen wurden den einzelnen Komponenten des Messsystems zugeordnet, in separaten Untersuchungen verifiziert und gegebenenfalls rechnerisch beseitigt.

Die vorgestellten Untersuchungen wurden mit dem Modell Trimble GX 3D des Geodätischen Instituts durchgeführt, da mit diesem Instrument auch die Messungen am Testobjekt, der Okertalsperre, erfolgten. Eine Beschreibung des Scanner-Typs mit seinen wesentlichen Merkmalen findet sich in Kapitel 2.1.3. Detaillierte Informationen zum geräteinternen Strahlverlauf und zur Ablenkung des Laserstrahls sowie zu automatisch angebrachten Korrekturen an die rohen Messelemente werden vom Hersteller nicht bekannt gegeben. Aus diesem Grund konzentrieren sich alle Auswertungen auf die Analyse der ausgegebenen kartesischen Koordinaten bzw. der daraus abgeleiteten Kugelkoordinaten. Die mathematische Umformung zwischen polaren und kartesischen Koordinaten ist unabhängig von der technischen Umsetzung im Scanner immer möglich. Es ist von außen nicht erkennbar, inwiefern der Trimble GX 3D das Modell der Kugelkoordinaten konstruktiv abbildet. Daher wird bei den folgenden Untersuchungen nicht versucht, die aus der Untersuchung von Theodoliten bekannten Achsfehler und Exzentrizitäten (s. auch Abbildung 2.18) der Winkelmessung für den Scanner zu adaptieren. Da aufgrund mangelnder Informationen zum internen Strahlverlauf keine alternativen Modellfehler aufgestellt werden können, werden Abweichungen durch möglichst einfache, d.h. lineare Ansätze parametrisiert.

Es wird in dieser Arbeit darauf verzichtet, die weiteren in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Module Atmosphäre und Software des Messsystems Laserscanner zu untersuchen, da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf der Instrumentenkalibrierung liegt. Das Modul Objekt wird zum einen durch die Verwendung einheitlicher Zielmarken und zum anderen bei der praktischen Erprobung durch vergleichende Messungen auf die Oberfläche der Okertalsperre berücksichtigt.

Generell wurde bei den Untersuchungen des Scanners auf folgende Aspekte geachtet. Alle Testmessungen wurden erst nach einer Aufwärmphase von wenigstens 20 Minuten für die Auswertung verwendet, da sich ansonsten thermische Effekte deutlich in den Ergebnissen zeigen. Des Weiteren wurde stets bedacht, die aktuellen Umgebungsparameter Temperatur und Luftdruck in der Steuerungssoftware des Scanners einzutragen, um die atmosphärische Korrektion der Streckenmessungen zu gewährleisten.

Messungen im 3D-Labor des GIH, Referenzpunktfeld

Um die geometrische Qualität der Scannermessung zu analysieren, wurden aus gescannten Zielmarken abgeleitete Punkte mit ihren Sollkoordinaten verglichen. Hierzu wurde ein geeignetes räumliches Referenzpunktfeld temporär erzeugt, indem 14 Trimble-Zielmarken auf einer Metallleiter befestigt wurden. Die Leiter konnte im gesamten Messvolumen positioniert werden. Abbildung 4.2 zeigt einen horizontalen Aufbau an zwei Messpfeilern mit der Nummerierung der Zielmarken für diesen Versuch.

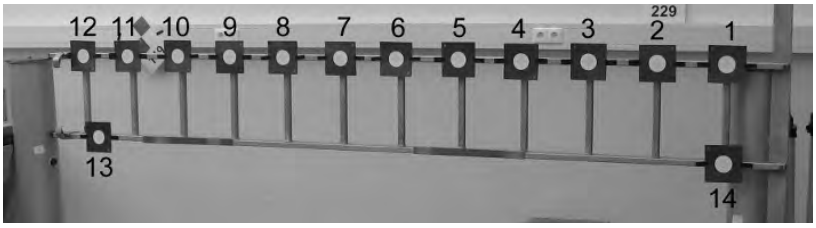


Abbildung 4.2: Zielmarken auf Leiter im 3D-Labor

Ein Referenzpunktfeld sollte wenigstens eine Zehnerpotenz genauer als das zu überprüfende Messverfahren sein. Diese Forderung konnte durch die Verwendung eines Lasertrackers (Leica LTD 640) erfüllt werden. Für jede Leiterposition wurden die räumlichen Koordinaten der Zielmarken mit dem Lasertracker und dem Laserscanner bestimmt. Für die Trackermessungen wurde eine Adaptierung entwickelt, die eine exakte Bestimmung der Zielmarken ermöglicht. In Versuchen wichen die gemessenen Koordinaten maximal 0,1 mm von ihrem Mittelwert ab. Abbildung 4.3 zeigt den Reflektor des Lasertrackers mit Adaptierung auf einer Zielmarke. Das Offset zwischen Reflektormitte und Zielmarke wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Hierzu wurde für alle Punkte einer Leiterposition eine Raumebene geschätzt. Anschließend wurden sie in Richtung des Normalenvektors um den Betrag des Offsets verschoben.

Abbildung 4.3: Adaptierung des Lasertracker-Reflektors

Es wurden 9 Leiterpositionen (5 horizontale und 4 senkrechte) realisiert. Da nicht alle Zielmarken von einem Tracker-Standpunkt aus erfasst werden konnten, wurden die einzelnen Lösungen in ein gemeinsames System transformiert. Die Restklaffungen an identischen Punkten der Transformationen sind nicht größer als 0,1 mm und erfüllen somit die Genauigkeitsanforderung an das Referenzpunktfeld. Als Ergebnis der Messungen liegen alle Zielmarkenpositionen in einem Trackersystem $\mathbf{x}_T$ und in einem Scannersystem $\mathbf{x}_S$ vor.

Über eine 6-Parameter-Ähnlichkeitstransformation (3 Rotationen, 3 Translationen) im Gauß-Helmert-Modell werden beide Systeme rechnerisch zur Deckung gebracht. Anhand der Restklaffungen (Verbesserungen der transformierten Koordinaten) kann beurteilt werden, in welchem Maß das durch den Scanner generierte Punktfeld $\mathbf{x}_S$ geometrisch vom Referenzpunktfeld $\mathbf{x}_T$ abweicht. Abbildung 4.4 zeigt die räumliche Verteilung der Zielmarken im Labor und die Klaffungsvektoren an den identischen Punkten. Der Scanner-Standpunkt ist durch einen Stern symbolisiert. Für die Restklaffungen ist in der Darstellung der Draufsicht ein Maßstab angegeben.

Draufsicht Schrägansicht

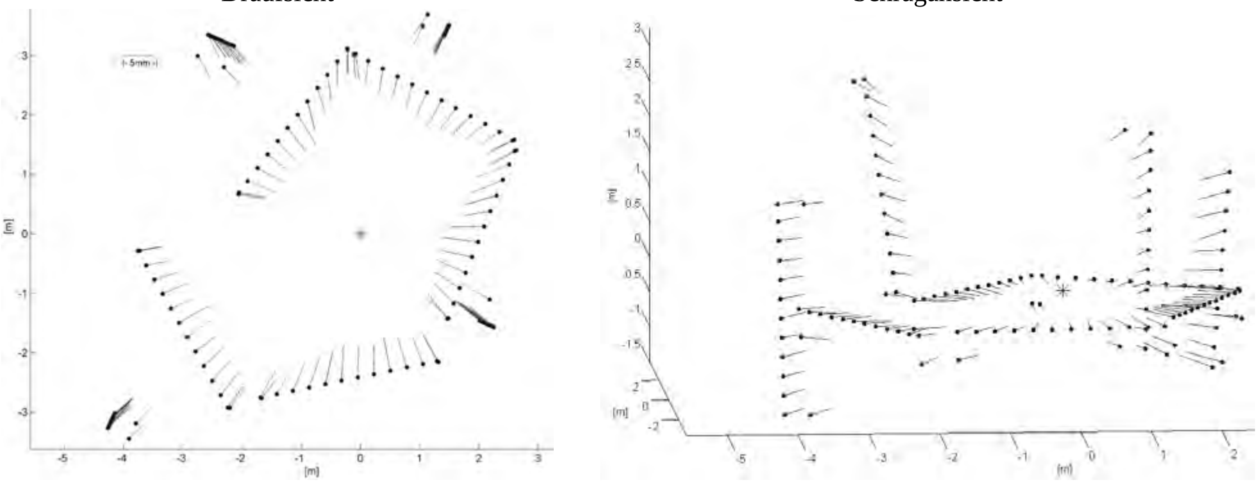


Abbildung 4.4: Räumliche Anordnung der Zielmarken und Restklaffungen an identischen Punkten

Die Vektoren sind auf den Scannerstandpunkt ausgerichtet und haben eine Länge von ca. 5 mm. Da der Laserscanner ein polar messendes System ist, resultieren die Differenzen vermutlich aus systematischen Abweichungen der Streckenmess-Komponente. Fehler in der Distanzmessung lassen sich in erster Näherung durch eine lineare Parametrisierung, d.h. durch Nullpunktabweichung und Maßstab, beschreiben. Eine mögliche Maßstabsabweichung läge für diesen Versuch bei einer durchschnittlichen Streckenlänge von 5 m bei ca. 1 mm pro Meter (1000 ppm). Das stellt für ein geodätisches Instrument einen ungewöhnlich hohen, unrealistischen Wert dar. Daher wird im Folgenden versucht, die Restklaffungen durch Einführung eines Nullpunktfehlers zu erklären.

Für die Berücksichtigung eines Nullpunktfehlers k_0 bei der Transformation ist es erforderlich, die kartesischen Koordinaten des Laserscanners $\mathbf{x}_S$ zwischenzeitlich in Polarkoordinaten umzuformen:

$$\mathbf{x}_{i_S}^{k_0} = \begin{bmatrix} x_i^{k_0} \\ y_i^{k_0} \\ z_i^{k_0} \end{bmatrix}_S = \begin{bmatrix} d_i^{k_0} \cdot \sin\theta_i \cdot \cos\varphi_i \\ d_i^{k_0} \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_i \\ d_i^{k_0} \cdot \cos\theta_i \end{bmatrix}_S \text{, mit } d_i^{k_0} = d_i + k_0, \, i = 1, 2, ..., n \, . \tag{4.1}$$

Die Bestimmung von k_0 erfolgt empirisch durch dessen schrittweise Variation und anschließender Neuberechnung der Transformationsparameter mit den angepassten Koordinaten im System des Laserscanners $\mathbf{x}_S^{k_0}$. Als Entscheidungskriterium dient die Minimierung des Varianzfaktors der Transformation $\hat{\sigma}_0^2$. Die Entwicklung von $\hat{\sigma}_0^2$ bei einer Variation von k_0 zwischen 3 mm und 6 mm zeigt Abbildung 4.5.

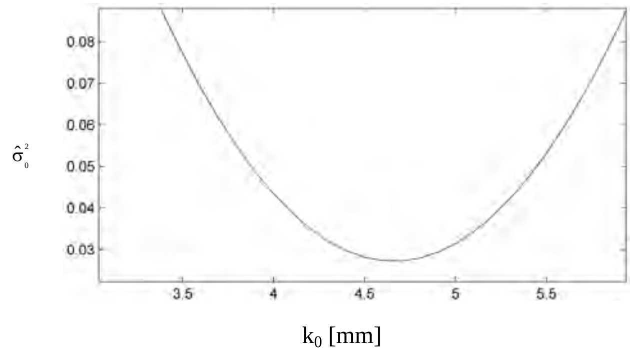


Abbildung 4.5: Entwicklung des Varianzfaktors bei der Variation von k_0

Der Verlauf von $\hat{\sigma}_0^2$ zeigt ein deutliches Minimum für k_0 = 4,7 mm, daher wird dieser Wert in das Modell eingeführt. In Abbildung 4.6 sind die resultierenden Restklaffen an den Zielmarken in den drei Koordinatenrichtungen dargestellt. Durch die senkrechten, gestrichelten Linien werden die Grafen in neun Felder unterteilt. Die ersten fünf Felder repräsentieren die horizontalen Leiteraufstellungen, die weiteren vier Felder stehen für die vier senkrechten Leiterpositionen.

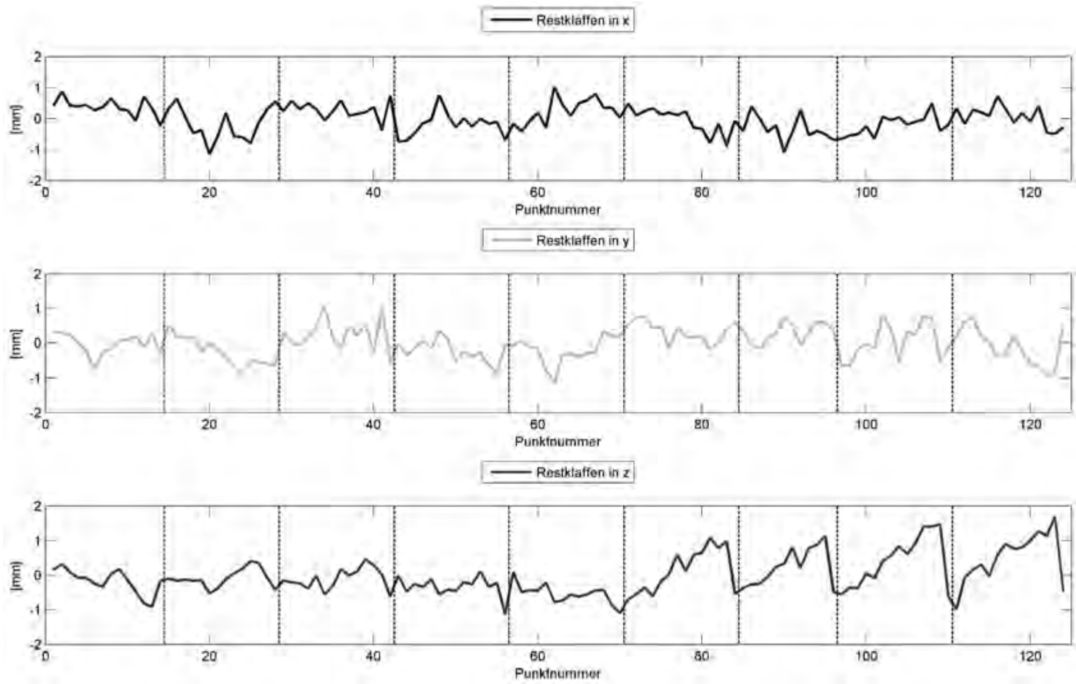


Abbildung 4.6: Restklaffen der Transformation unter der Berücksichtigung von k_0 = 4,7 mm

Durch die Einführung von k_0 = 4,7 mm reduziert sich der durchschnittliche Betrag der Verbesserungen deutlich. Die x- und y-Komponenten liegen zwischen -1 und +1 mm und zeigen keine Systematik. Ähnliches gilt für die z-Komponente der Zielmarken für die horizontalen Leiterpositionen. Die Verläufe der Restklaffen für die senkrechten Leiterpositionen weisen hingegen ein Sägezahnmuster auf. Abgesehen von leichten Schwankungen erhöhen sich die Werte in den vier Feldern kontinuierlich für die ersten Zielmarken und fallen bei der letzen wieder ab. Vergleicht man die Nummerierung der Zielmarken mit deren Anordnung auf der Leiter (s. Abbildung 4.5), wird deutlich, dass für die senkrechten Leiterpositionen die z-Koordinaten bis Nummer 12 stetig ansteigen, bei Nummer 13 stagnieren und bis Nummer 14 wieder auf das Niveau von Nummer 1 absinken. Es besteht demnach eine hohe Korrelation zwischen den z-Koordinaten der Zielmarken und den Restklaffen für diese Koordinatenkomponente. Die z-Koordinate wird über die Polarelemente des Scanners, die Schrägdistanz d und den Vertikalwinkel θ, ermittelt. Die Streckenmessung wird bereits durch k_0 korrigiert, daher wird im Folgenden versucht, die systematischen Abweichungen in der z-Koordinate durch einen Korrekturterm für den Vertikalwinkel zu reduzieren. Alternativ hierzu wurde getestet, ob sich die verbleibenden Systematiken durch die zusätzliche Einführung eines Maßstabsfaktors erklären lassen. Dieser Ansatz führte jedoch nicht zu einer Reduzierung der Restklaffen in z, daher wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Abbildung 4.7 verdeutlicht grafisch den Zusammenhang zwischen einem in z-Richtung um den Wert r (Restklaffung bzw. Verbesserung in z-Richtung) verschobenen Punktes E^* und den zugehörigen Polarelementen d^* und θ^*.

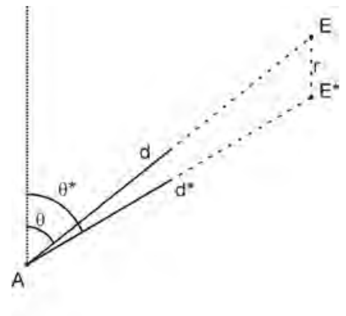


Abbildung 4.7: Rückführung einer verfälschten z-Koordinate auf die gemessenen Polarelemente

Um einen Korrekturterm für den Vertikalwinkel abzuleiten, wird r auf zwei Wegen berechnet, als Differenz der z-Koordinaten von E und E^* abgeleitet aus den Polarelementen:

$$z_E = z_A + d \cdot \cos(\theta), \quad z_E^* = z_A + d^* \cdot \cos(\theta^*) \tag{4.2}$$

sowie aus einem linearen Zusammenhang zwischen r und dem gemessenen Vertikalwinkel θ:

$$r = z_E - z_E^* = a + b \cdot \theta \,. \tag{4.3}$$

Die Vermutung eines linearen Zusammenhangs resultiert aus dem Sägezahnmuster in Abbildung 4.6. Die Parameter a und b lassen sich durch eine lineare Regression mit der Zielgröße r und der Eingangsgröße θ berechnen. Für die vier senkrechten Leiterpositionen ergibt sich im Durchschnitt a = 3,6 mm und b = -2,5 mm/rad.

Kombiniert man die Formeln (4.2) und (4.3) folgt:

$$a + b \cdot \theta = z_A + d \cdot \cos(\theta) - (z_A + d^* \cdot \cos(\theta^*)) \,. \tag{4.4}$$

Mit der vereinfachenden Annahme, dass aufgrund der geringen Differenz von θ und θ^*, $d \approx d^*$ ist, ergibt sich für den korrigierten Vertikalwinkel θ^*:

$$\theta^* = \arccos\left(\frac{a + b \cdot \theta}{-d} + \cos(\theta) \right). \tag{4.5}$$

Abbildung 4.8 zeigt die Differenz von gemessenem und korrigiertem Zenitwinkel gegenüber dem gemessenen Winkel. Für den Messbereich des Zenitwinkels (60 … 120 gon) kann der Verlauf durch eine Gerade approximiert werden. Daher wird im Folgenden Gleichung (4.5) durch ein lineares Modell vereinfacht. Werden hierzu die Geradenparameter für den korrigierten Zenitwinkel durch eine lineare Regression geschätzt, können diese als Indexfehler c_0 und Maßstab c der Zenitwinkelmessung (des oszillierenden Spiegels des Trimble GX 3D) interpretiert werden, sodass für den korrigierten Zenitwinkel gilt:

$$\theta^* = c_0 + c \cdot \theta \,. \tag{4.6}$$

Für das vorgestellte Beispiel ergeben sich $c_0 = 0{,}051$ gon und $c = 0{,}99945$ mit den Standardabweichungen $\sigma_{c_0} = 0{,}0004\,\text{gon}$ und $\sigma_c = 4{,}2 \cdot 10^{-6}$.

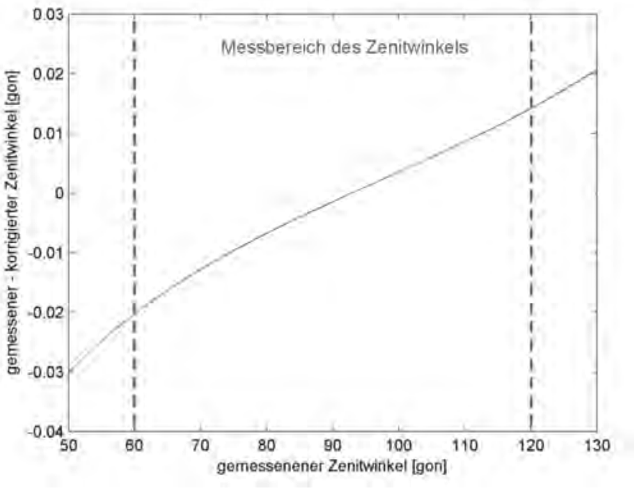


Abbildung 4.8: Zusammenhang zwischen gemessenem und korrigiertem Zenitwinkel

Werden die gemessenen z-Koordinaten des Laserscanners in Polarkoordinaten umgerechnet, mit dem nach Formel (4.6) korrigierten Vertikalwinkel θ^* zurückgerechnet und anschließend auf die Referenzkoordinaten transformiert, ergeben sich die Restklaffen für z wie in Abbildung 4.9 dargestellt.

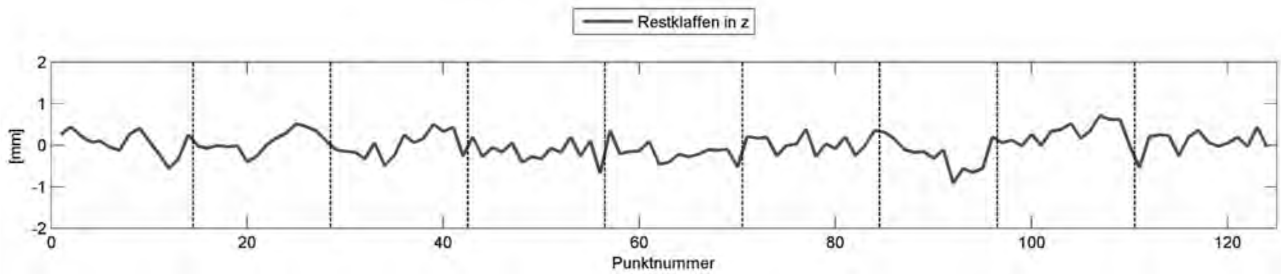


Abbildung 4.9: Restklaffen für z unter der Berücksichtigung von k_0 und θ^*

Unter Berücksichtigung der ermittelten Korrekturparameter k_0, c_0 und c weisen die mit dem Laserscanner gemessenen Koordinaten der Zielmarken keine ersichtlichen systematischen Abweichungen zu den Referenzkoordinaten auf. Die Restklaffen der Transformation liegen zwischen -1 und 1 mm. Das entspricht der zu erwartenden Genauigkeit des Laserscanners für Messungen im Nahbereich unter Laborbedingungen. Es werden daher keine gezielten Untersuchungen der Horizontalwinkelmessung sowie eines möglichen Taumelfehlers durchgeführt.

Diese Untersuchung des Trimble GX 3D wurde in der Art nur einmal am 29.05.2007 durchgeführt, daher liegen keine Vergleichsergebnisse vor. Die Messungen im Labor lagen zeitlich zwischen dem 2. und 3. Einsatz des Scanners an der Okertalsperre (s. Kapitel 5).

Auf Signifikanztests der geschätzten Parameter wird an dieser Stelle verzichtet. Bei der Einführung von Kalibrierparameter in die Registrierung in Kapitel 4.2.3 wird dieser Punkt jedoch ausführlich behandelt.

Untersuchungen zur Streckenmess-Komponente

Die Auswertung der Messungen im 3D-Labor zeigt, dass eine lineare Parametrisierung der Streckenmess-Komponente des Laserscanners die Restklaffen bei der Transformation in ein Referenz-Punktfeld deutlich reduziert. Um das Ergebnis zu verifizieren, werden weitere Untersuchungen mit deutlich größeren Zielweiten (Messkeller des GIH: bis 50 m, Kalibrierstrecke des GIH: bis 140 m) durchgeführt.

Der Messkeller des Geodätischen Instituts Hannover ist etwas über 50 m lang. Er ist mit drei betonierten Messpfeilern und diversen mobilen Stahl-Stativen ausgestattet. Für die nähere Untersuchung der Streckenmess-Komponente des Trimble GX 3D Laserscanners wurde eine lineare Prüfstrecke, bestehend aus 2 Messpfeilern (Nr. 1 und 7) und 5 Stativpunkten (Nr. 2 – 6), aufgebaut. Die Referenzabstände zwischen den Punkten wurden mithilfe einer kalibrierten, hochgenauen Totalstation (Leica TDA 5005) bestimmt. Abbildung 4.10 zeigt den schematischen Aufbau der Prüfstrecke.

Abbildung 4.10: Prüfstrecke im Messkeller des GIH

Für die Überprüfung des Scanners wurden von den Messpfeilern aus jeweils alle anderen Punkte bestimmt. Als Zielmarken kamen zwei Typen zum Einsatz: Die flache Trimble-Zielmarke (s. Tabelle 2.2) auf einem zentrierbaren Träger sowie eine eigens entwickelte Zielmarke, die in Kapitel 4.2.2 näher vorgestellt wird. Die Abweichungen der abgeleiteten Streckenlängen von den Referenzabständen zeigt Abbildung 4.11.

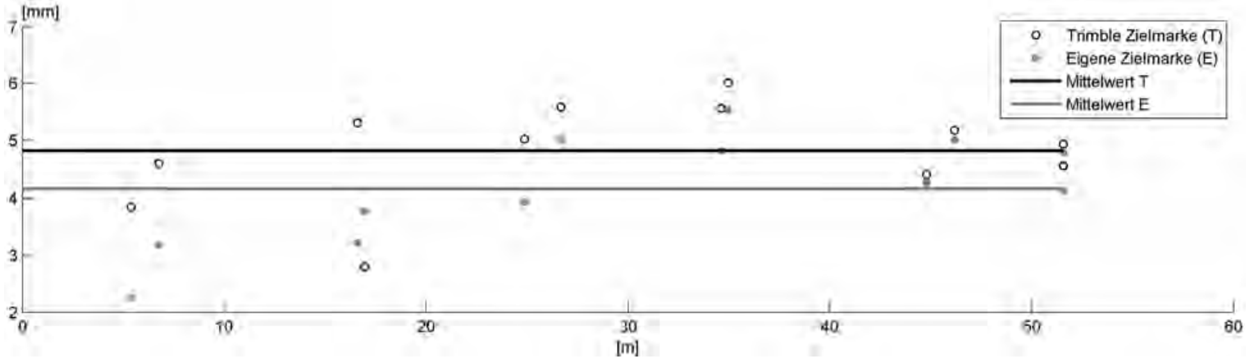


Abbildung 4.11: Ergebnisse der Messung auf der Prüfstrecke im Messkeller des GIH

Die Ergebnisse streuen für beide Zielmarken in einem Bereich von ± 2 mm um ihren Mittelwert. Der Mittelwert der Abweichung kann als Nullpunktfehler k_0 der Streckenmessung interpretiert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Oberflächen der Zielmarken (Trimble: grüne Reflexfolie mit weißem Kreis, $k_0 = 4{,}8$ mm; Eigenentwicklung: dunkelgrau-weißer Farbwechsel, $k_0 = 4{,}2$ mm) differieren die Ergebnisse für k_0 um 0,6 mm. Die Ergebnisse bestätigen den Nullpunktfehler, der im Rahmen der Messungen im 3D-Labor ($k_0 = 4{,}7$ mm) geschätzt wurde. Die Gründe liegen in der zeitlichen Nähe von einer Woche und den vergleichbaren äußeren Bedingungen. Bei Messungen im Freien mit größeren zeitlichen Abständen differieren die Parameter stärker, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

Die Kalibrierstrecke des GIH liegt im örtlich angrenzenden Georgengarten. Sie besteht aus 9 geradlinig angeordneten Pfeilern mit einem maximalen Abstand von 1720 m. Für die Untersuchung des verwendeten Laserscanner in Kombination mit den Trimble-Zielmarken werden die Abschnitte zwischen den Pfeilern 2 bis 7 und einer maximalen Streckenlänge von 140 m verwendet. Die selbst entwickelte Zielmarke lässt auch größere Zielweiten zu, die aber aus Gründen der Vergleichbarkeit hier nicht betrachtet werden.

Der Scanner wurde in drei Messungen auf der Kalibrierbasis getestet. Hierzu kamen jeweils sechs Pfeiler-Kombinationen zum Einsatz. Die Abweichungen von den Sollstrecken sind für beide Zielmarken und die erste Epoche in Abbildung 4.12 dargestellt.

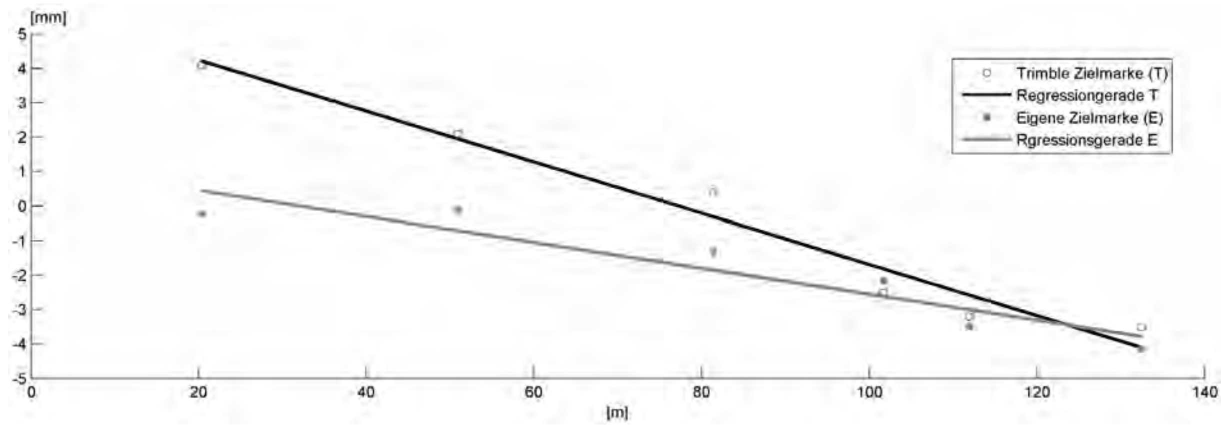


Abbildung 4.12: Ergebnisse der Messung auf der Kalibrierstrecke, Epoche 1

Aufgrund der größeren Streckenlängen erfolgt hier die lineare Parametrisierung unter Berücksichtigung eines Maßstabsfaktors. Mit den Sollstrecken als Eingangsgrößen und den Abweichungen als Zielgröße können über eine lineare

Regression die Parameter Nullpunktfehler (k_0) und Maßstabsfaktor (m) berechnet werden. Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse aller drei Messungen zusammen. Dabei steht „T“ für die Trimble Zielmarke und „E“ für die eigene Zielmarke.

Tabelle 4.1: Auswerteergebnisse der drei Messungen auf der Kalibrierstrecke

Messung	Datum	k_0, T	k_0, E	m, T	m, E
1	01.02.2007	5,7 mm	1,2 mm	0,999926	0,999962
2	28.06.2007	2,9 mm	0,9 mm	0,999980	1,000009
3	11.09.2007	4,6 mm	2,4 mm	0,999985	1,000006

Die Ergebnisse unterscheiden sich sowohl innerhalb einer Messung zwischen den Zielmarken als auch zwischen den Messungen deutlicher als in den Laborversuchen. Das lässt sich teilweise durch die wechselnden äußeren Bedingungen wie Temperaturschwankungen, Luftfeuchtigkeit und Lichtverhältnisse begründen, die nicht vollständig durch das geräteintern verwendete Atmosphärenmodell erklärt werden. Aufgrund der zeitlichen Abstände sind zudem Einflüsse auf das Messsystem verursacht durch Benutzung, Transport und Lagerung zu berücksichtigen.

Trotz der angesprochenen Unterschiede bestätigen die geschätzten Parameter tendenziell die Ergebnisse der Laborversuche. Für die Messungen auf die Trimble Zielmarke sind die Abweichungen gering, die Resultate der eigenen Zielmarke weichen stärker zwischen Labor und Freiluftanwendung ab. Generell zeigen die Untersuchungen dass eine zeitnahe Bestimmung der Kalibrierparameter der Streckenmess-Komponente für hochgenaues Laserscanning erforderlich ist. In Kapitel 4.2.3 wird daher ein Ansatz entwickelt, die benötigten Parameter im Rahmen der Registrierung zu schätzen.

Untersuchungen zur Vertikalwinkel-Komponente

Neben der Parametrisierung der Streckenmess-Komponente, führt auch die Anpassung des abgeleiteten Vertikalwinkels bei den Messungen im 3D-Labor zu einer Reduzierung der Restklaffen. Um diesen Effekt isoliert zu betrachten, wird ein Versuchsaufbau benötigt, bei dem für unterschiedliche Zielmarkenpositionen ausschließlich das Polarelement Vertikalwinkel deutlich variiert. Idealerweise werden die Zielmarken hierfür auf einer vertikalen Kreisbahn angeordnet, wobei der Scanner sich für die Messungen in dessen Mittelpunkt befindet.

Näherungsweise lässt sich eine solche Konfiguration in der Versuchshalle des Franzius Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover realisieren. Die Halle stützt sich auf bogenförmige Träger, die mit einer handelsüblichen Leiter erreichbar sind. Abbildung 4.13 zeigt einen vertikalen Schnitt durch die Punktwolke eines dieser Träger.

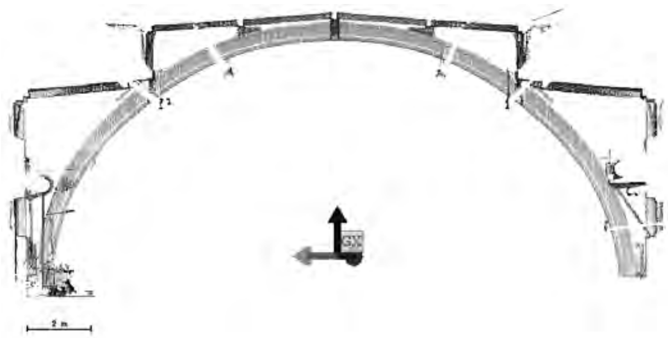


Abbildung 4.13: Ansicht eines bogenförmigen Trägers der Versuchshalle mit Scanner-Standpunkt

Für den Versuch wurde der Scanner mittig unter dem Träger aufgebaut. Am Träger und in der Umgebung wurden 22 Trimble-Zielmarken platziert, deren Koordinaten zunächst mit einer hochgenauen Totalstation (Leica TDA 5005) über räumliche Vorwärtsschnitte in einem lokalen System überbestimmt gemessen wurden. Die anschließende Netzausgleichung mit dem Programm HANNA erbrachte Standardabweichungen <= 0,3 mm in allen Koordinatenrichtungen, sodass die Zielmarkenpositionen als Referenz für die Untersuchung verwendet werden konnten.

Im zweiten Schritt wurden die Koordinaten der Zielmarken mit dem Laserscanner zweifach mit unterschiedlichen Instrumentenhöhen („hoch“ und „tief“) aus der Trägermitte bestimmt.

Für die Auswertung wurden die Koordinaten mittels einer überbestimmten 6-Parameter-Transformation auf die Referenzkoordinaten transformiert. Dabei zeigen sich vergleichbare radiale Restklaffen wie in Abbildung 4.4. Die Einführung eines Nullpunktfehlers von k_0 = 3,3 mm reduziert die Verbesserungen deutlich. Die verbleibenden Restklaffen in z-Koordinatenrichtung sind für die beiden Scanneraufstellungen in Abbildung 4.14 den entsprechenden Vertikalwinkeln zugeordnet. Die Abweichungen von den Referenzwerten sind vom Betrag her deutlich kleiner als 1 mm. Anders als beim Versuch im 3D-Labor ist kein linearer Zusammenhang zwischen Zenitwinkel und Verbesserung in z-Koordinatenrichtung erkennbar.

Die Untersuchung zeigt, dass die zuvor nachgewiesene lineare Kalibrierfunktion für den Vertikalwinkel des Scanners in diesem Beispiel nicht reproduzierbar ist. Gründe für die abweichenden Ergebnisse sind nicht offensichtlich. Es ist nicht ausgeschlossen, dass bei weiteren Messungen erneut systematische Abweichungen bei der Vertikalwinkelmessung auftreten können. Aus diesem Grund sollten bei der Auswertung von Scanner-Messungen die Qualität der einzelnen Polarelemente bewertbar sein und gegebenenfalls durch Kalibrierfunktionen korrigiert werden können. In der folgenden Zusammenfassung der durchgeführten Scanner-Untersuchungen wird dieser Punkt erneut aufgegriffen.

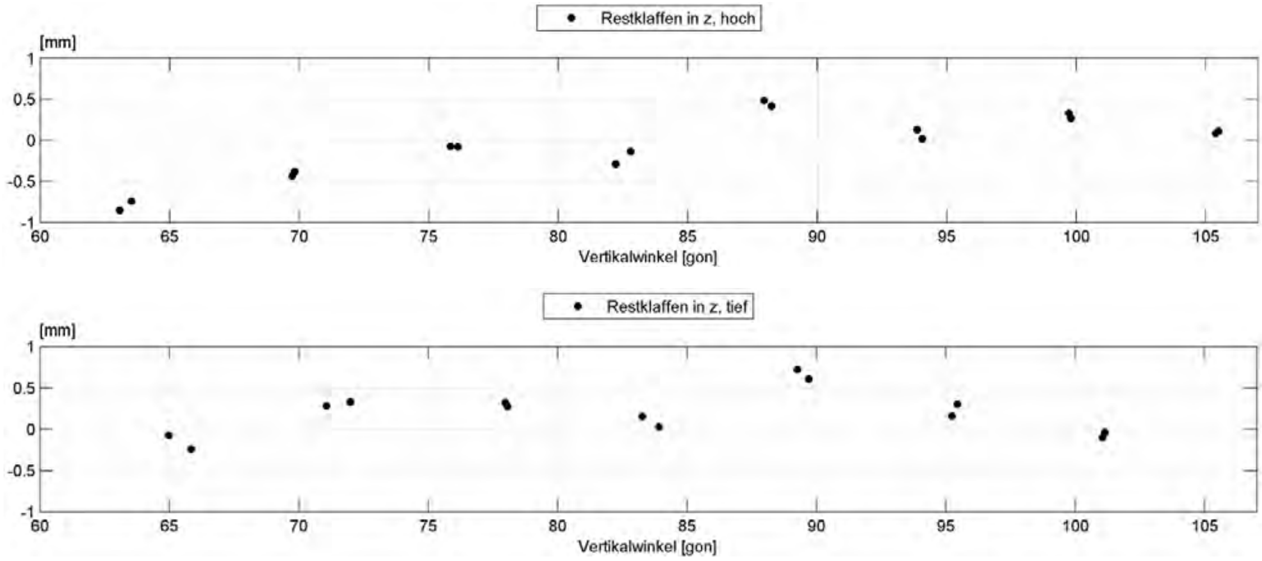


Abbildung 4.14: Restklaffen in z bezogen auf den Vertikalwinkel für die Scanneraufstellungen „hoch“ und „tief“

Als Resümee aus den Untersuchungen des Laserscanners Trimble GX 3D können folgende Punkte festgehalten werden:

- Ein mehrstufiges Testverfahren erweist sich als geeignet, systematische Abweichungen aufzudecken und zu reduzieren. Die lineare Parametrisierung der Streckenmessung verkleinert die Residuen in allen Versuchen. Eine Modellierung des Vertikalwinkels zur Reduktion von Residuen in z-Koordinatenrichtung konnte nicht verifiziert werden. Systematische Abweichungen, die auf Fehler in der Horizontalwinkelmessung hindeuten, treten nicht auf.
- Untersuchungen sollten immer in der benötigten Kombination von Scanner und Objekt (Zielmarke) durchgeführt werden, da geschätzte Parameter für die Streckenmessung streng genommen nur für die jeweilige Kombination gelten.
- Die Untersuchungen sollten möglichst zeitnah zur tatsächlichen Messung durchgeführt werden. Optimal ist eine Bestimmung von Kalibrierparametern im Rahmen der Messung und Registrierung selbst, da eine zeitliche Stabilität der geschätzten Parameter nicht vorausgesetzt werden kann. Hierzu können geeignete Parameter in die Transformation eingeführt werden. Stehen für die Registrierung der gemessenen Punktwolken hochgenau bekannte Koordinaten von Referenzpunkten zur Verfügung, können dazu die hieran auftretenden Restklaffen analysiert werden.

Die bei der Untersuchung des Scanners gewonnenen und oben zusammengefassten Erkenntnisse finden bei der hier vorgestellten Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS Verwendung. Näheres dazu folgt in den anschließenden Kapiteln.

4.2 Registrierung

Die Registrierung der gescannten Punktwolken ist für die Bauwerksüberwachung mit TLS von herausragender Bedeutung. Eine möglichst genaue und zuverlässige Referenzierung innerhalb des lokalen geodätischen Datums ist eine notwendige Voraussetzung, um absolute Objektdeformationen ableiten zu können. Wie in Kapitel 2.2 erläutert wurde, wird bei der Verknüpfung von Punktwolken im Wesentlichen zwischen zwei Methoden unterschieden: Transformationen über identische Punkte und korrelationsbasierte Verfahren (z.B. ICP). Die korrelationsbasierten Verfahren nutzen große Teile der Punktwolke und erzielen daher gute Ergebnisse für die relative Verknüpfung von Laserscans. Für absolute Überwachungsmessungen ist nach derzeitigem Stand der Einsatz korrelationsbasierter Verfahren nur in Kombination mit identischen Punkten möglich. Dabei stellt sich allerdings die Frage nach der geeigneten Gewichtung der einzelnen Ansätze. Wird mehr Gewicht auf die Verknüpfung der Punktwolken gelegt, verschlechtert sich in der Regel die Referenzierung und umgekehrt. Der hier vorgestellte Transformationsansatz beschränkt sich auf die Nutzung identischer Punkte zur Schätzung geeigneter Transformationsparameter. Bei der empirischen Erprobung der Auswertemethodik an der Okertalsperre werden jedoch auch vergleichende ICP-Lösungen berechnet und analysiert. Näheres hierzu folgt in Kapitel 5.4.4.

Für die Registrierung über identische Punkte sind drei Arbeitsschritte wesentlich:

- Die Bestimmung der Stützpunktkoordinaten in einem Referenzrahmen durch hochgenaue Messverfahren und 3D-Netzausgleichung unter Verwendung eines einheitlichen Datums. Dies wird im Rahmen einer Deformationsanalyse gewährleistet.
- Die Ableitung der Stützpunktkoordinaten aus Scannermessungen geeigneter Zielmarken.
- Die Transformation der Scannermessungen in das definierte Datum unter Berücksichtigung eines abgestimmten stochastischen Modells (s. Varianzkomponentenschätzung).

Diese Schritte werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

4.2.1 Datumsdefinition und Deformationsanalyse

Eine wichtige Voraussetzung für die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur absoluten Bauwerksüberwachung ist ein örtliches Überwachungsnetz. Es sollte aus dauerhaft vermarkten Beobachtungs- und Sicherungspunkten bestehen. Die Punkte werden bei der Messung für den Aufbau von Zielzeichen und als Standpunkte für den Laserscanner verwendet. Das Überwachungsnetz stellt die Realisierung des örtlichen geodätischen Datums dar. Dessen Stabilität sollte zu jeder Messepoche kontrolliert werden. Hierzu sind geeignete Messverfahren und ein Deformationsmodell erforderlich.

Als Messverfahren kommen die üblichen geodätischen Methoden zur hochgenauen Koordinatenbestimmung diskreter Punkte in Frage. Hierzu zählen elektrooptische Tachymetrie, Präzisionsnivellement und differentielles GPS. Mit terrestrischen Laserscannern können über Zielmarken ebenfalls diskrete Punkte abgeleitet werden. Der in den folgenden Kapiteln vorgestellte Ansatz zur Registrierung von gescannten Punktwolken impliziert jedoch die Überprüfung des scannenden Instruments. Daher sollte das Überwachungsnetz unabhängig und mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden.

Als Deformationsmodell für die Überprüfung des Überwachungsnetzes eignet sich das in Kapitel 3.1.4 ausführlich behandelte Kongruenzmodell. Es überprüft den geometrischen Zustand des dauerhaft und stabil vermarkten Netzes zu zwei oder mehreren Epochen, ohne den zeitlichen Verlauf oder mögliche Ursachen im Modell zu berücksichtigen. Das Ergebnis der Analyse sind die aktuellen Punkt-Koordinaten des Überwachungsnetzes mit ihren stochastischen Informationen, geschätzt in einer freien Netzausgleichung mit Lagerung auf den stabilen Datumspunkten $\hat{\mathbf{x}}^{D}$:

$$\hat{\mathbf{x}}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_0^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} \,. \tag{4.7}$$

Der Parametervektor $\hat{\mathbf{x}}$ enthält die Koordinaten der Beobachtungs- und Sicherungspunkte. Diese stellen die Referenz für die Registrierung der gescannten Punktwolken der aktuellen Epoche dar. Dieser Schritt wird in Kapitel 4.2.3 behandelt.

Neben den Beobachtungs- und Sicherungspunkten zählen zu einem geodätischen Überwachungsnetz die fest vermarkten Objektpunkte. Diese sind für den hier vorgestellten Ansatz zur Bauwerksüberwachung mit TLS mittel- und langfristig nicht relevant. In der Erprobungsphase können sie allerdings die mit TLS erzielten Ergebnisse kontrollieren. In der Deformationsanalyse nach dem Kongruenzmodell werden die Objektpunkte im zweiten Schritt einer zweistufigen Netzanalyse betrachtet. In dieser Arbeit werden sie als so genannte Blockpunkte aus den gemessenen Punktwolken und dem Objektmodell abgeleitet. Ihre Differenzen zu den Koordinaten der Vergleichsepoche werden wie die Objektpunktdifferenzen im Kongruenzansatz (s. Kapitel 3.1.4) in einem zweiten Auswerteschritt auf ihre Verträglichkeit mit den Datumspunkten hin untersucht. Näheres hierzu folgt in Kapitel 4.3.

4.2.2 Zielmarken

Die hier verwendete Registrierung der Punktwolken basiert auf der Transformation über identische Punkte. Diese werden aus gescannten Zielmarken abgeleitet. Handelsübliche Zielmarken weisen den Nachteil auf, dass sie für Zielweiten > 100 m nicht die hier erforderliche Genauigkeit bei ihrer Erkennbarkeit aufweisen. Daher wurde eine eigene Zielmarken entwickelt, welche auf die speziellen Bedürfnisse bei der Überwachung großer Bauwerke mittels terrestrischem Laserscanning ausgerichtet ist. Bei der Entwicklung waren folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Erkennbarkeit mit einer Wiederholgenauigkeit besser als 1 mm bei Zielweiten > 100 m,
- Möglichkeit zur Zwangszentrierung in der Kombination mit handelsüblichen Dreifüßen,
- Baugleichheit bei der Verwendung mehrerer Exemplare, damit die Austauschbarkeit gewährleistet ist,
- aus allen Richtungen anzielbar oder auf den Scanner ausrichtbar.

Bei Zielmarken für das terrestrische Laserscanning werden räumliche und flache Ausführungen unterschieden. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, wirken sich bei räumlichen Zielmarken Überstrahleffekte negativ auf die Auswertung auf. Daher lag hier der Fokus auf der Entwicklung einer flachen Zielmarke. Als Muster werden konzentrische Kreise in einem dunkelgrau/weiß Wechsel verwendet. Kreise bieten gegenüber einem Schachbrettmuster, wie es beispielsweise von Zoller+Fröhlich-Zielmarken verwendet wird, einen Vorteil, der aus dem Abtastverhalten des Scanners resultiert. In der Regel tastet ein Laserscanner seine Umwelt in nahezu lotrechten Spalten ab. Bei einem ebenfalls senkrecht ausgerichteten Schachbrettmuster kann das zu einer Ungenauigkeit bei der Erkennung der Zielmarke in Abhängigkeit von der horizontalen Auflösung des Scanners führen. Entsprechendes gilt für die Erkennbarkeit eines horizontalen Farbwechsels in Abhängigkeit von der vertikalen Auflösung des Scanners. Eine Minimierung der beschriebenen Fehler kann durch eine Drehung der Zielmarke um 45° (→ Rautenmuster) oder durch die Verwendung konzentrischer Kreise erzielt werden. Die für diese Arbeit entwickelte Zielmarke basiert konstruktiv auf einem Mehrfach-Prismenträger von Zeiss. Abbildung 4.15 zeigt ein Exemplar auf einem Vermessungspfeiler an der Okertalsperre. Sie weist folgende Merkmale auf:

- Die Zwangszentrierung über Zeiss-Zapfen oder Wild/Leica-Dreifußsystem ist möglich,
- die Zielmarke ist dreh- und kippbar und somit optimal auf den Scanner ausrichtbar,
- das Muster besteht aus vier kreisförmigen, konzentrischen dunkelgrau/weiß-Übergängen mit den Radien: 14 mm, 32 mm, 54 mm und 83 mm.

Abbildung 4.15: Laserscanning Zielmarke

Die Auswertung einer gescannten Zielmarke erfolgt halbautomatisch in sukzessiven Arbeitsschritten. Zunächst wird manuell ein Näherungswert $\mathbf{x}_0$ für den gesuchten Mittelpunkt in der Punktwolke gemessen. Anschließend werden über ein Abstandskriterium die zur Zielmarke gehörenden Punkte selektiert. Die Menge dieser Punkte sei mit **Z** bezeichnet. Da die gemessene Punktwolke der Zielmarke eine Ebene repräsentiert, kann die Schätzung des Mittelpunktes zweidimensional erfolgen. Hierzu wird für die Punktmenge **Z** eine bestanpassende Ebene berechnet. Anschließend werden die Punkte von **Z** in ein binäres Rasterbild umgerechnet, aus dem mittels Filterung die Kanten für die Mittelpunktsschätzung extrahiert werden. Die Schätzung erfolgt als zweistufige Kreisausgleichung nach kleinsten Quadraten. Im Anschluss erfolgt eine Rücktransformation des zweidimensionalen Mittelpunkts in kartesische Raumkoordinaten. Die Ebenenschätzung nutzt den Algorithmus von DRIXLER 1993, der in Kapitel 2.3.2 vorgestellt wurde. Auf die weiteren Arbeitsschritte wird im Folgenden näher eingegangen.

Binäres Rasterbild und Kantenextraktion

Für die Mittelpunktsbestimmung werden die der geschätzten Ebene zugeordneten Punkte in ein binäres Rasterbild transformiert. Hierzu werden die Punkte $\mathbf{x}_i$ senkrecht auf die Ebene projiziert. Die so abgebildeten Punkte lassen sich mithilfe der Verbesserungen $\hat{v}_i$ und dem geschätzten Normalenvektor $\hat{\mathbf{n}}$ berechnen. Sie werden als Lotfußpunkte $\mathbf{x}_i^L$ bezeichnet:

$$\mathbf{x}_i^L = \mathbf{x}_i + \hat{v}_i \cdot \hat{\mathbf{n}} \,. \tag{4.8}$$

Durch die anschließende Transformation der Lotfußpunkte in eine Koordinatenebene wird eine Reduzierung von drei auf zwei Dimensionen erzielt. Eine Abbildung in die yz-Ebene erfolgt beispielsweise über zwei nacheinander durchgeführte Rotationen um die z- und die y-Achse. Die erforderlichen Rotationswinkel lassen sich aus den Komponenten des geschätzten Normalenvektors ableiten:

$$r_z = \arctan\left(\hat{n}_y / \hat{n}_x \right), \quad r_y = \arcsin\left(\hat{n}_z \right) . \tag{4.9}$$

Mithilfe der beiden Winkel wird eine Rotationsmatrix $\mathbf{R}_E$ nach Formel (2.4) aufgestellt. Die in die yz-Ebene transformierten Punkte berechnen sich zu:

$$\mathbf{x}_i^E = \mathbf{R}_E \cdot \mathbf{x}_i^L \,. \tag{4.10}$$

Für alle Punkte $\mathbf{x}_i^E$ ist die x-Koordinate Null. Somit ist die angestrebte Reduktion auf zwei Dimensionen erreicht. Im nächsten Schritt wird aus den Lotfußpunkten ein binäres Raster mit einer Pixelgröße von (0,5 mm)² erzeugt. Sie resultiert aus der Anforderung an die Auswertung, eine Wiederholgenauigkeit kleiner 1 mm zu erzielen. Die Pixelzahl des Rasterbildes wird entsprechend der Größe der gescannten Zielmarke gewählt. Für jedes Rasterelement wird getestet, ob der Intensitätswert des korrespondierenden Lotfußpunkts größer oder kleiner als ein zuvor definierter Schwellwert ist. Entsprechend erhält das Rasterelement den Wert Null oder Eins.

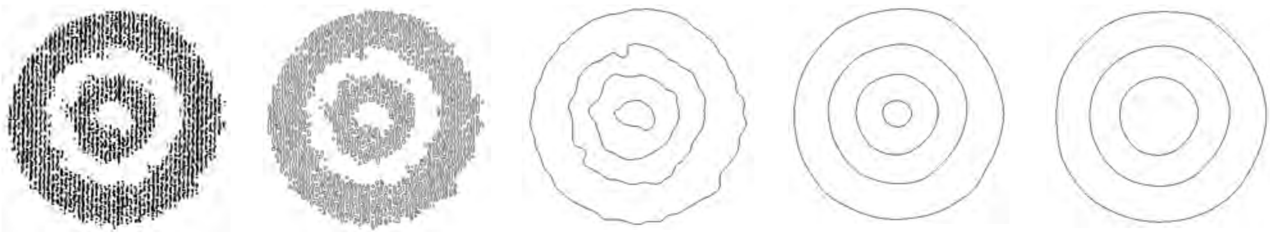
Im nächsten Schritt werden im Binärbild die Ränder der konzentrischen Kreise als Schwarz-Weiß-Übergänge detektiert. Hierzu kommt ein Kantenfilter (Hochpassfilter) zum Einsatz. In Versuchen hat sich das Canny-Filter (CANNY 1986) als besonders geeignet herausgestellt. Dabei handelt es sich um ein modifiziertes Laplace of Gaussian (LoG) Filter, das in der Bildverarbeitungs-Toolbox von Matlab implementiert ist. Es kombiniert die Kantenerkennungsfunktion des Laplace-Filters mit den optimalen Glättungseigenschaften des Gauß-Filters (LUHMANN 2000). Die Faltungsmatrix eines LoG-Filters leitet sich aus der 2-dimensionalen Dichtefunktion der Normalverteilung ab:

$$\nabla^2 \phi(u,v) = \frac{1}{\sigma^4}\left(\frac{u^2+v^2}{\sigma^2} - 2 \right) e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} , \quad \text{mit}: \phi(u,v) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}} . \tag{4.11}$$

Eine Visualisierung der Faltungsmatrix zeigt Abbildung 4.16. Aufgrund ihrer Form wird die Darstellung auch als Mexican Hat bezeichnet.

Abbildung 4.16: Visualisierung eines LoG-Filters (Mexican Hat)

Das Canny-Filter wird über drei Parameter gesteuert. Über einen oberen und einen unteren Grenzwert wird festgelegt, welche der im Bild detektierten Kanten ausgegeben werden. Dabei werden schwach identifizierte Kanten nur ausgegeben, wenn sie eine direkte Verbindung zu einer deutlich detektierten Kante haben. Der dritte Parameter ist die Standardabweichung der Normalverteilung σ. Hierüber wird die Größe der Filtermaske gesteuert. Abbildung 4.17 verdeutlicht exemplarisch die Wirkung von σ auf das Ergebnis der Canny-Filterung des in der Grafik links dargestellten Binärbildes einer gescannten Zielmarke bei konstanten Grenzwerten (0,2 und 0,5).



Binärbild | *σ = 1 Pixel* | *σ = 5 Pixel* | *σ = 15 Pixel* | *σ = 30 Pixel*

Abbildung 4.17: Wirkung des Parameters σ bei der Kantenerkennung mittels Canny-Filter

Als geeignet erweist sich eine Standardabweichung von $\sigma = 15$ Pixel. Bei deutlich geringerer Filtergröße ($\sigma = 1$ bzw. $\sigma = 5$ Pixel) reicht die Glättungswirkung nicht aus. Es werden mehr Kanten als gewünscht identifiziert. Wird die Standardabweichung mit $\sigma = 30$ Pixel zu groß gewählt, wird der innerste dunkelgrau/weiß–Übergang der Zielmarke nicht als Kante detektiert. Das liegt an der gewählten Pixelgröße von (0,5 mm)² im Verhältnis zum Durchmesser der inneren kreisförmigen Fläche der Zielmarke von 28 mm. Für $\sigma = 15$ Pixel werden alle relevanten Kanten erkannt und erfolgreich geglättet. Sie wird im folgenden Arbeitsschritt verwendet, um den gesuchten Mittelpunkt zu schätzen.

Mittelpunktsschätzung und Rücktransformation

Die durch die Kantendetektion gefilterten Linien bilden die kreisförmigen Dunkelgrau-Weiß-Übergänge der Zielmarke nach. Die Linien bestehen aus einzelnen schwarzen Pixeln, die mithilfe der Pixelgröße und ihrer Position im Bild wieder in metrische y,z-Werte umgerechnet werden. In getrennten Kreisausgleichungen wird für jeden Kreis der Mittelpunkt nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate im Gauß-Helmert-Modell geschätzt. Die Kantenpunkte gehen dabei als gleichgenaue und unkorrelierte Beobachtungen ein. Als Ergebnis der Schätzungen werden die geschätzten Mittelpunkte mit den zugehörigen Kovarianzmatrizen ausgegeben:

$$\hat{\mathbf{x}}_{M_i} = \begin{bmatrix} \hat{y}_{M_i} \\ \hat{z}_{M_i} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{M_i}\hat{\mathbf{x}}_{M_i}} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}^2_{y_{M_i}} & \hat{\sigma}_{y_{M_i} z_{M_i}} \\ \hat{\sigma}_{y_{M_i} z_{M_i}} & \hat{\sigma}^2_{z_{M_i}} \end{bmatrix}, \quad i = 1,2,3,4\,. \tag{4.12}$$

Die Kreisradien werden als Parameter berechnet, aber für die weitere Auswertung nicht benötigt.

Mit den Ergebnissen der einzelnen Kreisausgleichungen als Beobachtungen wird durch eine gewichtete Mittelbildung ein gemeinsamer Mittelpunkt im Gauß-Markov-Modell berechnet:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{M_1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{M_2} \\ \hat{\mathbf{x}}_{M_3} \\ \hat{\mathbf{x}}_{M_4} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{ll}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{M_1}\hat{\mathbf{x}}_{M_1}} & & & \\ & \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{M_2}\hat{\mathbf{x}}_{M_2}} & & \\ & & \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{M_3}\hat{\mathbf{x}}_{M_3}} & \\ & & & \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{M_4}\hat{\mathbf{x}}_{M_4}} \end{bmatrix}, \ \mathbf{A} = \frac{1}{4}\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{2\times2} \\ \mathbf{I}_{2\times2} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{2\times2} \end{bmatrix} \Rightarrow \hat{\mathbf{x}}_M, \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_M\hat{\mathbf{x}}_M}\,. \tag{4.13}$$

Im Anschluss an die 2D-Mittelpunktsschätzung erfolgt eine Rücktransformation in kartesische Raumkoordinaten. Hierzu wird die Rotationsmatrix aus Formel (4.10) verwendet:

$$\hat{\mathbf{x}}_K = \mathbf{R}_E^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\mathbf{x}}_M \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_K\hat{\mathbf{x}}_K} = \mathbf{R}_E^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_M\hat{\mathbf{x}}_M} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}_E\,. \tag{4.14}$$

Unter Berücksichtigung des vorab abgezogenen Schwerpunkts stellt $\hat{\mathbf{x}}_K$ den gesuchten Mittelpunkt der Zielmarke und $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_K\hat{\mathbf{x}}_K}$ die entsprechende Kovarianzmatrix dar. Der vorgestellte Algorithmus wird zu Anfang dieses Kapitels als halbautomatisch bezeichnet, da der Näherungswert für den Mittelpunkt manuell in der gescannten Punktwolke gemessen und der Schwellwert zur Binarisierung von der auswertenden Person justiert werden muss. Alle weiteren Auswerteschritte verlaufen automatisiert.

Praxistests

Die geschätzte Kovarianzmatrix des ermittelten Mittelpunkts kann als Maß für die innere Genauigkeit des Auswerteprozesses interpretiert werden. Für das in Abbildung 4.17 gezeigte Beispiel liegt die Distanz von Scanner zur Zielmarke bei 110 m. Der Punktabstand auf der Zielmarke beträgt bei dieser Entfernung und maximaler Scan-Auflösung ca. 3 mm. Die Standardabweichungen für den geschätzten Mittelpunkt sind kleiner als 0,3 mm in den drei Koordinatenrichtungen.

Um die berechnete Genauigkeit der Auswertung zu überprüfen, wurden neben den in Kapitel 4.1 beschriebenen Untersuchungen zwei weitere Versuche durchgeführt. Mit dem ersten Versuch sollte getestet werden, ob die entwickelten Zielmarken dem anfangs formulierten Anspruch der Austauschbarkeit genügen. Hierzu wurden nacheinander fünf Exemplare der Zielmarke in Zwangszentrierung gescannt. Die Entfernung bei der Messung betrug 67 m, die Scan-Auflösung wurde mit 3 mm am Objekt gewählt, was der maximalen Auflösung bei einer Entfernung von 100 m entspricht. Tabelle 4.2 zeigt die Abweichungen der Mittelpunktsbestimmung für die einzelnen Zielmarken von ihrem Mittelwert in den drei Koordinatenrichtungen. Die Abweichungen liegen im geforderten Genauigkeitsbereich.

Tabelle 4.2: Versuch zur Austauschbarkeit der Zielmarken

Zielmarke	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
Z1	-0,3	-0,3	0,2
Z3	0,2	-0,3	0,1
Z4	-0,1	0,3	-0,1
Z5	0,3	0,7	-0,4
Z6	-0,2	-0,5	0,3

Durch den zweiten Versuch sollte getestet werden, inwiefern kleine Verschiebungen der Zielmarke durch das Auswerteverfahren aufgedeckt werden. Hierzu wurde der gleiche Versuchsaufbau wie oben gewählt. Es wurde mit einer Zielmarke gearbeitet, die auf einem Kreuzschlitten platziert wurde. Mit dem Kreuzschlitten wurde das Zielzeichen in 2 mm-Schritten in und quer zur Zielrichtung des Scanners im Bereich von -14 bis +14 mm verschoben.

Tabelle 4.3: Versuch zum Auflösevermögen des Auswerteverfahrens, alle Werte in [mm]

In Zielrichtung				Quer zur Zielrichtung			
Δx	**x**	y	z	Δy	x	**y**	z
-14	-14,0	0,2	0,0	-14	0,0	13,5	1,0
-12	-11,8	0,1	-0,3	-12	-0,3	11,6	1,1
-10	-9,8	0,1	-0,1	-10	-0,6	9,7	0,7
-8	-8,2	0,0	0,3	-8	-0,1	7,6	0,7
-6	-6,1	0,0	0,7	-6	0,0	5,8	-0,9
-4	-4,5	0,1	0,0	-4	-0,3	3,8	-0,3
-2	-2,9	-0,2	0,4	-2	0,3	1,9	0,1
0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
2	2,4	-0,2	-0,1	2	-0,6	-2,3	-0,2
4	4,3	-0,2	0,2	4	0,0	-4,2	0,2
6	5,7	-0,1	0,0	6	-0,1	-6,1	-0,4
8	8,0	-0,1	0,5	8	-0,5	-8,2	0,3
10	9,2	0,0	0,3	10	-0,8	-10,1	0,0
12	12,2	-0,1	0,0	12	-0,2	-12,2	-0,2
14	14,8	0,0	0,2	14	0,2	-14,1	-0,5

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Die maximale Abweichung vom Sollwert beträgt 0,8 mm. Anhand der Streuung der Koordinatenwerte, die nicht von der Verschiebung betroffen sind, kann man das Streuverhalten des Systems TLS mit den in Abbildung 2.18 zusammengefassten Modulen Scanner, Atmosphäre, Objekt (Zielmarke) und Software für diesen Versuch abschätzen. Berücksichtigt man diesen Gesichtspunkt bei der Interpretation der Ergebnisse beider Versuche, kommt man zu dem Ergebnis, dass die vorgestellte Zielmarke und deren Auswertung für die hochgenaue Registrierung von Laserscans geeignet ist.

4.2.3 Transformationsansatz

Die Registrierung der Punktwolken für die hier vorgestellte Methodik zur Überwachung flächiger Objekte erfolgt über identische Punkte. Hierzu werden dauerhaft vermarkte Punkte eines geodätischen Überwachungsnetzes genutzt, deren geometrische Stabilität durch eine Deformationsanalyse nachgewiesen wurde (s. Kapitel 4.2.1). Die Ableitung der identischen Punkte aus Scanner-Messungen erfolgt mittels der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Zielmarken. Im Folgenden wird ein geeigneter Transformationsansatz beschrieben, um die gemessenen Punktwolken des zu überwachenden Objekts im geodätischen Überwachungsnetz zu referenzieren. Neben der Orientierung der Scans wird dabei das örtliche Referenznetz genutzt, um die Qualität der Messelemente zu überprüfen und gegebenenfalls durch die Einführung von Kalibrierparametern zu verbessern.

Üblicherweise gehen für die Registrierung von Punktwolken über identische Punkte die kartesischen Koordinaten der Zielmarken im jeweiligen Scanner-System als Beobachtungen in die Transformation ein. Für die Schätzung der Transformationsparameter nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate werden die Differenzen zwischen den Scanner-Koordinaten und den Koordinaten des Zielsystems unabhängig von der räumlichen Distanz zwischen Scanner und Zielpunkt in ihrer Quadratsumme minimiert. Dieser Ansatz bildet das funktionale Modell der Messung nicht exakt ab, da Laserscanner Polarelemente messen, die anschließend intern in kartesische Koordinaten umgerechnet werden. Aus diesem Grund werden für den hier vorgestellten Transformationsansatz die polaren Messelemente Raumstrecke, Horizontalwinkel und Vertikalwinkel des Laserscanners verwendet. Diese Vorgehensweise verspricht eine realistischere Gewichtung der Beobachtungen und bietet zudem die Möglichkeit, Kalibrierparameter für die gemessenen Größen in die Schätzung einzuführen.

Die Schätzung der Transformationsparameter ist als Bündelausgleichung konzipiert, d.h. die gescannten Punktwolken werden gemeinsam registriert, sodass für alle Messungen einer Epoche identische Kalibrierparameter geschätzt werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass die geschätzten Parameter für die Messdauer einer Epoche stabil sind. Erfahrungswerte zeigen, dass diese Annahme realistisch ist, solange die Messdauer einen Tag nicht überschreitet, zwischenzeitlich keine längeren Transporte notwendig sind und/oder große Temperaturschwankungen auftreten. Die Genauigkeit der eingehenden Beobachtungen wird iterativ mittels Varianzkomponentenschätzung bestimmt. Die Signifikanz der Kalibrierparameter wird getestet. Der entwickelte Ansatz nutzt die Arbeiten von RIETDORF 2005, der Polarelemente und Kalibrierparameter in eine Registrierung über Raumebenen einführt, sowie SCHNEIDER & SCHWALBE 2008, die Polarelemente und Kalibrierparameter in einer Bündelausgleichung zusammen mit bildhaften Daten verwenden.

Bei den vorab durchgeführten Untersuchungen des Scanners konnten teilweise aufgetretene systematische Abweichungen in der Winkelmessung nicht verifiziert werden. Daher werden hier ausschließlich Parameter zur Korrektur der Streckenmessung in das Modell eingeführt. Eine Erweiterung um weitere Parameter ist jedoch möglich.

Für die Schätzung der Transformationsparameter wird das in Kapitel 2.2.1 vorgestellte Gauß-Helmert-Modell verwendet. Es bietet die Möglichkeit, die Zielkoordinaten und die Scanner-Messungen als Beobachtungen und somit als stochastische Größen einzuführen. Der Transformationsansatz wird entsprechend Formel (2.10), aber zunächst ohne Maßstabsfaktor formuliert. Dabei identifiziert i den jeweiligen Zielpunkt und j den aktuellen Scanner-Standpunkt.

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_j^T(\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{0_j}) - \mathbf{x}_{j,i} \quad \text{mit } i = 1,2,...,n \text{ und } j = 1,2,...,m\,. \tag{4.15}$$

Werden für den Zielpunkt im Scannersystem $\mathbf{x}_{j,i}$ die kartesischen Koordinaten durch die polaren Messelemente Schrägdistanz d, Richtungswinkel φ und Vertikalwinkel θ ersetzt, erhält man:

$$\mathbf{x}_{j,i} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{j,i} = \begin{bmatrix} d\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi \\ d\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi \\ d\cdot\cos\theta \end{bmatrix}_{j,i}. \tag{4.16}$$

Die Einführung von Nullpunktfehler k_0 und Maßstabsfaktor m zur Korrektion der Streckenmessung führt zu folgenden Bedingungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
f_{j,i_1}(\mathbf{l},\mathbf{x}): 0 &= r_{11_j}(X_i - X_{0_j}) + r_{21_j}(Y_i - Y_{0_j}) + r_{31_j}(Z_i - Z_{0_j}) - (k_0 + m\cdot d_{j,i})\sin\theta_{j,i}\cos\varphi_{j,i}\\
f_{j,i_2}(\mathbf{l},\mathbf{x}): 0 &= r_{12_j}(X_i - X_{0_j}) + r_{22_j}(Y_i - Y_{0_j}) + r_{32_j}(Z_i - Z_{0_j}) - (k_0 + m\cdot d_{j,i})\sin\theta_{j,i}\sin\varphi_{j,i}\\
f_{j,i_3}(\mathbf{l},\mathbf{x}): 0 &= r_{13_j}(X_i - X_{0_j}) + r_{23_j}(Y_i - Y_{0_j}) + r_{33_j}(Z_i - Z_{0_j}) - (k_0 + m\cdot d_{j,i})\cos\theta_{j,i}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

mit dem Parametervektor:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} m \\ k_0 \\ X_{0_1} \\ Y_{0_1} \\ Z_{0_1} \\ \vdots \\ Z_{0_m} \\ r_{x_1} \\ r_{y_1} \\ r_{z_1} \\ \vdots \\ r_{z_m} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{für alle Standpunkte} \\ \\ \text{Translationen} \\ \text{pro} \\ \text{Standpunkt} \\ \\ \\ \text{Rotationswinkel} \\ \text{pro} \\ \text{Standpunkt} \end{array}$$

und den Beobachtungen:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \\ d_{1,1} \\ \vdots \\ d_{m,n} \\ \varphi_{1,1} \\ \vdots \\ \varphi_{m,n} \\ \theta_{1,1} \\ \vdots \\ \theta_{m,n} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{kartesische Koordinaten} \\ \text{der n} \\ \text{Punkte des} \\ \text{Zielsystems} \\ \\ \\ \\ \text{gemessene Polarkoordinaten} \\ \text{auf m Standpunkten} \\ \text{zu n Zielpunkten} \end{array}$$

Das stochastische Modell enthält die Varianzen und Kovarianzen der Beobachtungen, zusammengefasst in der Kovarianzmatrix $\mathbf{\Sigma}_{ll}$ als Produkt der Kofaktormatrix $\mathbf{Q}_{ll}$ und des a priori Varianzfaktors σ_0^2, sowie die Gewichtsmatrix $\mathbf{P}$. Die

Matrizen besitzen eine Blockstruktur, aufgebaut aus Submatrizen für die einzelnen Beobachtungsgruppen, die untereinander als nicht korreliert eingeführt werden:

$$\mathbf{\Sigma_{ll}} = \sigma_0^2 \cdot \mathbf{Q_{ll}} = \sigma_0^2 \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q_{XX}} & & & \\ & \mathbf{Q}_{dd} & & \\ & & \mathbf{Q}_{\varphi\varphi} & \\ & & & \mathbf{Q}_{\theta\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \mathbf{Q_{ll}}^{-1}. \tag{4.18}$$

Die Kofaktormatrix der Koordinaten des Zielsystems $\mathbf{Q_{XX}}$ ist voll besetzt. Sie entspricht der Kofaktormatrix der geschätzten Parameter $\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}$, die bei der Netzausgleichung der Zielpunkte berechnet wird (s. Kapitel 4.2.1). Die Kofaktormatrizen der polaren Beobachtungselemente sind jeweils nur auf der Hauptdiagonalen besetzt und werden zunächst nach den Herstellerangaben des Scanners quantifiziert.

Varianzkomponentenschätzung

Eine empirische Anpassung des Genauigkeitsniveaus entsprechend der tatsächlichen Streuung der Beobachtungen erfolgt im Rahmen einer Varianzkomponentenschätzung nach dem Verfahren der reihenden Varianzkomponenten (s. NIEMEIER 2002). Dabei wird für jede Beobachtungsgruppe $\mathbf{l}_k$ mit n_k Elementen ein eigener Varianzfaktor $\hat{\sigma}_{0_k}^2$ berechnet:

$$\hat{\sigma}_{0_k}^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}_k{}^T \mathbf{P}_k \hat{\mathbf{v}}_k}{r_k}, \quad \text{mit der Gruppenredundanz } r_k = \sum_{i=1}^{n_k} q_{\hat{v}_i\hat{v}_i} \cdot p_{k_i k_i} \;. \tag{4.19}$$

Die Berechnung verläuft iterativ. Die à priori Varianzfaktoren der einzelnen Beobachtungsgruppen werden so lange variiert, bis sie sich dem allgemein gewählten Varianzfaktor σ_0^2 annähern. Das stochastische Modell der Beobachtungen wird entsprechend angepasst:

$$\mathbf{\Sigma_{ll}} = \begin{bmatrix} \sigma_{0_\mathbf{X}}^2 \cdot \mathbf{Q_{XX}} & & & \\ & \sigma_{0_d}^2 \cdot \mathbf{Q}_{dd} & & \\ & & \sigma_{0_\varphi}^2 \cdot \mathbf{Q}_{\varphi\varphi} & \\ & & & \sigma_{0_\theta}^2 \cdot \mathbf{Q}_{\theta\theta} \end{bmatrix}. \tag{4.20}$$

Parallel dazu werden die standardisierten Verbesserungen jeder Beobachtung auf Signifikanz getestet, damit die Varianzkomponentenschätzung nicht durch grob falsche Beobachtungen verzerrt wird. Näheres hierzu findet sich ebenfalls bei NIEMEIER 2002.

Signifikanztest auf Modellerweiterung

Die in Formel (4.17) in das funktionale Modell eingeführten zusätzlichen Parameter Maßstab und Nullpunktfehler werden zunächst bei der Bündelausgleichung mitgeschätzt. Anschließend soll die Frage beantwortet werden, ob sie einen signifikanten Beitrag zur Minimierung der gewichteten Verbesserungsquadratsumme leisten. Nur dann ist es statistisch begründet, sie in der aktuellen Epoche zu verwenden. Zur Beantwortung eignet sich ein Signifikanztest auf Modellerweiterung, wie er beispielsweise von NIEMEIER 2002 beschrieben wird. Dabei wird anhand der Verbesserungsquadratsummen im Ausgangs- und im erweiterten Modell getestet, ob eine Erweiterung um zusätzliche Parameter, die Residuenquadratsumme signifikant reduziert.

Die Testgröße T des Signifikanztests auf Modellerweiterung folgt unter der Nullhypothese H_0 der Fisher-Verteilung mit p (Anz. Zusatzparameter) und r-p Freiheitsgraden (r: Redundanz im Ausgangsmodell) und wird wie folgt gebildet:

$$T = \frac{\Omega_R / p}{\Omega_A / (r-p)} \sim F_{p,r-p} \,|\, H_0 \;. \tag{4.21}$$

Dabei ist:

$\Omega = \hat{v}^T P \hat{v}$ die Verbesserungsquadratsumme im Ausgangsmodell, (4.22)

$\Omega_A = \hat{v}^T P \hat{v}$ die Verbesserungsquadratsumme im erweiterten Modell und (4.23)

$$\Omega_R = \Omega - \Omega_A \quad \text{die Differenz der Verbesserungsquadratsummen der beiden Modelle.} \tag{4.24}$$

Bei der Teststrategie für die Berücksichtigung von Maßstab und Nullpunktfehler werden folgende Fälle unterschieden:

A: Die Erweiterung um m. Wenn Fall A signifikant ist, folgt Fall B: Die zusätzliche Erweiterung von A um k_0,

C: Die Erweiterung um k_0. Wenn Fall C signifikant ist, folgt Fall D: Die zusätzliche Erweiterung von C um m.

Die Entscheidung, ob und welche Erweiterungen eingeführt werden, folgt den Regeln 1. – 6.:

1. m und k_0 werden eingeführt, falls B und D signifikant sind.
2. m und k_0 werden eingeführt, falls B (bzw. D) signifikant ist und C (bzw. A) nicht signifikant ist.
3. Nur m wird eingeführt, wenn A signifikant ist sowie B und D nicht gleichzeitig signifikant sind.
4. Nur k_0 wird eingeführt, wenn C signifikant ist sowie B und D nicht gleichzeitig signifikant sind.
5. Treffen 2. und 3. zu, entscheidet die größere Testgröße, ob m oder k_0 eingeführt wird.
6. Sind weder A noch C signifikant, wird das Modell nicht erweitert.

Damit ist der Transformationsansatz vollständig beschrieben. Zusammen mit den Ausführungen zur Datumsverfügung und den Zielmarken ist der für die Bauwerksüberwachung mit TLS entscheidende Punkt Registrierung umfassend behandelt. Das folgende Kapitel widmet sich den Entwicklungen zur Modellierung des Bauwerks und der blockweisen Filterung zur Ableitung reproduzierbarer Punkte für einen Epochenvergleich.

4.3 Objektmodell, Blockansatz und Filterung

Die hier vorgestellte Methode zur absoluten Bauwerksüberwachung mit TLS ist für epochenweise Messungen mit einem minimalen zeitlichen Abstand von ca. sechs Stunden konzipiert. Die einzelnen Prozesse sind im Flussdiagramm in Abbildung 4.1 zusammengestellt. Die auf die Registrierung der Punktwolken folgenden Schritte werden in diesem Abschnitt ausführlich betrachtet.

Für jedes neue Objekt fallen einmalig folgende Arbeitsschritte an:

- Die Berechnung eines im geodätischen Datum des Bauwerks definierten räumlichen Referenzrahmens, abgeleitet aus einer geeigneten Modellierung des Bauwerks sowie die Unterteilung des Referenzrahmens in Raumelemente (Blöcke) geeigneter Größe. Näheres dazu folgt in Kapitel 4.3.1.

Pro Epoche sind folgende Arbeitsschritte vorgesehen:

- Die Zuordnung der gescannten und registrierten Punkte zu den Blöcken und anschließende Filterung durch Schätzen einer bestanpassenden Ebene. Die Ableitung eines repräsentativen Punktes pro Blockelement und Scanner-Standpunkt. Näheres dazu folgt in Kapitel 4.3.2.
- Gewichtete Mittelbildung und Abschätzung der Genauigkeit für die blockweise abgeleiteten Größen, die als Eingangsgrößen für einen Epochenvergleich verwendet werden können. Näheres dazu folgt in Kapitel 4.3.3.

4.3.1 Modellierung und Blockbildung

Ziel der hier beschriebenen Arbeitsschritte ist ein im geodätischen Datum definierter räumlicher Referenzrahmen, der in Raumelemente (Blöcke) unterteilt wird. Als Blöcke werden hier Oberflächenelemente des modellierten Bauwerks verstanden, die eine räumliche Ausdehnung entlang der Flächennormalen aufweisen. Die räumliche Ausdehnung wird dabei so groß gewählt, dass sich Abweichungen des realen Objekts vom gewählten Modell sowie maximal denkbare Bauwerksdeformationen innerhalb dieser Blöcke bewegen. Die Unterteilung des Modells in solche Raumelemente stellt eine Erweiterung der Ansätze von LINDENBERGH & PFEIFER 2005 dar, die mit Oberflächenelementen ohne räumliche Komponente arbeiten. Die Unterteilung in Raumelemente bietet folgende Vorteile:

- Die Ableitung reproduzierbarer Objektpunkte für einen Epochenvergleich aus Laserscannerdaten.
- Die Steigerung der inneren Genauigkeit des abgeleiteten Punktes durch lokale Filterung mit einer bestanpassenden Ebene.
- Eine hohe räumliche Diskretisierung des Bauwerks ohne die Verwendung von Zielmarken als Objektpunkte. Dadurch erhöht sich die Aussagekraft der Überwachungsergebnisse bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten für Vermarkung und Pflege der Punkte.
- Lokal abgeleitete Punkte können für weitere Untersuchungen, z. B. hinsichtlich Biegelinien, etc. zusammengeführt werden.

Die zur Berechnung des Referenzrahmens und zur Blockbildung benutzte Modellierung zielt dabei nicht auf eine detailgetreue Nachbildung des Objekts, wie sie beispielsweise für eine realitätsnahe Visualisierung (z.B. für 3D-Stadtmodelle) oder eine exakte mathematische Nachbildung mit kleinstmöglichen Differenzen zum realen Objekt (z.B. für eine Flächenrückführung in der industriellen Entwicklung), erforderlich wäre. Für die Blockbildung ist es vielmehr wichtig die „Grundform" des Objekts abzubilden. Aus diesem Grund konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die Verwendung quadratischer Formen, mit denen eine Vielzahl realer, flächiger Objekte in erster Näherung modelliert werden können. Die mathematischen Grundlagen hierzu wurden in Kapitel 2.3.2 behandelt. Dort ist auch ein Algorithmus erläutert, mit dem die bestanpassende quadratische Form für ein reales Objekt ermittelt werden kann. Die Orientierung und Lagerung der für ein zu überwachendes Objekt geschätzten Form erfolgt im Datum des lokalen geodätischen Überwachungsnetzes. Somit steht ein mathematisch definierter, stabiler Referenzrahmen zur Verfügung.

In Abbildung 4.18 ist ein Beispiel für ein als quadratische Form berechnetes Flächenstück dargestellt. In diesem Fall handelt es sich um das Oberflächenelement einer Kugel. In der Praxis könnte es beispielsweise einen Ausschnitt der Oberfläche eines zu überwachenden kugelförmigen Gasdruckbehälters repräsentieren. Die Fläche wird von einem ihrer Krümmung angepassten Blockgitter umschlossen. Verformt sich das Objekt aufgrund einwirkender Kräfte, bleibt das mathematische definierte Blockgitter geometrisch stabil, aber die Objektoberfläche bewegt sich innerhalb des Rahmens. Mit terrestrischem Laserscanning können mit hoher räumlicher Auflösung diskrete Punkte auf der Objektoberfläche im örtlichen geodätischen Datum gemessen werden. Hierzu wird die Oberfläche in einem nicht reproduzierbaren Raster abgetastet. Durch die Blockbildung gelingt es, reproduzierbare Punkte abzuleiten, die in einem Epochenvergleich analysiert werden. Somit können absolute Verformungen des Objekts nachgewiesen werden. Eine Filterung der gemessenen Punkte erfolgt blockweise durch lokal bestanpassende Raumebenen. D.h. die Diskretisierung sollte so engmaschig sein, dass die lineare Approximation ausreicht.

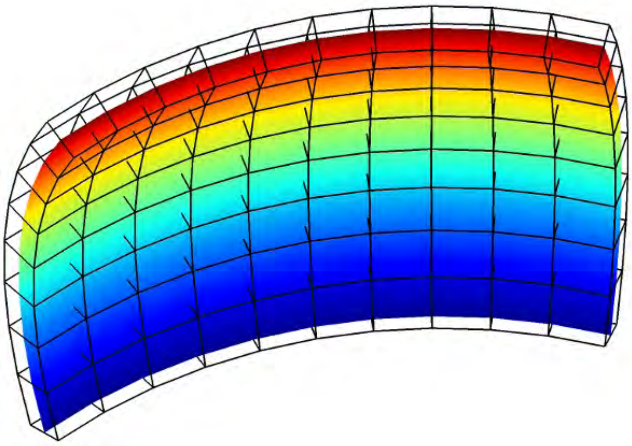


Abbildung 4.18: Beispiel für eine modellierte Fläche mit umschließenden Blockgitter-Rahmen

Um die Raumelemente zu erzeugen, kann die mathematische Definition der modellierten Fläche verwendet werden. Die Blöcke lassen sich beispielsweise aus der Parameterdarstellung der Fläche ableiten:

$$\mathbf{x}(u,v) = \begin{pmatrix} x(u,v) \\ y(u,v) \\ z(u,v) \end{pmatrix}. \qquad (4.25)$$

Eine Erhöhung der Flächenparameter u und v um feste Schrittweiten führt zu den Parametervektoren:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^T &= [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_a], \quad \text{mit}: u_{p+1} = u_p + \Delta u,\ p = 1,2,\dots,a \\ \mathbf{v}^T &= [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_b], \quad \text{mit}: v_{q+1} = v_q + \Delta v,\ q = 1,2,\dots,b \end{aligned}, \qquad (4.26)$$

welche das Blockgitter als $a \times b$ Oberflächenraster definieren. Die räumliche Komponente des Blockgitters wird durch zweimaliges Skalieren bzw. Verschieben des Rasters in Richtung der Flächennormalen berechnet. Anschaulich lässt sich dies anhand der in Abbildung 4.18 dargestellten Kugeloberfläche erläutern. Die Parameterdarstellung der Kugel lautet:

$$\mathbf{x}(\theta,\varphi) = \begin{pmatrix} r\sin\theta\cos\varphi \\ r\sin\theta\sin\varphi \\ r\cos\theta \end{pmatrix}. \qquad (4.27)$$

Durch $r_1 = r + \Delta r$ und $r_2 = r - \Delta r$ sowie den Parametervektoren $\boldsymbol{\theta}$ und $\boldsymbol{\varphi}$ lassen sich ein „vorderes" und ein „hinteres" Raster berechnen. Werden die beiden Raster an ihren Knotenpunkten miteinander verbunden, erhält man das dargestellte Blockgitter, bestehend aus $a \times b$ Raumelementen B_{pq}. Entsprechend kann das Blockgitter für andere quadratische Formen berechnet werden.

4.3.2 Blockweise Filterung

Liegt das mathematisch definierte Blockgitter vor, können die gemessenen Laserdaten epochenweise ausgewertet werden. Zunächst werden pro Scanner-Standpunkt die registrierten Laserpunkte den Blöcken zugeordnet. Anschließend werden die zugeordneten Punkte blockweise gefiltert. Hierzu wird eine bestanpassende Ebene berechnet und ein Punkt pro Raumelement abgeleitet. Dieses Vorgehen bietet zwei wesentliche Vorteile:

- Der abgeleitete Punkt ist im Gegensatz zu den gemessenen Laserpunkten im Rahmen der Auswertegenauigkeit reproduzierbar und somit als Eingangsgröße für einen Epochenvergleich geeignet.
- Die Filterung steigert die innere Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten. Die Varianzen des abgeleiteten Punktes sind deutlich kleiner als die durchschnittliche Streuung der Punkte um die geschätzte Ebene.

Für die Ableitung eines repräsentativen Punktes pro Raumelement sind verschiedene Ansätze denkbar. Eine Möglichkeit ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Der linke Teil der Grafik zeigt in blau die gemessenen Laserpunkte, in grau die geschätzte Ebene und als schwarzen Punkt den Mittelpunkt des Raumelements berechnet als Schwerpunkt seiner acht Ecken. Im rechten Teil der Grafik wird der Schwerpunkt in Richtung des Normalenvektors der geschätzten Ebene auf diese abgebildet. Der auf diese Art berechnete Punkt ist in rot dargestellt. Er ist der gesuchte repräsentative Punkt für diesen Block und die gemessenen Laserpunkte. Eine Deformation des Bauwerks in Richtung seiner Flächennormalen bewirkt eine entsprechende Bewegung der Raumebene innerhalb des Blockes und somit eine Verschiebung des roten Punktes.

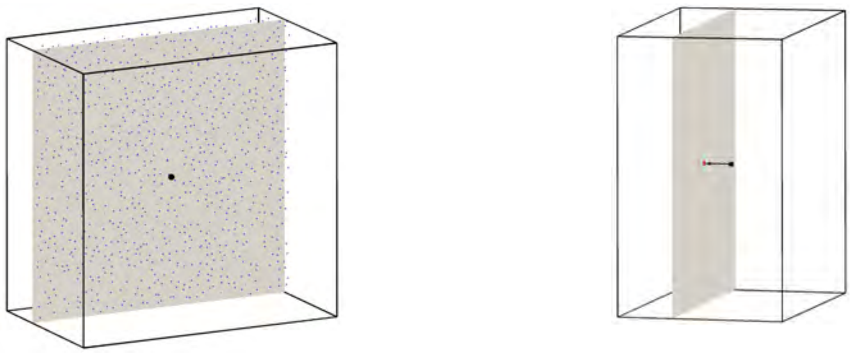


Abbildung 4.19: Blockweise Ebenenschätzung und Ableitung eines repräsentativen Punktes

In Formeln ausgedrückt stellt sich der Auswertevorgang für die h_{pq} gemessenen und registrierten Laserpunkte $\mathbf{x}_{pq}$ des Blockes B_{pq} wie folgt dar. Die Raumebene E wird nach dem in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Algorithmus geschätzt. Sie ist durch ihren Normalenvektor $\mathbf{n}_{pq}$ und den Abstandsparameter d_{pq} definiert (aus Gründen der Anschaulichkeit wird in den Formeln auf die Verwendung der Indizes p und q zur Identifizierung des Raumelements verzichtet):

$$\hat{\mathbf{n}}^T \cdot \mathbf{x}_t + \hat{d} = 0 \quad \text{mit}: \hat{\mathbf{n}}^T = \begin{bmatrix} \hat{n}_x & \hat{n}_y & \hat{n}_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_t^T = \begin{bmatrix} x_t & y_t & z_t \end{bmatrix}, t = 1, 2, \ldots, h \tag{4.28}$$

Ihre Kovarianzmatrix enthält die stochastischen Informationen zu den geschätzten Parametern:

$$\hat{\mathbf{\Sigma}}_{\hat{E}\hat{E}} = \hat{\sigma}_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{n}}\hat{\mathbf{n}}} & \\ & q_{\hat{d}\hat{d}} \end{bmatrix}. \tag{4.29}$$

Die Abbildung des Schwerpunkts $\mathbf{x}_S$ des Raumelements auf die geschätzte Ebene als Lotfußpunkt führt zum gesuchten Punkt $\mathbf{x}_B$:

$$\hat{\mathbf{x}}_B = \mathbf{x}_S + \left(\hat{d} - \hat{\mathbf{n}}^T \mathbf{x}_S\right)\hat{\mathbf{n}}, \text{ mit } |\hat{\mathbf{n}}| = 1 \tag{4.30}$$

Die Genauigkeitsabschätzung für $\hat{\mathbf{x}}_B$ erfolgt mittels Varianzfortpflanzung. Hierzu wird die Gleichung in Formel (4.30) partiell nach den Elementen des Normalenvektors und dem Abstandsparameter $\hat{d}$ abgeleitet. Die Differentialquotienen werden in der Matrix **F** zusammengefasst:

$$\mathbf{F}=\begin{bmatrix} \hat{d}-2\hat{n}_x x_S-\hat{n}_y y_S-\hat{n}_z z_S & -\hat{n}_x y_S & -\hat{n}_x z_S & \hat{n}_x \\ -\hat{n}_y x_S & \hat{d}-\hat{n}_x x_S-2\hat{n}_y y_S-\hat{n}_z z_S & -\hat{n}_y z_S & \hat{n}_y \\ -\hat{n}_z x_S & -\hat{n}_z y_S & \hat{d}-\hat{n}_x x_S-\hat{n}_y y_S-2\hat{n}_z z_S & \hat{n}_z \end{bmatrix}. \tag{4.31}$$

Die Kovarianzmatrix des abgeleiteten Punktes $\hat{\mathbf{x}}_B$ ergibt sich zu:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_B\hat{\mathbf{x}}_B}=\mathbf{F}\cdot\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{E}\hat{E}}\cdot\mathbf{F}^T\,. \tag{4.32}$$

Bei der praktischen Umsetzung des Ansatzes an einem realen Objekt stellt sich die Frage nach der optimalen Blockgröße. Sie leitet sich aus zwei wesentlichen Kriterien ab. Die Raumelemente sollten so groß sein, dass ausreichend Laserpunkte für die Ebenenschätzung und somit zur Steigerung der inneren Genauigkeit der Messung vorhanden sind. Dies hängt neben der Blockgröße auch vom Auflösungsvermögen des verwendeten Scanners und von der Zielweite ab.

Die obere Grenze für die Größe der Raumelemente resultiert aus dem maximal tolerierbaren Modellfehler b, der durch die diskrete Filterung eines mehrfach gekrümmten Objekts mit einer Raumebene entsteht. Wird die Obergrenze für b vorgegeben und ist der minimale Krümmungsradius r des Objekts aus dessen Modellierung bekannt, so lässt sich die maximale Ausdehnung a der Raumelemente in Richtung der Flächenparameter abschätzen. Abbildung 4.20 zeigt den Zusammenhang in einer Schnittdarstellung, sodass die Kugel auf einen Kreisbogen mit dem Radius r und die Raumebene auf eine Gerade mit der Länge a abgebildet wird.

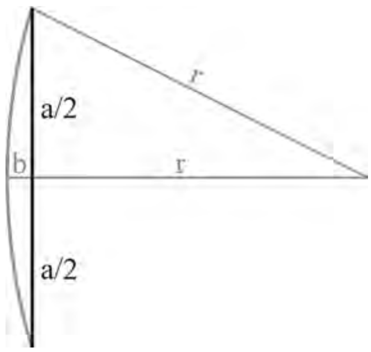


Abbildung 4.20: Zusammenhang zwischen Modellfehler, Krümmungsradius und Blockgröße

Nach dem Satz des Pythagoras folgt:

$$(r-b)^2+\left(a/2\right)^2=r^2\,. \tag{4.33}$$

Aufgelöst nach dem möglichen Modellfehler b ergibt sich:

$$b=r\pm\sqrt{r^2-\tfrac{1}{4}a^2}\,. \tag{4.34}$$

Aus der Geometrie wird deutlich, dass nur die Lösung

$$b=r-\sqrt{r^2-\tfrac{1}{4}a^2} \tag{4.35}$$

ein sinnvolles Ergebnis für den Modellfehler liefert.

Bei einem minimalen Krümmungsradius des Modells von beispielsweise r = 100 m und einem maximal tolerierten Modellfehler von b = 2 mm ergibt sich eine maximale Kantenlänge des Raumelements von a = 125 cm. Die so ermittelte Kantenlänge kann verwendet werden, um die Schrittweiten der Flächenparameter in Formel (4.26) zu bestimmen. Wird als quadratische Form eine Kugel gewählt, stellt Formel (4.35) eine mathematisch exakte Berechnung dar. Für andere gekrümmte Flächen kann sie als ausreichend genaue Abschätzung verwendet werden.

4.3.3 Genauigkeitsabschätzung und gewichtete Mittelbildung

Als Ergebnis der blockweisen Filterung liegt pro Scanner-Standpunkt j (j = 1, 2, …, m) und Raumelement B_{pq} ein abgeleiteter Punkt $\hat{\mathbf{x}}^j_{B_{pq}}$ mit seiner Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}^j_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{pq}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{pq}}}$ als Maß für die innere Genauigkeit, abgeleitet aus der

Messgenauigkeit und der Filterung, im geodätischen Datum des Überwachungsnetzes vor. Um die äußere Genauigkeit des Punktes abzuschätzen, werden im Folgenden die Genauigkeit der Registrierung miteinbezogen sowie eine gewichtete Mittelbildung der Ergebnisse pro Scanner-Standpunkt durchgeführt.

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, werden für jeden Scanner-Standpunkt Transformationsparameter $\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{T}}^{j}$ geschätzt, um für die gemessenen Punkte den Übergang ins geodätische Datum des zu überwachenden Objekts zu berechnen. Ihre Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{T}}}^{j}$ kann als ein Maß für die äußere Genauigkeit der Messungen betrachtet werden. Über Varianzfortpflanzung kann dieser Zusammenhang genutzt werden, um die Genauigkeit der abgeleiteten Punkte $\mathbf{x}_{\mathrm{B}_{pq}}^{j}$ realistischer abzuschätzen. Hierzu wird der funktionale Zusammenhang aufgestellt, der notwendig wäre, um einen abgeleiteten Blockpunkt von einem Scannersystem ins Datum des Überwachungsnetzes zu transformieren.

Dabei wird als Vereinfachung auf die Transformation mit Polarkoordinaten und die Verwendung von Kalibrierparametern für die Streckenmessung verzichtet. Des Weiteren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Indizes p, q und j nicht mitgeführt. Die Transformationsvorschrift lautet dann:

$$f(\hat{\mathbf{x}}) = \hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}}^{*} = \hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}} = \hat{\mathbf{x}}_{0} + \hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}, \text{ mit } \hat{\mathbf{x}}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{\mathrm{BS}} & \hat{y}_{\mathrm{BS}} & \hat{z}_{\mathrm{BS}} & \hat{x}_{0} & \hat{y}_{0} & \hat{z}_{0} & \hat{r}_{x} & \hat{r}_{y} & \hat{r}_{z} \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

Die Kovarianzmatrix für den abgeleiteten Blockpunkt berechnet sich unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Registrierung nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz wie folgt:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}}}^{*} = \mathbf{F} \cdot \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}} & \\ & \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{T}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{T}}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{F}^{\mathrm{T}} . \tag{4.37}$$

Der zunächst unbekannte Blockpunkt im Scanner-System $\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}$ und seine Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}}$ können mithilfe der geschätzten Transformationsparameter berechnet werden. Die Formel für den Punkt lautet:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}} = \hat{\mathbf{R}}^{\mathrm{T}} \left(\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}} - \hat{\mathbf{x}}_{0} \right) . \tag{4.38}$$

Für die Umformung des Blockpunkts in das Scanner-System werden die Transformationsparameter als fehlerfreie Größen betrachtet. So folgt für die Kovarianzmatrix des Blockpunktes im System des Scanner-Standpunkts nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}} = \hat{\mathbf{R}}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}}} \cdot \hat{\mathbf{R}} . \tag{4.39}$$

Bisher noch nicht besetzt ist die Funktionalmatrix **F** in Formel (4.37). Um sie zu füllen, wird die Transformationsvorschrift in Formel (4.36) partiell nach den Elementen von $\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{BS}}$ sowie nach den 6 Transformationsparametern abgeleitet. Das Ergebnis zeigt Formel (4.40):

$$\mathbf{F}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}
\cos\hat{r}_y \cos\hat{r}_z & \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y - \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_z & \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_y + \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_z \\
\cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_z & \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_z + \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z & \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x - \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \\
-\sin\hat{r}_z & \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_x & \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_y \\
1 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 1 \\
0 & \begin{array}{l} \hat{z}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_y + \\ \hat{x}_{\mathrm{BS}} \left(\cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_y + \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_z \right) + \\ \hat{y}_{\mathrm{BS}} \left(-\cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x + \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \right) \end{array} & \begin{array}{l} -\hat{z}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_y + \\ \hat{x}_{\mathrm{BS}} \left(\cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y + \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_z \right) + \\ \hat{y}_{\mathrm{BS}} \left(-\cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_z - \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \right) \end{array} \\
\begin{array}{l} -\hat{z}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y - \hat{x}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_y - \\ \hat{y}_{\mathrm{BS}} \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \end{array} & \begin{array}{l} \hat{x}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y \cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x - \hat{z}_{\mathrm{BS}} \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y + \\ \hat{y}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_z \end{array} & \begin{array}{l} \hat{x}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_y \cos\hat{r}_z - \hat{z}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_y + \\ \hat{y}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \end{array} \\
\hat{y}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y \cos\hat{r}_z - \hat{x}_{\mathrm{BS}} \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_z & \begin{array}{l} \hat{y}_{\mathrm{BS}} \left(\cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y - \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_z \right) + \\ \hat{x}_{\mathrm{BS}} \left(-\cos\hat{r}_x \cos\hat{r}_z - \sin\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \right) \end{array} & \begin{array}{l} \hat{y}_{\mathrm{BS}} \left(\cos\hat{r}_y \cos\hat{r}_y \sin\hat{r}_y + \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_y \right) + \\ \hat{x}_{\mathrm{BS}} \left(\cos\hat{r}_z \sin\hat{r}_x - \cos\hat{r}_x \sin\hat{r}_y \sin\hat{r}_z \right) \end{array}
\end{bmatrix} . \tag{4.40}$$

Somit kann nach Formel (4.37) für jeden abgeleiteten Blockpunkt $\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}_{pq}}^{j}$ die Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}_{pq}}\hat{\mathbf{x}}_{\mathrm{B}_{pq}}}^{j}$ unter Berücksichtigung der inneren und der äußeren Genauigkeit abgeschätzt werden.

Das Messobjekt sollte immer von mehreren Standpunkten aus möglichst flächendeckend gescannt werden. Die überbestimmten Messungen erhöhen die Qualität der Ergebnisse. Hierzu werden die in einem gemeinsamen Ansatz registrierten Punktwolken getrennt ausgewertet, indem für jedes Raumelement pro Scanner-Standpunkt j der repräsentative Punkt abgeleitet wird. Auf diese Weise werden redundante Ergebnisse erzielt, deren Erwartungswert identisch ist. Deshalb ist es zulässig, die Blockpunkte anschließend gewichtet zu mitteln. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht und die Aussagekraft der äußeren Genauigkeit weiter gesteigert.

Die gewichtete Mittelbildung erfolgt für jeden Blockpunkt $\hat{\mathbf{x}}^{j}_{B_{pq}}$ ähnlich wie bei der Zielmarkenerkennung im Gauß-Markov-Modell (s. Kapitel 4.2.2):

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^{1}_{B_{pq}} \\ \hat{\mathbf{x}}^{2}_{B_{pq}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{x}}^{m_{pq}}_{B_{pq}} \end{bmatrix}, \mathbf{\Sigma}_{\mathbf{ll}} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Sigma}^{1}_{\hat{x}_{Bpq}\hat{x}_{B_{pq}}} & & & \\ & \mathbf{\Sigma}^{2}_{\hat{x}_{Bpq}\hat{x}_{B_{pq}}} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{\Sigma}^{m_{pq}}_{\hat{x}_{Bpq}\hat{x}_{B_{pq}}} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \frac{1}{m_{pq}} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3\times 3} \\ \mathbf{I}_{3\times 3} \\ \vdots \\ \mathbf{I}_{3\times 3} \end{bmatrix} \Rightarrow \hat{\mathbf{x}}_{B_{pq}}, \mathbf{\Sigma}_{\hat{x}_{Bpq}\hat{x}_{B_{pq}}} . \tag{4.41}$$

Formel (4.41) zeigt das Ergebnis der Auswertung einer Epoche. Die abgeleiteten Blockpunkte und ihre Kovarianzmatrizen sind die Eingangsgrößen für einen Epochenvergleich.

Der Epochenvergleich kann beispielsweise als zweistufige Deformationsanalyse im Kongruenzmodell durchgeführt werden. Der erste Schritt besteht dabei aus der Datumsfestlegung. Diese wurde in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die so bestimmten Koordinaten der Beobachtungs- und Sicherungspunkte bilden das Referenzsystem für die Registrierung der gescannten Punktwolken. Im zweiten Schritt werden die Koordinatendifferenzen der Blockpunkte zwischen der aktuellen und einer Bezugsepoche auf ihre Verträglichkeit mit den Datumspunkten hin überprüft. Hierzu werden, wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben wurde, alle Blockpunkte sukzessive getestet.

Eine alternative, vereinfachte Methode besteht darin, die Differenzvektoren zwischen den abgeleiteten Punkten zweier Epochen nach Formel (3.6) direkt auf Signifikanz zu testen, ohne Ihre Verträglichkeit mit den Datumspunkten einzubeziehen.

Überlegungen zur Automatisierbarkeit des vorgestellten Ansatzes

In Kapitel 3.2 und zu Beginn von Kapitel 4 wurden vier Fragestellungen bzw. Anforderungen formuliert, die eine Auswertemethode für die Bauwerksüberwachung mit TLS beantworten bzw. erfüllen sollte. Die Frage nach der Automatisierbarkeit der hier vorgestellten Methode wurde als Einzige bisher nicht behandelt. Hierzu wird das Flussdiagramm in Abbildung 4.1 erneut aufgegriffen. Für eine Automatisierung müssen die dort aufgeführten Prozesse betrachtet werden:

- Die Messungen sind nur teilweise automatisierbar. Um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und die äußere Genauigkeit realistisch beurteilen zu können, sind mehrere Scanner-Standpunkte anzustreben. Hierzu sind Umbaumaßnahmen für das Instrument und die Zielzeichen erforderlich. Die Messungen selbst wiederholen sich in jeder Epoche und sind daher automatisierbar. Entsprechendes gilt für die geodätischen Messungen zur Datumsüberprüfung.
- Die 3D-Netzausgleichung sowie die Deformationsanalyse zur Datumsfestlegung sind mit entsprechender Software automatisierbar.
- Die Zielzeichenerkennung ist derzeit nur teilweise automatisiert, könnte aber komplett automatisiert werden.
- Die Registrierung, d.h. die Schätzung der Transformationsparameter, kann bis auf die Sichtung der Restklaffen automatisiert ablaufen. Würden systematische Abweichungen auftreten, sollten gegebenenfalls zusätzliche Parameter in die Schätzung werden. Dieser Schritt ist vorerst nicht automatisierbar. Die anschließende Transformation der Punktwolken ist es hingegen schon.
- Die Auswertung der registrierten Punktwolken bis hin zu den gemittelten Blockpunkten ist vollständig automatisierbar, sobald das Objektmodell und somit das Blockgitter festgelegt wurde.
- Der Vergleich mit den Ergebnissen früherer Epochen im Rahmen einer Deformationsanalyse ist automatisierbar.

Wie aus der obigen Auflistung ersichtlich, sind die einzelnen Prozesse bis auf die Messungen sowie die Analyse der Restklaffen bei der Registrierung und der einmaligen Definition des Blockgitters vollständig automatisierbar. Werden die Prozesse in einer gemeinsamen Software mit einer geeigneten Datenhaltung zusammengeführt, ist die gesamte Auswertung einer Epoche mit den genannten Einschränkungen automatisierbar.

Somit erfüllt die vorgestellte Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS alle anfangs aufgestellten Anforderungen. Das folgende Kapitel befasst sich mit der praktischen Umsetzung des Ansatzes an der Okertalsperre im Harz.

5 Anwendung an der Okertalsperre

In diesem Kapitel werden die Umsetzung des in Kapitel 4 entwickelten Konzeptes beschrieben und dessen Ergebnisse analysiert. Als Messobjekt stand die Okertalsperre im Harz zur Verfügung. Das Bauwerk wird zusammen mit dem bestehenden Überwachungskonzept in Kapitel 5.1 vorgestellt.

Die praktischen Messungen an der Okertalsperre wurden in vier Epochen und einer Testmessung durchgeführt. Sie sind in der folgenden Tabelle mit Bezeichnung, Datum und den eingesetzten Instrumenten zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Messungen an der Okertalsperre

Epoche	Datum	Laserscanner	Tachymeter
Testmessung	21.03.2006	Riegl LMS Z360	-
Epoche 1 (E1)	21.09.2006	Trimble GX 3D	Leica TCA 2003
Epoche 2 (E2)	29./30.11.2006	Trimble GX 3D	Leica TCA 2003
Epoche 3 (E3)	04./05.07.2007	Trimble GX 3D	Leica TCA 2003
Epoche 4 (E4)	12./13.09.2007	Trimble GX 3D	Leica TCA 2003

Kapitel 5.2 befasst sich mit der Modellbildung für die Okertalsperre anhand der Ergebnisse der Testmessung. Hierzu wird als bestanpassende quadratische Form ein Ellipsoid geschätzt und damit ein Blockgittermodell für die weitere Auswertung definiert.

Im anschließenden Kapitel 5.3 werden die tachymetrischen Messungen der Epochen E1 bis E4 ausgewertet. Es wird eine Deformationsanalyse durchgeführt und das geodätische Datum definiert. Dieses Datum bildet die Grundlage für die Registrierung der gemessenen Punktwolke und die weitere Anwendung der zuvor entwickelten Methode für die vier Epochen. Die Ergebnisse der Registrierung und der Auswertung werden abschließend in Kapitel 5.4 ausführlich dargestellt und analysiert.

5.1 Bauwerk und bestehendes Überwachungskonzept

Die Okertalsperre liegt im nördlichen Harz, ca. 15 km südlich von Goslar. Der Bau der Talsperre begann im Jahr 1938. Kriegsbedingt wurden die Arbeiten 1941 unterbrochen und erst im Jahre 1949 wieder aufgenommen. Sieben Jahre später war das Projekt abgeschlossen und der Einstau begann. Das Bauwerk erfüllt mehrere wichtige Funktionen. Es dient dem Hochwasserschutz, der Niedrigwasseraufhöhung, der Energieerzeugung und der Trinkwassergewinnung. Der Betreiber der Talsperre ist die Harzwasserwerke GmbH mit Sitz in Hildesheim.

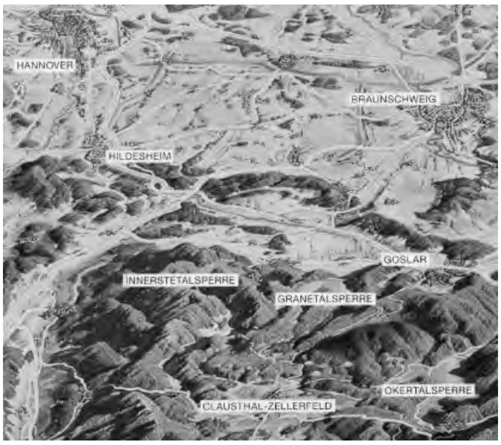
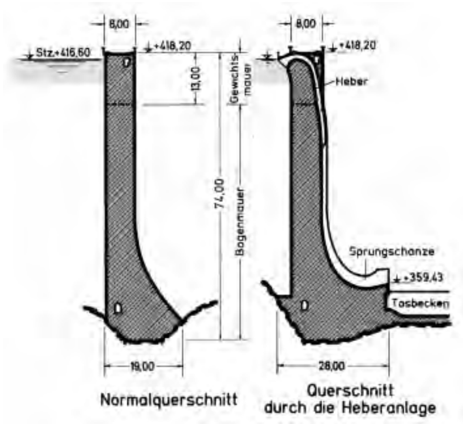


Abbildung 5.1: Die Okertalsperre im Harz (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Eine Besonderheit dieser Talsperre ist die Kombination aus Schwergewichts- und Bogenstaumauer. Der untere Teil konnte bedingt durch steile Felswände als Bogenmauer errichtet werden. Der auftretende Hauptwasserdruck wird in diesem Abschnitt des Bauwerkes durch die Gewölbewirkung auf die anliegenden Talhänge übertragen. Auf den oberen Teil wurde eine Gewichtsmauer aufgesetzt, da die angrenzenden Felswände in dieser Höhe zu flach aufsteigen. Die einwirkenden Kräfte in diesem Teilstück werden ausschließlich durch die massive Bauweise aufgefangen.

Die Kronenlänge der Okertalsperre beträgt 260 m und die Höhe 74 m. Das Staubecken kann einen Speicherinhalt von 47,4 Mio. m^3 mit einer Wasserfläche von 2,25 km² fassen. Im Falle eines zu hohen Staupegels der Talsperre wird das

Wasser aus dem Becken mittels eines Hebers herausgesaugt und über die Sprungschanze in das Tosbecken abgeleitet. Abbildung 5.2 zeigt zwei Querschnitte des Bauwerks sowie ein Foto der Heberanlage mit der Sprungschanze. Zudem ist auf dem Bild unterhalb der Mauerkrone das aus Sicherheitsgründen angebrachte Fangnetz zu erkennen. Beide Besonderheiten des Bauwerks werden im Laufe dieses Kapitels erneut aufgegriffen.



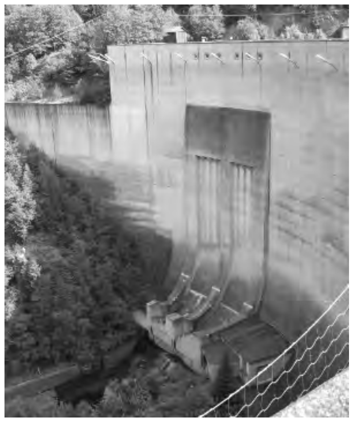


Abbildung 5.2: Querschnitt der Talsperre und Heberanlage (linke Grafik Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Zum Nachweis ihrer Standsicherheit ist die Talsperre mit einem geodätischen Überwachungsnetz für Lage und Höhe, drei Pendelloten sowie zahlreichen Sensoren zur Messung von Fugenbreiten, Sohlendrücken, Mauertemperaturen, Dehnungen und Sickerwasserströmen ausgestattet. Eine ausführliche Zusammenstellung hierzu findet sich bei FAHLAND 2004. Da mit der hier vorgestellten Methode Deformationen des Bauwerks in Richtung seiner lokalen Flächennormalen nachgewiesen werden können, werden ausschließlich das Überwachungsnetz für die Lage und die Lotanlagen näher betrachtet.

Das geodätische Überwachungsnetz für die Lage ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Grafik zeigt die Lage der Punkte sowie die möglichen Sichtverbindungen.

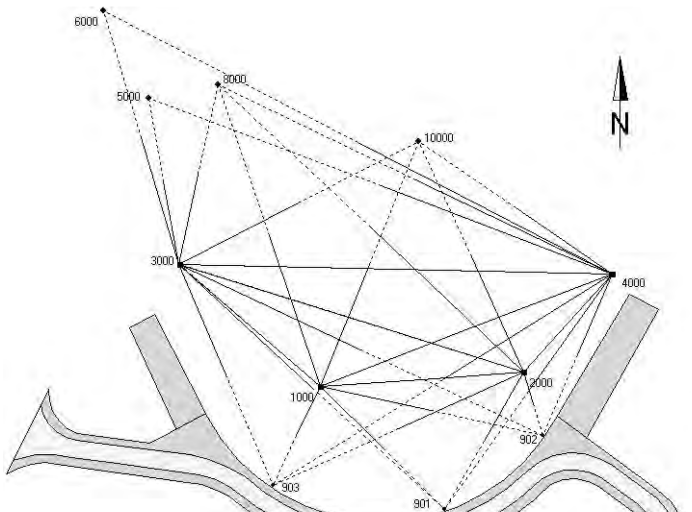


Abbildung 5.3: Geodätisches Überwachungsnetz an der Okertalsperre

Das Netz ist dreistufig aufgebaut. Es besteht aus den Sicherungspunkten 5000 und 6000, die als Bolzen im Fels vermarkt sind, aus den Stützpunkten 1000, 2000, 3000, 4000, 8000 und 10000, die als Vermessungspfeiler vermarkt sind sowie 36 an der Luftseite der Mauer angebrachten Objektpunkten. Die Objektpunkte sind teils als Bolzen, teils als Reflexfolien und nach einer Modernisierung in den letzten Jahren als Miniaturprismen angebracht. Die Punkte werden vom Betreiber als reines Lagenetz (2D-Netz) ausgewertet. Für die Auswertung der Laserscanning-Messungen wird das Lagenetz als dreidimensionales Punktfeld betrachtet. Aus diesem Grund wird für die Auswertung ein eigenes geodätisches Datum definiert (s. Kapitel 5.3). Für die höhenmäßige Überwachung durch die Harzwasserwerke ist das Bauwerk mit Bolzen ausgestattet deren Höhen regelmäßig im Rahmen von Setzungsnivellements überprüft werden.

Die Positionen der Objektpunkte im Datum der Stütz- und Sicherungspunkte werden in der Regel zweimal im Jahr bestimmt. Somit ist eine ausreichende räumliche und zeitliche Diskretisierung des Bauwerks gewährleistet, um die absolute Position und Verformung des Bauwerks nachzuweisen. Eine höhere zeitliche Auflösung der Bewegung wird durch die Kombination mit den relativ messenden Pendelloten erreicht. In der Staumauer befinden sich ein oberer und ein unterer Kontrollgang sowie 11 senkrechte Kontrollschächte, die bei Bedarf mit einem Fahrkorb inspiziert werden können. Drei dieser Kontrollschächte sind mit je einem Pendellot ausgerüstet. Die Lote sind unterhalb der Mauerkrone aufgehängt und können im unteren Kontrollgang manuell abgelesen werden. Abbildung 5.4 zeigt die räumliche Anordnung der Objektpunkte und Pendellote an und in der Talsperre. In Rot sind die Objektpunkte dargestellt. Dabei werden durch Quadrate die Punkte symbolisiert, die als Reflexfolie bzw. inzwischen teilweise als Miniaturprismen vermarkt sind. Die als Bolzen vermarkten Punkte (Nummern 100, 200, …, 800) werden durch Kreise symbolisiert. Ihre Position wird durch räumliche Vorwärtsschnitte ermittelt.

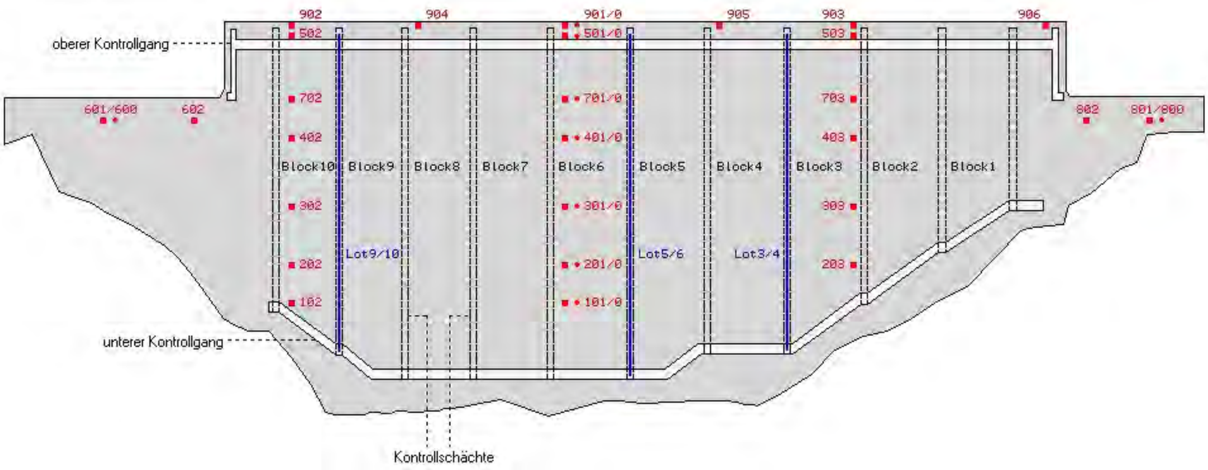


Abbildung 5.4: Lage der Objektpunkte und Lote

Die Messwerte der Lote werden wöchentlich ermittelt. Hierzu wird der Schattenwurf des Lotdrahts auf einem senkrecht zur Mauerachse angebrachten Maßstabs abgelesen, dessen Skala in Richtung Mauer-Luftseite ansteigt. Dadurch werden die Bewegungen des Aufhängepunktes relativ zur Ablesestelle bestimmt. In Abbildung 5.5 sind in Rot die wöchentlichen Messwerte seit 1997 für das in Mauermitte oben angebrachte Lot 5/6 bezogen auf die Nullmessung dargestellt. Die Zeitreihe zeigt einen jährlich wiederkehrenden Verlauf mit einer Amplitude von ca. 20 mm. An der Position der Lotaufhängung sind die größten Deformationen aufgrund der auf die Mauer einwirkenden Kräfte (variierender Wasserdruck, Temperaturschwankungen) zu erwarten. Die hier nicht abgebildeten Zeitreihen der näher an den Talflanken angebrachten Lote 3/4 und 9/10 zeigen einen vergleichbaren Verlauf mit erwartungsgemäß leicht geringeren Amplituden. Exemplarisch für eine Einflussgröße ist in der Grafik die Lufttemperatur dargestellt. Die in Blau dargestellte Zeitreihe wurde durch ein gleitendes Mittelwertfilter mit einer Filterlänge von sieben Tagen geglättet. Sie zeigt eine hohe Korrelation zu den Lotwerten. Auf steigende Temperaturwerte folgt zeitverzögert eine Ausdehnung der gewölbten Mauer in Richtung der Wasserseite.

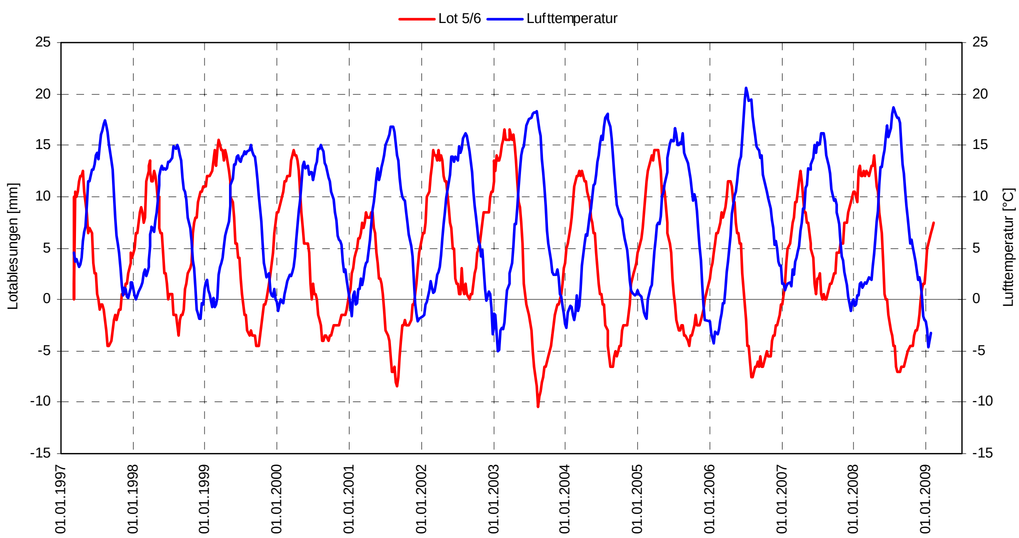


Abbildung 5.5: Wöchentliche Messwerte von Lot 5/6 gegenüber der Lufttemperatur

Der Einsatz der vorgestellten Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS verspricht eine weitaus höhere räumliche Auflösung der Mauerdeformationen. Aufgrund des relativ hohen zeitlichen Aufwandes könnte diese ähnlich wie derzeit die Beobachtung der Mauerpunkte zweimal jährlich zu den erwarteten Extremzuständen des Bauwerks im Frühling und im Herbst stattfinden.

5.2 Modellbildung

An der Okertalsperre wurden vier Epochen mit dem Trimble GX 3D gemessen. Da die Anschaffung des Trimble Scanners durch das GIH im Sommer 2006 erfolgte, wurde im März die erste Messung (Testmessung) mit dem Riegl-Scanner LMS Z360 des Instituts für Kartographie und Geoinformatik (IKG) der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Der Riegl-Scanner arbeitet ebenfalls mit einem Impulslaser, weist jedoch im Vergleich zum GX 3D ein wesentlich höheres Punktrauschen auf. Auf Basis dieser Messung konnte das Auswertemodell für die folgenden Epochen erstellt werden. Wie in Kapitel 4.3.1 erläutert wurde, hat die Modellierung nicht den Anspruch das Bauwerk exakt in jedem Detail nachzubilden, sondern einen epochenunabhängigen Referenzrahmen zu erzeugen. Hierzu wird eine bestanpassende quadratische Form verwendet, die über eine automatisierte Formermittlung identifiziert wird.

5.2.1 Formermittlung

Die Testmessung erfolgte am 21.03.2006. Sie diente dazu, eine registrierte Punktwolke der Luftseite der Talsperre zu erzeugen, um daraus ein geeignetes Modell für die Auswertung späterer Epochen abzuleiten. Das Bauwerk wurde hierzu von drei Standpunkten aus gescannt. Der eingesetzte Riegl-Scanner wurde in Kombination mit einer aufgesetzten digitalen Spiegelreflex-Kamera (Nikon D100) betrieben, sodass die Punktwolke mit hoch auflösenden Digitalfotos eingefärbt werden konnte. Die Scans wurden mithilfe der Riegl-Software RiscanPro (Version 1.2.0) registriert. Die Software erkennt automatisch besonders stark reflektierende Elemente (z.B. Retro-Targets) in der Punktwolke, die anschließend mit maximaler Auflösung erneut gescannt werden. Da die Objektpunkte des Überwachungsnetzes zum größten Teil als Reflexfolie an der Mauer vermarkt sind, konnten diese für die Verknüpfung und Referenzierung der Scans verwendet werden. Hierzu wurden die aktuellen Koordinaten der Objektpunkte im System der Harzwasserwerke in das später verwendete geodätische Datum transformiert. Für die Registrierung der drei Scanner-Standpunkte wurden insgesamt 11 Objektpunkte verwendet. Die Restklaffungen der Transformation waren für alle Punkte kleiner als 1 cm. Obwohl dieses Ergebnis sehr gut ist, wurden für die Registrierung der anschließenden Epochen ausschließlich die in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Zielmarken verwendet, da die in dieser Arbeit entwickelte Auswertemethode unabhängig von Objektpunkten auf/an dem zu überwachenden Objekt sein soll. Die registrierte und eingefärbte Punktwolke der Testmessung zeigt Abbildung 5.6 zusammen mit einem Foto des eingesetzten Scanners auf Punkt 4000 des Überwachungsnetzes.

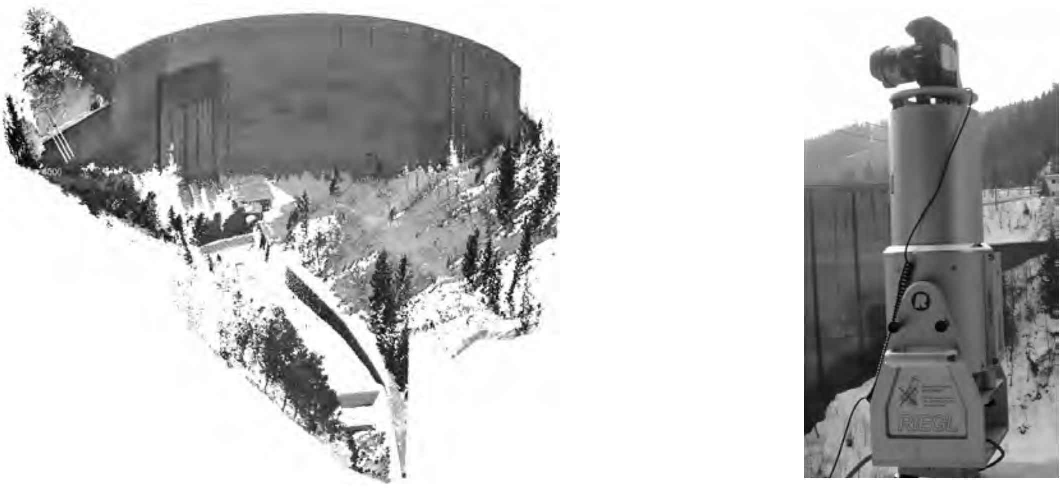


Abbildung 5.6: Eingefärbte Punktwolke der Okertalsperre und Scanner (Riegl LMS Z360 mit Nikon D100)

Die registrierte Punktwolke ist die Grundlage für die weiteren Schritte der Modellbildung:

- Extrahieren der Mauerpunkte,
- Formermittlung und -schätzung,
- Blockbildung.

Im ersten Schritt wurden mithilfe von RiscanPro die Mauerpunkte manuell aus der gesamten Punktwolke extrahiert. Das Ergebnis ist im linken Teil von Abbildung 5.7 dargestellt. In der rechts dargestellten Punktwolke wurden zudem alle Bauwerksteile entfernt, die nicht zur geometrischen Hauptform des Bauwerks, der gewölbten Mauer mit dem aufgesetzten Schwergewichtsteil, gehören. Hierzu zählen die linke und die rechte Talflanke, die Heberanlage mit der Sprungschanze, der stark gewölbte Mauerfuß sowie das Sicherungsnetz. Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich auf den in Abbildung 5.7 rechts dargestellten Teil der Mauer, an dem die größten Deformationen zu erwarten sind und der sich durch eine einzige quadratische Form mit ausreichender Genauigkeit für die weitere Auswertung approximieren lässt. Alternativ wird von REHR 2007 ein Ansatz vorgestellt, bei dem das Bauwerk in vier Teilformen unterteilt, getrennt modelliert und anschließend wieder zu einem gemeinsamen Modell zusammengefügt wird. Dieser Ansatz wirft allerdings weitere Fragen z.B. bezüglich der Übergänge zwischen den einzelnen Teilformen auf, deren Behandlung kein Bestandteil dieser Arbeit ist.

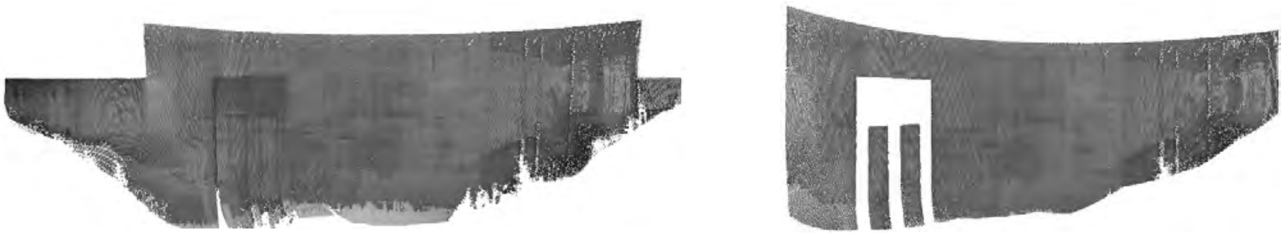


Abbildung 5.7: Extrahieren der Mauer-Grundform für die Modellierung in zwei Schritten

Der zweite Schritt der Modellbildung ist die Formermittlung. Hierzu wurde das in Kapitel 2.3.2 vorgestellte Verfahren der automatischen Formermittlung auf die Mauerpunkte angewendet. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde nur jeder tausendste Punkt für die Formermittlung verwendet, was zu einer Punktmenge von ca. 600 gleichmäßig über die Mauer verteilten Punkten führte.

Das Ergebnis der automatischen Formermittlung sind die vier in Formel (2.36) eingeführten bewegungsinvarianten Parameter der gesuchten quadratischen Form. Für die ausgedünnte Punktwolke der Okertalsperre ergaben sie sich zu:

$$\begin{aligned} \delta &= -9958 \quad & \Delta &= 0,066 \\ J &= 0,677 \quad & B &= -79567 \end{aligned}.$$

Durch statistische Tests wurde nachgewiesen, dass alle Parameter mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ungleich Null sind, sodass sich nach dem in Abbildung 2.16 dargestellten Testbaum ein Ellipsoid ergibt. Durch weitere Tests, die z.B. bei HESSE & KUTTERER 2006 beschrieben werden, zeigte sich, dass die vereinfachenden Ellipsoide Kugel und Rotationsellipsoid statistisch nicht gerechtfertigt sind, da sich ihre drei Achslängen signifikant unterscheiden. Daher ist als bestanpassende quadratische Form ein dreiachsiges Ellipsoid am wahrscheinlichsten.

Ein achsparalleles und im Ursprung des Bezugssystems gelagertes dreiachsiges Ellipsoid lässt sich wie folgt parametrisieren:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}+\frac{z^2}{c^2}-1=0\,. \tag{5.1}$$

Dabei kennzeichnen a, b und c die drei Radien in Richtung der drei Koordinatenachsen x, y und z. Um die geometrische Form an die Punkte der Staumauer anzupassen, wird das Modell um Lage- und Orientierungsparameter erweitert. Die drei Lageparameter x_M, y_M und z_M legen die Position des Ellipsoidmittelpunkts im Raum fest. Durch drei Winkel wird die Rotation der Ellipsoid-Achsen gegenüber den drei Koordinatenachsen beschrieben. Die Okertalsperre wurde wegen der aufgesetzten Schwergewichtsmauer als lotrecht aufsteigendes Bauwerk konstruiert, dass sich im Querschnitt nur im unteren Bereich von der Talsohle an aufsteigend verjüngt (s. Abbildung 5.2). Der unterste, stärker gewölbte Teil der Mauer konnte für die hier betrachtete Hauptform vernachlässigt werden, da hier keine Deformationen zu erwarten sind. Aus diesem Grund kann im Modell auf die Rotationen um die x- und die y-Achse verzichtet werden, sodass nur der Rotationsparameter α für die Drehung um die z-Achse eingeführt wird:

$$\frac{\left(\cos\alpha\cdot(x-x_M)-\sin\alpha\cdot(y-y_M)\right)^2}{a^2}+\frac{\left(\sin\alpha\cdot(x-x_M)+\cos\alpha\cdot(y-y_M)\right)^2}{b^2}+\frac{(z-z_M)^2}{c^2}-1=0\,. \tag{5.2}$$

Für die Schätzung der Form- und Orientierungsparameter wurde (5.2) für jeden der oben erwähnten ca. 600 Punkte als Bedingungsgleichung formuliert. Die Parameterschätzung erfolgte im Gauß-Helmert-Modell. Für das stochastische Modell wurden die Beobachtungen als gleichgenau und unkorreliert mit einer Standardabweichung von 7,5 cm eingeführt. Dieser vergleichsweise hohe Wert resultiert zum einen aus dem Rauschniveau der Messungen und berücksichtigt zum anderen die Idealisierung des Bauwerks durch das funktionale Modell des Ellipsoids.

Als wesentliche Ergebnisse der Schätzung sind in Tabelle 5.2 die Parameter mit ihren Standardabweichungen zusammengefasst. Mehrere Aspekte fallen auf. Der geschätzte Winkel ist absolut betrachtet deutlich kleiner als seine Standardabweichung und somit statistisch nicht signifikant von Null verschieden. Aus diesem Grund wird das funktionale Modell für die Schätzung im nächsten Schritt durch die Eliminierung von α vereinfacht. Des Weiteren sind die Standardabweichungen für $\hat{c}$ und $\hat{z}_M$ vergleichsweise hoch. Außerdem unterscheiden sich die Radien des Ellipsoids in x- und y-Richtung nur wenig, während der Schätzwert für c sehr groß ist. Diese Punkte werden im Folgenden erneut aufgegriffen.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Parameterschätzung für das bestanpassende Ellipsoid

$\hat{a}$ = 69,62 m	$\hat{\sigma}_a$ = 0,16 m
$\hat{b}$ = 69,22 m	$\hat{\sigma}_b$ = 0,15 m
$\hat{c}$ = 373,33 m	$\hat{\sigma}_c$ = 57,97 m
$\hat{x}_M$ = 126,95 m	$\hat{\sigma}_{x_M}$ = 0,15 m
$\hat{y}_M$ = 227,30 m	$\hat{\sigma}_{y_M}$ = 0,17 m
$\hat{z}_M$ = 126,95 m	$\hat{\sigma}_{z_M}$ = 2,36 m
$\hat{\alpha}$ = -5,482 gon	$\hat{\sigma}_\alpha$ = 11,643 gon

Zur Erläuterung muss angemerkt werden, dass die Höhen im lokalen geodätischen Datum von den z.B. in Abbildung 5.2 angegebenen NN Höhen um ca. 272 m differieren. Im lokalen System für die Laserscanning-Auswertung beträgt die z-Koordinate der Mauerkrone rund 146 m, sodass für diese Schätzung der Mittelpunkt des Ellipsoids ca. 19 m unterhalb der Mauerkrone liegt.

Formel (5.3) zeigt die Bedingungsgleichungen für die Schätzung der Ellipsoidparameter als achsparalleles System.

$$\frac{(x-x_M)^2}{a^2}+\frac{(y-y_M)^2}{b^2}+\frac{(z-z_M)^2}{c^2}-1=0 \tag{5.3}$$

Die erneute Schätzung der verbliebenen sechs Parameter für Form und Lage des Ellipsoids bei gleich bleibendem stochastischen Modell liefert die in Tabelle 5.3 zusammengefassten Ergebnisse.

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Parameterschätzung für das bestanpassende Ellipsoid als achsparalleles System

$\hat{a}$ = 69,58 m	$\hat{\sigma}_a$ = 0,02 m
$\hat{b}$ = 69,39 m	$\hat{\sigma}_b$ = 0,04 m
$\hat{c}$ = 372,02 m	$\hat{\sigma}_c$ = 57,24 m
$\hat{x}_M$ = 127,02 m	$\hat{\sigma}_{x_M}$ = 0,02 m
$\hat{y}_M$ = 227,38 m	$\hat{\sigma}_{y_M}$ = 0,03 m
$\hat{z}_M$ = 133,52 m	$\hat{\sigma}_{z_M}$ = 2,34 m

Durch das Weglassen von α haben sich die Schätzwerte der anderen Parameter nur geringfügig geändert. Anhand der Standardabweichungen ist zu erkennen, dass die Radien a und b sowie die Lagerung des Ellipsoids in x und y deutlich genauer geschätzt wurden. Vergleichsweise schlecht bestimmt sind weiterhin der Radius c und die z-Komponente des Mittelpunkts. Zusammen mit dem sehr hohen Schätzwert für c sowie der geringen Differenz zwischen $\hat{a}$ und $\hat{b}$ sind dies Hinweise, dass weitere Modellvereinfachungen zu einem Rotationsellipsoid oder zu einem Zylinder als bestanpassende Form für die Grundform der Mauer denkbar sind. Diese Modellanpassungen werden an dieser Stelle aber nicht weiter untersucht. Die folgende Abbildung zeigt den unteren Teil des geschätzten Ellipsoids zusammen mit den in Rot dargestellten Punkten auf der Luftseite der Talsperre.

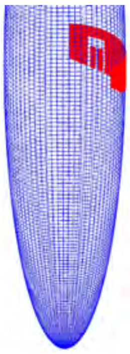


Abbildung 5.8: Mauerpunkte und bestanpassendes Ellipsoid

An den geschätzten Verbesserungen für die gemessenen Koordinaten können die Abweichungen der verwendeten Punkte vom Ellipsoid abgelesen werden. Im Durchschnitt liegen deren Absolutwerte bei 2,2 cm und die maximalen Beträge sind kleiner als 20 cm. Diese Werte genügen den Anforderungen für die weitere Auswertung. Damit ist die Formermittlung abgeschlossen. Der nächste Schritt besteht in der Blockbildung und der Definition des räumlichen Referenzrahmens.

5.2.2 Blockgittermodell

Für die Blockbildung wird Formel (5.3) in Parameterform mit den Flächenparametern φ und θ dargestellt, die entsprechend den Kugelkoordinaten in Abbildung 2.5 definiert sind:

$$\hat{\mathbf{x}}(\varphi,\theta) = \begin{pmatrix} \hat{x}_M + \hat{a}\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi \\ \hat{y}_M + \hat{b}\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi \\ \hat{z}_M + \hat{c}\cdot\cos\theta \end{pmatrix} = \hat{\mathbf{x}}_M + \hat{\mathbf{x}}_E, \quad \text{mit: } \hat{\mathbf{x}}_E = \hat{\mathbf{x}}_E(\varphi,\theta) = \begin{pmatrix} \hat{a}\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi \\ \hat{b}\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi \\ \hat{c}\cdot\cos\theta \end{pmatrix}. \tag{5.4}$$

Dabei wird durch $\hat{\mathbf{x}}_E$ der Vektor vom Ellipsoid-Mittelpunkt $\hat{\mathbf{x}}_M$ zum Flächenpunkt $\hat{\mathbf{x}}(\varphi,\theta)$ beschrieben. Für jeden Flächenpunkt lässt sich so ein Radius r als Betrag des Vektors $\hat{\mathbf{x}}_E$ berechnen:

$$r = r(\varphi,\theta) = \left|\hat{\mathbf{x}}_E\right| = \sqrt{\left(\hat{a}\cdot\sin\theta\cdot\cos\varphi\right)^2 + \left(\hat{b}\cdot\sin\theta\cdot\sin\varphi\right)^2 + \left(\hat{c}\cdot\cos\theta\right)^2}\,. \tag{5.5}$$

Durch die Parametervektoren $\boldsymbol{\varphi}$ und $\boldsymbol{\theta}$:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varphi}^T &= \begin{bmatrix}\varphi_1 & \varphi_2 & \ldots & \varphi_m\end{bmatrix}, \quad \text{mit: } \varphi_{j+1} = \varphi_j + \Delta\varphi, \quad j = 1, 2, ..., m \\ \boldsymbol{\theta}^T &= \begin{bmatrix}\theta_1 & \theta_2 & \ldots & \theta_n\end{bmatrix}, \quad \text{mit: } \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta, \quad i = 1, 2, ..., n \end{aligned}, \tag{5.6}$$

sowie die halbe Blocktiefe Δr werden die Eckpunkte des Blockgitters festgelegt. Jeder der $n \times m$ Blöcke $B_{i,j}$ wird dabei durch seine acht Eckpunkte $\hat{\mathbf{x}}^{(1)}_{P_{i,j}}$ bis $\hat{\mathbf{x}}^{(8)}_{P_{i,j}}$ räumlich definiert.

Abbildung 5.9 verdeutlicht die Bezeichnung der einzelnen Raumelemente nach Zeilen i und Spalten j sowie die Nummerierung der Eckpunkte pro Block.

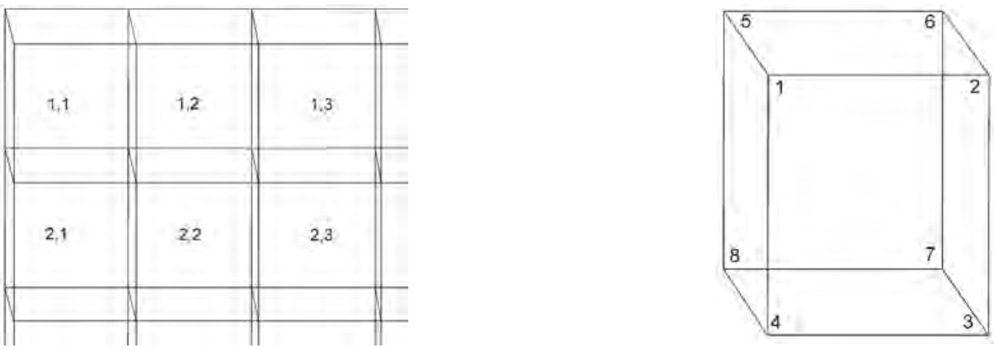


Abbildung 5.9: Bezeichnung der Blöcke und Nummerierung der Ecken pro Block

Danach lässt sich beispielsweise Punkt 7 von Block $B_{2,3}$ (entspricht Punkt 8 von Block $B_{2,4}$) wie folgt berechnen:

$$\hat{\mathbf{x}}^{(7)}_{P_{2,3}} = \hat{\mathbf{x}}_M + \frac{r^{(7)}_{2,3} + \Delta r}{r^{(7)}_{2,3}}\cdot\hat{\mathbf{x}}^{(7)}_{E_{2,3}}, \quad \text{mit: } r^{(7)}_{2,3} = r\left(\varphi_3 + \Delta\varphi, \theta_2 + \Delta\theta\right), \hat{\mathbf{x}}^{(7)}_{E_{2,3}} = \hat{\mathbf{x}}_E\left(\varphi_3 + \Delta\varphi, \theta_2 + \Delta\theta\right). \tag{5.7}$$

Die Wertebereiche der Parametervektoren $\boldsymbol{\varphi}$ und $\boldsymbol{\theta}$ wurden anhand der räumlichen Ausdehnung der Talsperre festgelegt. Danach bewegt sich φ zwischen -18,5 und 124 gon und θ zwischen 93 und 103,5 gon.

Die Schrittweiten $\Delta\varphi$ und $\Delta\theta$ resultieren aus den gewählten Blockgrößen. Wie in Kapitel 4.3.1 beschreiben wurde, sollten die Raumelemente so groß sein, dass genügend Laserpunkte für eine Ebenenschätzung zur Verfügung stehen. Gleichzeitig sollte eine Obergrenze eingehalten werden, die von dem maximal tolerierbaren Modellfehler abhängt, der durch das lineare Auswertemodell entsteht. Für die Auswertung der Messungen an der Okertalsperre wurden die maximale Blockhöhe und -breite zu je 1,00 m gewählt. Nach Formel (4.35) ist somit ein Modellfehler von höchstens 1,8 mm zu erwarten.

Für den Bereich der Talsperre ist das größte Raumelement in der ersten Zeile, also für $\theta = 93$ gon und auf Höhe der x-Achse, also für $\varphi = 0$ gon zu erwarten. Die Schrittweite $\Delta\theta$ wurde so festgelegt, dass für diesen Block der Abstand zwischen den Eckpunkten 5 und 8 gleich der maximalen Blockhöhe ist. Entsprechend wurde die Schrittweite $\Delta\varphi$ anhand der Eckpunkte 7 und 8 bestimmt.

Somit folgt für die Parametervektoren:

$$\begin{aligned} \varphi^T &= \begin{bmatrix} 123,954 & 123,038 & \dots & -18,989 \end{bmatrix} \text{gon}, \quad \text{mit: } \varphi_{j+1} = \varphi_j - 0,916 \text{ gon}, \quad j = 1, 2, ..., 157 \\ \theta^T &= \begin{bmatrix} 103,333 & 103,162 & \dots & 93,405 \end{bmatrix} \text{gon}, \quad \text{mit: } \theta_{i+1} = \theta_i - 0,171 \text{ gon}, \quad i = 1, 2, ..., 59 \end{aligned} \quad . \tag{5.8}$$

Abbildung 5.10 zeigt das mit den unter (5.8) beschriebenen Parametervektoren und den geschätzten Ellipsoidparametern aus Tabelle 5.3 berechnete Blockgittermodell. Die Blocktiefe wurde mit $2 \cdot \Delta r = 0,7\text{m}$ gewählt. Dabei wurden die maximalen Verbesserungen (0,2 m) bei der Schätzung der Ellipsoidparameter, die zu erwartenden Bauwerksbewegungen (0,03 m) und ein zusätzlicher Sicherheitsabstand von 50% berücksichtigt. Das dargestellte Modell besteht aus $n \times m = 59 \times 157 = 9263$ Blöcken.

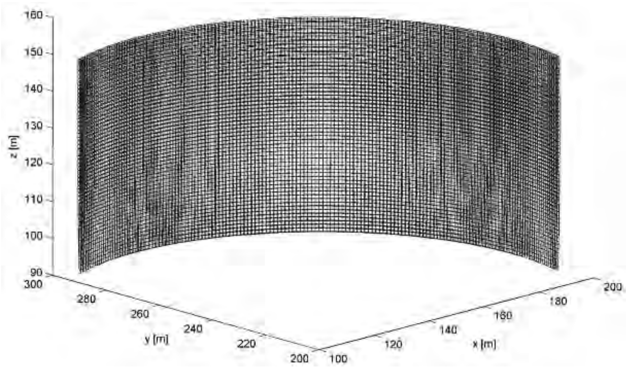


Abbildung 5.10: Blockgittermodell für die Okertalsperre

Zuordnung der registrierten Punktwolke

Für die Auswertung der registrierten Punktwolken werden die Laserpunkte den einzelnen Blöcken eindeutig zugeordnet. Hierzu sind verschiedene Vorgehensweisen möglich. So kann beispielsweise für jeden Punkt getestet werden, ob seine kartesischen Koordinaten innerhalb der Begrenzungsflächen eines Raumelements liegen. Diese Methode ist sehr rechenintensiv und dauert entsprechend lange. Einen schnelleren Weg bietet die Zuordnung der Punkte, nachdem sie in Polarkoordinaten umgerechnet wurden. Diese Methode wird hier verwendet und im Folgenden kurz beschrieben.

Das Ergebnis der Zuordnung ist eine Datentabelle, die alle Punkte enthält, die innerhalb des Blockgittermodells liegen. Die folgende Tabelle zeigt deren Aufbau exemplarisch für drei Punkte.

Tabelle 5.4: Datenstruktur der zugeordneten Laserpunkte

x [m]	y [m]	z [m]	Block Zeile	Block Spalte
194,311	210,368	134,424	16	153
194,558	210,492	126,618	24	153
194,609	210,377	124,716	26	153

Die ersten drei Spalten enthalten die kartesischen Koordinaten eines zugeordneten Punktes. Die Spalten 4 und 5 identifizieren den zugehörigen Block durch dessen Zeilen- und Spaltenbezeichnung. Der erste Schritt, um diese Tabelle zu füllen, ist die Verschiebung der registrierten Laserpunkte $\mathbf{x}_R$ in das System des geschätzten Ellipsoids. Hierzu werden von jedem Punkt die Koordinaten des Ellipsoid-Mittelpunkts abgezogen:

$$\mathbf{x}_R^* = \mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_M \,. \tag{5.9}$$

Anschließend werden alle Punkte $\mathbf{x}_R^*$ nach Formel (2.1) in Kugelkoordinaten $\left(d_R^* \quad \varphi_R^* \quad \theta_R^*\right)$ umgerechnet.

Im nächsten Schritt werden punktweise die Vertikalwinkel θ_R^* mit dem Parametervektor $\boldsymbol{\theta}$ des Blockgittermodells verglichen. Liegt θ_R^* für einen Punkt zwischen zwei benachbarten Elementen θ_i und θ_{i+1} von $\boldsymbol{\theta}$ wird Tabelle 5.4 um eine Zeile erweitert. Die ersten drei Spalten der Zeile werden mit den Polarkoordinaten gefüllt, in die vierte Spalte wird der Wert für i geschrieben.

Nachdem alle Punkte getestet wurden, wird die Tabelle zeilenweise durchlaufen. Für jeden enthaltenen Punkt wird sein Horizontalwinkel φ_R^* mit dem Parametervektor $\boldsymbol{\varphi}$ verglichen. Liegt φ_R^* für einen Punkt zwischen zwei benachbarten Elementen φ_j und φ_{j+1} von $\boldsymbol{\varphi}$, wird die 5. Spalte der Tabelle mit dem Wert von j gefüllt. Alle Zeilen der Tabelle bei denen Spalte 5 leer bleibt, werden gelöscht.

Abschließend wird für jeden in der Tabelle verbliebenen Punkt getestet ob seine Distanz d_R^* innerhalb der Grenzen von $r_{ij} - \Delta r$ und $r_{ij} + \Delta r$ liegt. Ist dies der Fall wird die Zeile nicht gelöscht und die Polarkoordinaten des Punktes werden nach Formel (2.1) wieder in kartesische Koordinaten umgerechnet.

Das Ergebnis der Zuordnung für die registrierte Punktwolke der Testmessung (vgl. Abbildung 5.6) zeigt Abbildung 5.11. In grün sind alle Punkte dargestellt die nicht innerhalb des Blockgittermodells für die Talsperre liegen. Deutlich sind dabei die Heberanlage mit der Sprungschanze und Teile des Fangnetzes unterhalb der Mauerkrone zu erkennen. Alle Punkte die dem blauen Gittermodell zugeordnet wurden, sind in Rot dargestellt.

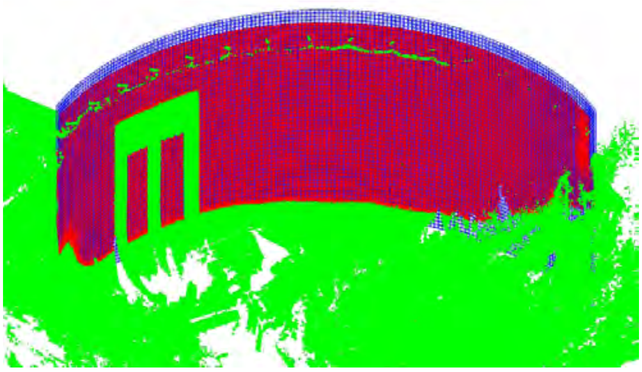


Abbildung 5.11: Zugeordnete Punkte der Testmessung

Insgesamt konnten 584635 Punkte dem Modell zugeordnet werden. Eine Häufigkeitsverteilung bezogen auf die einzelnen Blöcke zeigt die folgende Abbildung 5.12. Der Farbbalken zeigt die absoluten Häufigkeiten an, mit denen die Punkte in den jeweiligen Punkten liegen.

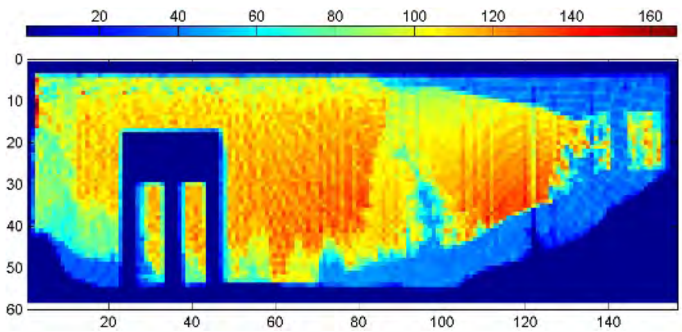


Abbildung 5.12: Häufigkeitsverteilung der zugeordneten Punkte für die Testmessung.

5.3 Deformationsanalyse der tachymetrischen Messungen

In Kapitel 5.2 wurde anhand der Ergebnisse der Testmessung ein Blockgittermodell für die folgenden Epochen aufgestellt. Das Modell ist in dem lokalen geodätischen Datum der Okertalsperre definiert, welches für die Auswertung der Laserscanning-Auswertungen verwendet wird. Die folgenden Ausführungen behandeln die Herleitung und Festlegung dieses Datums. Hierzu werden die tachymetrischen Messungen ausgewertet, die zu den vier Epochen 1 bis 4 durchgeführt wurden.

Die tachymetrischen Messungen aller vier Epochen wurden in Zwangszentrierung mit einem Präzisions-Tachymeter Leica TCA 2003 in Kombination mit Leica Rundprismen durchgeführt. Vor jeder Epoche wurde die Distanzmesseinheit des Tachymeters kalibriert. Die resultierenden Parameter für Nullpunktfehler und Maßstab wurden bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt. Zu allen vier Epochen wurden Schrägdistanzen, Horizontalrichtungen und Vertikalwinkel von den vier Messpfeilern 1000, 2000, 3000 und 4000 aus in zwei Vollsätzen beobachtet. Zielpunkte waren neben diesen vier Punkten die Pfeiler 8000 und 10000 sowie die jeweils sichtbaren und mit Reflexfolien, bzw. Miniaturprismen vermarkten Objektpunkte an der Talsperre. Die Punktlagen sind in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 dargestellt. Die Punkte direkt unterhalb der Mauerkrone (901 bis 906) wurden nicht angezielt, da diese nur temporär mit speziellen Reflektoren vermarkt werden, welche für die Messungen nicht zur Verfügung standen.

Die Auswertung der Messungen erfolgte zunächst epochenweise getrennt als dreidimensionale Netzausgleichung mit dem Netzausgleichungs-Programm HANNA. Dabei wurden in allen vier Epochen dieselben Näherungswerte für die Koordinaten der Netzpunkte verwendet. Tabelle 5.5 stellt sie für die sechs Pfeilerpunkte zusammen. Die Berechnungen wurden als freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung durchgeführt. Dazu wurden die Punkte auf den sechs Vermessungspfeilern (1000, 2000, …, 10000) als Datumspunkte verwendet.

Tabelle 5.5: Näherungswerte für die Koordinaten der Pfeilerpunkte (Stützpunkte)

Punkt	x [m]	y [m]	z [m]
1000	152,479	224,797	100,250
2000	100,000	265,579	102,299
3000	161,201	160,059	119,724
4000	51,851	263,159	134,761
8000	100,000	100,000	99,870
10000	51,306	163,902	97,827

Als Ergebnis der Netzausgleichungen lagen für jede Epoche die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}_i^*$, ihre Kofaktormatrix $\mathbf{Q}^*_{\hat{x}_i\hat{x}_i}$, die Schätzwerte $\hat{\sigma}^2_{0_i}$ des Varianzfaktors sowie die Freiheitsgrade f_i der Schätzung vor:

$$\text{Epoche i}: \quad \hat{\mathbf{x}}_i^* = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}^*_{S_i} \\ \hat{\mathbf{x}}^*_{O_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}^*_{\hat{x}_i\hat{x}_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}^*_{\hat{x}_{S_i}\hat{x}_{S_i}} & \mathbf{Q}^*_{\hat{x}_{S_i}\hat{x}_{O_i}} \\ \mathbf{Q}^*_{\hat{x}_{O_i}\hat{x}_{S_i}} & \mathbf{Q}^*_{\hat{x}_{O_i}\hat{x}_{O_i}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\sigma}^2_{0_i}, \quad f_i \qquad i = 1, 2, 3, 4 . \tag{5.10}$$

Der Parametervektor enthält die Koordinaten der Stützpunkte im Subvektor $\hat{\mathbf{x}}^*_{S_i}$ und die Koordinaten der Objektpunkte im Subvektor $\hat{\mathbf{x}}^*_{O_i}$. Die Koordinaten und ihre Kofaktormatrizen gelten allerdings nur vorläufig, da erst im Rahmen der folgenden Deformationsanalyse das geodätische Datum festgelegt wird.

Deformationsanalyse

Die geschätzten Koordinaten wurden nach der in Kapitel 3.1.4 beschriebenen zweistufigen Deformationsanalyse auf Kongruenz untersucht. Dabei wurde jede Epoche (Vergleichsepoche) gegenüber der ersten und der vorherigen Epoche (Bezugsepoche) betrachtet. Daraus ergeben sich folgende fünf Vergleiche: E1 – E2, E1 – E3, E1 – E4, E2 – E3 und E3 – E4.

Im ersten Schritt der Kongruenzanalyse wurde nach dem Verfahren der Rückwärtsstrategie für alle Epochen ein gemeinsames Datum gesucht. Hierzu wurde ausgehend von den Pfeilerkoordinaten $\hat{\mathbf{x}}^*_{S_i}$ eine Gruppe von Datumspunkten identifiziert, die über alle Epochen stabil sind. Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse der fünf Vergleiche zusammen.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Kongruenzanalysen für die Stützpunkte

Bezugsepoche	Vergleichsepoche	Stabile Stützpunkte	Nicht stabile Stützpunkte
E1	E2	1000, 3000, 4000, 8000, 10000	2000
E1	E3	1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000	-
E2	E3	2000, 3000, 4000, 8000, 10000	1000
E1	E4	3000, 4000, 8000, 10000	1000, 2000
E3	E4	3000, 4000, 8000, 10000	1000, 2000

Durch die Kongruenzanalysen zeigte sich, dass die beiden am dichtesten an der Mauer stehenden Pfeiler 1000 und 2000 in dem betroffenen Zeitraum nicht als stabil betrachtet werden können. Die anderen vier Punkte können hingegen als räumlich stabil beurteilt werden.

Als Konsequenz wurden zur Lagerung des Netzes die Punkte 3000, 4000, 8000 und 10000 ausgewählt. Mittels S-Transformationen nach den Formeln (3.1) bis (3.3) wurde der entsprechende Datumsübergang für jede der vier Epochen durchgeführt. Als Ergebnis der Transformation lagen die Koordinatenvektoren und Kofaktormatrizen im Datum der vier stabilen Stützpunkte vor:

$$\text{Epoche i}: \quad \hat{\mathbf{x}}_i = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{S_i} \\ \hat{\mathbf{x}}_{O_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}_{\hat{x}_i \hat{x}_i} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{x}_{S_i} \hat{x}_{S_i}} & \mathbf{Q}_{\hat{x}_{S_i} \hat{x}_{O_i}} \\ \mathbf{Q}_{\hat{x}_{O_i} \hat{x}_{S_i}} & \mathbf{Q}_{\hat{x}_{O_i} \hat{x}_{O_i}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\sigma}^2_{0_i}, \quad f_i \qquad i = 1, 2, 3, 4 \,. \tag{5.11}$$

Für alle Epochen sind die Standardabweichungen der ausgeglichenen Objektpunkte kleiner als 1 mm, für die Stützpunkte kleiner als 0,5 mm. Die Koordinaten der Stützpunkte und ihre Kofaktormatrizen dienen im Verlauf der weiteren Auswertung als Zielsystem für die in Kapitel 5.4.1 beschriebene Registrierung der gemessenen Punktwolken.

Im 2. Schritt der zweistufigen Deformationsanalyse wurde die Stabilität der Objektpunkte überprüft. Hierzu wurde das Verfahren der Vorwärtsstrategie angewendet. Es wurde für jeden einzelnen Punkt getestet, ob er mit der Gruppe der Datumspunkte verträglich ist. Tabelle 5.7 fasst die Ergebnisse der fünf Epochenvergleiche zusammen. Sie zeigt signifikante Punktbewegungen für vier Epochenvergleiche. Nur für den Vergleich der zeitlich nah beieinander liegenden Epochen E1 und E2 konnten keine signifikanten Punktbewegungen aufgedeckt werden. Die nachgewiesenen Bewegungen befinden sich erwartungsgemäß im mittleren, oberen Bereich der Talsperre (vgl. Abbildung 5.4).

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Kongruenzanalysen für die Objektpunkte

Bezugsepoche	Folgeepoche	Nicht stabile Objektpunkte
E1	E2	-
E1	E3	301, 401, 501, 503, 701
E2	E3	301, 401, 501, 701, 702
E1	E4	301, 401, 402, 403, 501, 502, 503, 701, 703
E3	E4	501

Tabelle 5.8 zeigt die Komponenten der signifikanten Punktbewegungen in der Lage (dx, dy) und die Länge des resultierenden Verschiebungsvektors (ds).

Tabelle 5.8: Nachgewiesene Punktverschiebungen in der Lage (Fortsezung auf der folgenden Seite)

Bezugsepoche	Folgeepoche	Punkt	dx [mm]	dy [mm]	ds [mm]
E1	E3	301	-2.7	-3.9	4.7
E1	E3	401	-5.2	-5.7	7.7
E1	E3	701	-4.3	-5.0	6.6
E1	E3	501	-3.4	-4.5	5.6
E1	E3	503	-3.0	-3.7	4.8
E2	E3	301	-3.8	-3.2	5.0
E2	E3	401	-3.7	-4.3	5.7
E2	E3	701	-3.7	-3.3	5.0
E2	E3	501	-4.3	-2.5	5.0
E2	E3	702	-4.3	-0.0	4.3
E1	E4	301	-0.8	-3.5	3.6

E1	E4	401	-2.5	-5.5	6.0
E1	E4	701	-2.5	-5.8	6.3
E1	E4	501	-3.4	-7.8	8.5
E1	E4	403	-1.9	-2.6	3.2
E1	E4	703	-3.8	-2.9	4.8
E1	E4	503	-3.4	-5.7	6.6
E1	E4	402	0.2	-2.3	2.3
E3	E4	501	-0.0	-2.8	2.8

Lotablesungen

Während der Messungen zu den vier Epochen wurden im Abstand von ca. 1,5 Stunden alle drei Pendellote abgelesen. Für die Dauer der Messungen einer Epoche traten keine Änderungen in den Ablesungen auf. Daher kann im Rahmen der Messgenauigkeit unterstellt werden, dass sich die Talsperre in dieser Zeit nicht bewegt hat. Die Lotablesungen sind für die vier Epochen in Tabelle 5.9 zusammengefasst.

Tabelle 5.9: Lotablesungen zu den vier Epochen

Epoche	Lot 9/10	Lot 5/6	Lot 3/4
E1	150,0 mm	144,0 mm	136,5 mm
E2	153,5 mm	147,0 mm	139,0 mm
E3	153,0 mm	152,0 mm	142,5 mm
E4	154.5 mm	152.0 mm	143.0 mm

Um die Ergebnisse besser mit den Punktverschiebungen vergleichen zu können zeigt Tabelle 5.10 die Differenzen der Lotablesungen zu den einzelnen Epochenvergleichen. Für die Interpretation ist zu beachten, dass die Skalen zur Ablesungen der Lotbewegungen senkrecht zur Mauerlängsachse und positiv in Richtung Luftseite der Talsperre orientiert sind. Daraus resultiert ein Vorzeichenwechsel gegenüber den nachgewiesenen Objektpunktbewegungen.

Tabelle 5.10: Differenzen der Lotablesungen zu den Epochenvergleichen

Bezugsepoche	Folgeepoche	Lot 9/10	Lot 5/6	Lot 3/4
E1	E2	3,5 mm	3,0 mm	2,5 mm
E1	E3	3,0 mm	8,0 mm	6,0 mm
E2	E3	-0,5 mm	5,0 mm	3,5 mm
E1	E4	4.5 mm	8.0 mm	6.5 mm
E3	E4	1.5 mm	0.0 mm	0.5 mm

Die gemessenen Werte für die Pendellote bestätigen in Ihrer Größenordnung und Richtung die nachgewiesenen Objektpunktbewegungen.

5.4 TLS-Messungen zu den Epochen E1 bis E4

Zu den Epochen E1 bis E4 wurden TLS-Messungen mit dem Trimble GX 3D des Geodätischen Instituts Hannover an der Okertalsperre durchgeführt. Abbildung 5.13 zeigt den Scanner während der 4. Epoche auf den Punkten 1000 und 4000. Auf dem rechten Bild ist das benötigte Equipment für die Messungen zu erkennen: Der Scanner, ein Notebook mit der Steuerungssoftware sowie ein Akku und ein Stromgenerator für die Energieversorgung. Nicht abgebildet sind die sechs eingesetzten Zielzeichen.

Abbildung 5.13: Einsatz des GX 3D während der 4. Epoche auf den Punkten 1000 und 4000

Das Scannen der Mauer und der Zielzeichen dauerte pro Standpunkt ca. 1,5 Stunden. Beim ersten Standpunkt des Tages kam noch eine wenigstens 20minütige Aufwärmphase des Scanners hinzu. Die Kapazität des Akkus reichte je nach Außentemperatur für ca. zwei Standpunkte. Das schwierige Gelände an der Okertalsperre (steile Anstiege zu den Pfeilern, weite Wege zwischen den Punkten 1000, 3000, 8000 auf der einen und den Punkten 2000, 4000, 10000 auf der anderen Talseite) erforderte drei Personen für einen reibungslosen Ablauf. Für das komplette Messprogramm bestehend aus den tachymetrischen und den Scanner-Messungen auf je vier Standpunkten wurden zwei komplette Arbeitstage benötigt.

Der Stromgenerator stand erst ab der 3. Epoche zur Verfügung. Dies ist ein Grund, warum bei Epoche E1 nur von zwei und bei Epoche E3 von drei Standpunkten aus gescannt wurde. Weitere Aspekte waren geeignete Wetterbedingungen sowie die Verfügbarkeit zweier studentischer Hilfskräfte und der notwendigen Ausrüstung. Aus diesen Gründen konnten auch die eigentlich geplanten Messtermine jeweils im Frühjahr und Herbst, zu den erwarteten Extremzuständen des Bauwerks, nicht umgesetzt werden.

Die Scanner-Messungen wurden immer mit den gleichen Einstellungen durchgeführt. Für die Objektmessungen wurde die Auflösung so eingestellt, dass die Rasterweite auf der Mauer zwischen 5 und 10 cm lag. Die Zielzeichen wurden separat mit der höchsten Auflösung gescannt. Der Kompensator des Scanners wurde für die Messungen deaktiviert, um diese Korrektur der Messwerte als mögliche Fehlerquelle ausschließen zu können. Alle Messungen einer Epoche (Tachymetrie und TLS) wurden in Zwangszentrierung durchgeführt, sodass der Scanner immer in einem horizontierten Dreifuß aufgebaut wurde.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Registrierung der Punktwolken dargestellt und anschließend die Resultate der weiteren Auswertung beschrieben und analysiert.

5.4.1 Registrierung

Die Registrierung der gescannten Punktwolken erfolgte für die Epochen E1 bis E4 nach der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Methode. Die Transformationsparameter einer Epoche wurden in einem gemeinsamen Gauß-Helmert-Modell über identische Punkte geschätzt. Hierzu wurden für jeden Scanner-Standpunkt alle sichtbaren Pfeilerpunkte mit den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Zielzeichen besetzt und mit höchster Auflösung gescannt. Aus diesen Punktwolken wurden mit der ebenfalls in Kapitel 4.2.2 erläuterten Methode die Koordinaten der Pfeilerpunkte im Koordinatensystem des Scanners abgeleitet. Die Koordinaten gingen als Kugelkoordinaten in die Schätzung ein. So war es möglich, die Genauigkeit der gemessenen Polarelemente Schrägstrecke, Horizontalrichtung und Vertikalwinkel durch eine Varianzkomponentenschätzung zu ermitteln und entsprechend im stochastischen Modell der Schätzung zu berücksichtigen. Zusätzlich konnten Kalibrierparameter für die Distanzmessung eingeführt und geschätzt werden. Für die identischen Punkte des Zielsystems wurden die in Kapitel 5.3 beschriebenen Koordinaten $\hat{\mathbf{x}}_{S_i}$ verwendet. Diese wurden ebenfalls als Beobachtungen in die gemeinsame Schätzung der Transformationsparameter eingeführt. Für das stochastische Modell wurde ihre Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{S_i}\hat{\mathbf{x}}_{S_i}} = \hat{\sigma}^2_{0_i} \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{S_i}\hat{\mathbf{x}}_{S_i}}$ genutzt.

Die wichtigsten Ergebnisse der Registrierungen werden im Folgenden zusammengestellt. Hierzu zählen die geschätzten Varianzkomponenten sowie die Schätzwerte für die Kalibrierparameter. Die Testgrößen der durchgeführten Signifikanztests, die geschätzten Transformationsparameter sowie die Restklaffen der Transformationen sind in Anhang A aufgeführt.

Ergebnisse für die vier Epochen

Für jede der vier Epochen werden zunächst die Standpunkte mit den zugehörigen identischen Punkten für die gemeinsame Registrierung der Punktwolken zusammengestellt. Es folgen die Signifikanztests für die Modellerweiterungen um die Kalibrierparameter der Streckenmessung: Maßstabsfaktor m und Nullpunktfehler k_0. Der hierzu verwendete Test und die Regeln für die Entscheidung, welche Modellerweiterung anschließend umgesetzt wurde, finden sich in Kapitel 4.2.3.

Um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Transformationsparameter zu erhöhen, wurde das geodätische Netz in den Epoche E3 und E4 um drei (E3: 10, 20, 30), bzw. vier (E4: 40, 50, 60, 70) temporär vermarkte Punkte erweitert, deren Koordinaten bei der Ausgleichung des tachymetrischen Netzes geschätzt wurden. Die Punkte wurden gleichmäßig auf der Mauerkrone verteilt. Dadurch verbesserte sich die räumliche Konfiguration für die Registrierung, da sich nun mehr identische Punkte in der Richtung von den Beobachtungspunkten zum interessierenden Objekt befanden.

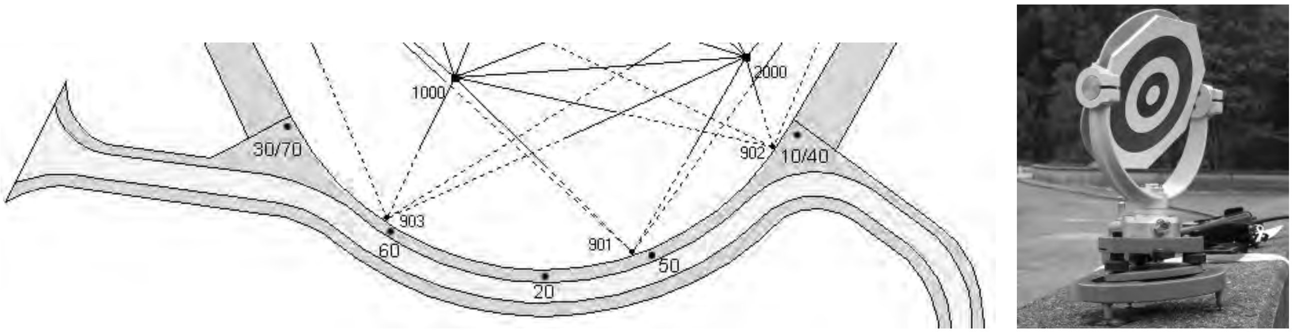


Abbildung 5.14: Lage der temporären Punkte in den Epoche E3/E4 und der mit einer Zielmarke besetzte Punkt 60

Die obige Abbildung zeigt die Verteilung der temporären Punkte auf der Mauerkrone und beispielhaft die Besetzung von Punkt 60 mit einer Zielmarke. Als temporäre Vermarkung kamen so genannte schwere Maueraufsetzer des Geodätischen Instituts Hannover zum Einsatz, die mit Leica-Dreifüßen bestückt werden können.

Für jede der vier Epochen werden in Tabelle 5.11 die Standpunkte mit den zugehörigen identischen Punkten für die gemeinsame Registrierung der Punktwolken zusammengestellt. In den weiteren Spalten werden die Redundanzen der Schätzungen sowie die mittleren absoluten Restklaffen an den identischen Punkten zusammengefasst. Bei diesen Werten sind die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzungen (vgl. Tabelle 5.12) und Modellerweiterungen durch Kalibrierparameter (vgl. Tabelle 5.13) berücksichtigt.

Tabelle 5.11: Konfigurationen und Ergebnisse der Registrierungen

Epoche	Standpunkt	Identische Punkte für die Transformationen	Redundanz	Restklaffen in x, y, z [mm]		
E1	2000	1000, 2000, 3000, 4000, 10000	14	1,0	0,5	3,7
	4000	1000, 3000, 4000, 8000		0,7	1,2	3,7
E2	1000	1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000	29	3,6	4,4	2,2
	2000	1000, 2000, 3000, 4000, 10000		1,5	2,7	2,3
	4000	1000, 3000, 4000, 8000, 10000		4,1	2,8	7,0
E3	1000	10, 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000	61	1,2	1,4	3,0
	2000	20, 30, 1000, 2000, 3000, 4000, 10000		1,5	1,5	5,3
	3000	10, 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000		2,0	1,6	6,2
	4000	10, 20, 30, 1000, 2000, 3000, 4000, 10000		1,8	3,3	6,2
E4	1000	40, 50, 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000	71	2,4	2,2	2,5
	2000	50, 60, 70, 1000, 2000, 3000, 4000, 8000, 10000		2,6	2,3	2,3
	3000	40, 1000, 2000, 3000, 4000, 10000		1,0	3,9	4,1
	4000	40, 50, 60, 70, 1000, 2000, 3000, 4000, 10000		2,3	1,6	5,0

Die Redundanz wird durch die größere Anzahl an Stand- und Zielpunkten von Epoche E1 zu E4 von 14 auf 71 gesteigert. Dadurch erhöht sich die Zuverlässigkeit der geschätzten Transformationsparameter.

Die mittleren absoluten Restklaffen der einzelnen Standpunkte sind in ihrer Größenordnung vergleichbar. Dabei sind die Werte in der z-Komponente etwas höher als die in x und y. Die Restklaffen können als Maß für die Genauigkeit der Transformationen interpretiert werden, sollten aber nicht losgelöst von der Redundanz betrachtet werden. Je größer die Überbestimmung bei der Schätzung, desto aussagekräftiger sind die Restklaffen als Genauigkeitsmaß. Ein weiteres Maß für die Genauigkeit der Transformationen sind die Standardabweichungen der geschätzten Transformationsparameter. Diese sind für jede Epoche in Anhang A zusammengestellt. Ebenfalls dargestellt sind deren Auswirkung auf die räumliche Lage eines Punktes in 100 m Entfernung, was der mittleren Streckenlänge im Netz entspricht. Diese Werte sind für die beiden letzten Epochen kleiner als für die Epochen E1 und E2, was sich durch die höhere Redundanz und die bessere räumliche Verteilung der Zielpunkte erklären lässt.

Varianzkomponentenschätzung

Die geschätzten Varianzkomponenten für das stochastische Modell der Transformationen sind in Tabelle 5.12 zusammengefasst. Sie wurden mithilfe der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Methode der reihenden Varianzkomponenten berechnet. Die Ergebnisse entsprechen für die Genauigkeit der Vertikalwinkel den Herstellerangaben für eine Einzelpunktmessung in Tabelle 2.1. Für die Horizontalrichtungs- und Streckenmessung sind die geschätzten Werte etwas besser als vom Hersteller angegeben. Für die Streckenmessung lässt sich dies durch die Einführung der Kalibrierparameter begründen.

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung

Epoche	Schrägstrecke	Horizontalrichtung	Vertikalwinkel
E1	$\sigma_{0_d} = 1{,}5$ mm	$\sigma_{0_\varphi} = 1{,}0$ mgon	$\sigma_{0_\theta} = 4{,}5$ mgon
E2	$\sigma_{0_d} = 1{,}2$ mm	$\sigma_{0_\varphi} = 4{,}0$ mgon	$\sigma_{0_\theta} = 4{,}0$ mgon
E3	$\sigma_{0_d} = 0{,}8$ mm	$\sigma_{0_\varphi} = 2{,}5$ mgon	$\sigma_{0_\theta} = 5{,}5$ mgon
E4	$\sigma_{0_d} = 1{,}2$ mm	$\sigma_{0_\varphi} = 2{,}5$ mgon	$\sigma_{0_\theta} = 3{,}0$ mgon

Modellerweiterung

Tabelle 5.13 zeigt die Ergebnisse der Signifikanztests für die Modellerweiterungen um die Kalibrierparameter der Streckenmessung: Maßstabsfaktor m und Nullpunktfehler k_0. Die hierzu verwendeten Tests und die Regeln für die Entscheidung wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4.2.3 umgesetzt. Die Testgrößen für die einzelnen Epochen finden sich in Anhang A.

Tabelle 5.13: Schätzwerte und Standardabweichungen der signifikanten Modellerweiterung

Epoche	Maßstabsfaktor		Nullpunktfehler	
E1	$\hat{m} = 1{,}0000567$	$\sigma_{\hat{m}} = 6{,}15\text{e-}06$	nicht signifikant	
E2	nicht signifikant		$\hat{k}_0 = -1{,}9$ mm	$\sigma_{\hat{k}_0} = 0{,}65$ mm
E3	$\hat{m} = 1{,}0000316$	$\sigma_{\hat{m}} = 7{,}23\text{e-}06$	$\hat{k}_0 = -1{,}8$ mm	$\sigma_{\hat{k}_0} = 0{,}72$ mm
E4	$\hat{m} = 1{,}0000224$	$\sigma_{\hat{m}} = 3{,}75\text{e-}06$	nicht signifikant	

Für jede Epoche ist wenigstens ein Kalibrierparameter signifikant. Um welche/n Parameter das Modell erweitert wird, ändert sich in jeder Epoche. Das lässt sich zumindest teilweise durch den eingeschränkten Bereich (60 bis 160 m) erklären, indem sich die Distanzen hauptsächlich verteilen. Dadurch lassen sich die beiden Parameter nur eingeschränkt in ihrer Wirkung trennen.

Für die Epochen E3 und E4 wurden die Kalibrierparameter zeitnah auf der Basis des geodätischen Instituts bestimmt (vgl. Tabelle 4.1). In Tabelle 5.14 sind die Auswirkungen der jeweils geschätzten Parameter auf die durchschnittliche Streckenlänge im Netz der Okertalsperre (ca. 100 m) zusammengefasst. Die Ergebnisse der Kalibrierbasis und der Registrierung sind in ihrer Größenordnung vergleichbar.

Tabelle 5.14: Auswirkung der Kalibrierparameter auf eine Streckenlänge von 100 m

Epoche	Kalibrierbasis	Registrierung
E3	1,8 mm	1,4 mm
E4	3,0 mm	2,2 mm

Bei den in Kapitel 4.1 beschriebenen Untersuchungen des eingesetzten Scanners traten teilweise systematische Restklaffen auf, die dem gemessenen Zenitwinkel zugeordnet und durch geeignete Parameter reduziert werden konnten. Daher sind in Anhang A für jede Epoche die Restklaffen an den identischen Punkten den entsprechenden Streckenlängen (für die x- und y-Komponente) und dem Zenitwinkel (für die z-Komponente) grafisch gegenübergestellt. Für keine der vier Epochen sind Systematiken erkennbar. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet, weitere Kalibrierparameter in das Modell der Registrierung einzuführen.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in diesem Kapitel zusammengestellten Ergebnisse für die Registrierungen der Punktwolken sind insgesamt positiv zu bewerten. Die Genauigkeit der Transformationen entspricht hinsichtlich der Restklaffen und der Standardabweichungen für die geschätzten Transformationsparameter den mit dem eingesetzten Scanner zu erwartenden Ergebnissen. Dies wird auch durch die Varianzkomponentenschätzungen bestätigt. Die Genauigkeit der Streckenmessung konnte durch die Einführung von Kalibrierparametern gegenüber den Herstellerangaben gesteigert werden.

Es fällt auf, dass die z-Komponente insgesamt etwas ungenauer als die Lagekomponenten bestimmt wurde. Dies liegt zum einen an der vergleichsweise schlechteren Genauigkeit der Vertikalwinkelmessung. Ein weiterer Grund ist die relativ ungenaue Methode zur Messung der Instrumenten- und Zieltafelhöhen mit einem Maßband. In der vierten Epoche wurden deshalb so genannte Freiberger Dreifüße mit definierter Höhe eingesetzt, sodass die manuelle Messung der Instrumenten- und Tafelhöhen entfiel. Der Erfolg dieser Maßnahme zeigt sich in den entsprechenden Ergebnissen für Epoche E4 und ist deshalb für weitere Messungen unbedingt zu empfehlen.

Der Einfluss der Registrierung auf die Ergebnisse der weiteren Auswertung wird in Kapitel 5.4.3 analysiert.

5.4.2 Blockpunkte und Epochenvergleiche

Nachdem die Punktwolken registriert wurden, folgte die weitere Umsetzung des im Flussdiagramm in Abbildung 4.1 dargestellten Ablaufs. Die nächsten Schritte verlaufen unabhängig von der Umsetzung an einem bestimmten Bauwerk immer gleich und werden daher hier nicht näher ausgeführt. Im Einzelnen waren dies:

- Die Zuordnung der registrierten Punkte zu den Blöcken des in Kapitel 5.2.2 definierten Models,
- die blockweise Filterung durch Ebenenschätzung sowie die Ableitung eines repräsentativen Punktes mit Kovarianzmatrix als Abschätzung der inneren Genauigkeit pro Block und Standpunkt (vgl. Kapitel 4.3.2, Formeln (4.28) bis (4.32)),
- die Genauigkeitsabschätzung der abgeleiteten Blockpunkte pro Standpunkt unter Berücksichtigung der stochastischen Informationen zu den geschätzten Transformationsparametern (vgl. Kapitel 4.3.3, Formeln (4.35) bis (4.39)),
- die gewichtete Mittelbildung der Ergebnisse der Standpunkte für die einzelnen Blöcke (vgl. Kapitel 4.3.3, Formel (4.40)).

Als Ergebnis dieser Auswerteschritte lag für jeden, pro Epoche mehrfach beobachteten, Block ein repräsentativer Punkt $\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}$ mit einer Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}}$ als Abschätzung seiner äußeren Genauigkeit vor:

$$\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{B_{i,j}} \\ \hat{y}_{B_{i,j}} \\ \hat{z}_{B_{i,j}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}} = \begin{bmatrix} \sigma^2_{\hat{x}_{B_{i,j}}} & \sigma_{\hat{x}_{B_{i,j}}\hat{y}_{B_{i,j}}} & \sigma_{\hat{x}_{B_{i,j}}\hat{z}_{B_{i,j}}} \\ \sigma_{\hat{y}_{B_{i,j}}\hat{x}_{B_{i,j}}} & \sigma^2_{\hat{y}_{B_{i,j}}} & \sigma_{\hat{y}_{B_{i,j}}\hat{z}_{B_{i,j}}} \\ \sigma_{\hat{z}_{B_{i,j}}\hat{x}_{B_{i,j}}} & \sigma_{\hat{z}_{B_{i,j}}\hat{y}_{B_{i,j}}} & \sigma^2_{\hat{z}_{B_{i,j}}} \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, ..., 59 \\ j = 1, 2, ..., 157 \end{matrix} . \tag{5.12}$$

In den folgenden Ausführungen werden zunächst die Genauigkeiten zu den geschätzten Blockpunkten bewertet bevor im Anschluss die Epochenvergleiche berechnet und analysiert werden.

Genauigkeitsbetrachtungen

In Abbildung 5.15 sind die Genauigkeiten der gemittelten Blockpunkte für jede Epoche dargestellt. Als Maß für die Genauigkeit der geschätzten Punktlage wurde jedem mehrfach beobachteten Block sein Helmert'scher Punktfehler $HPF_{i,j}$ nach Formel (5.13) zugeordnet.

$$HPF_{i,j} = \sqrt{\sigma^2_{\hat{x}_{B_{i,j}}} + \sigma^2_{\hat{y}_{B_{i,j}}} + \sigma^2_{\hat{z}_{B_{i,j}}}} \tag{5.13}$$

Unter jeder Teilgrafik finden sich neben der Epochenbezeichnung die Anzahl der dargestellten Blöcke N sowie der mittlere Punktfehler dieser Blöcke HPF*.

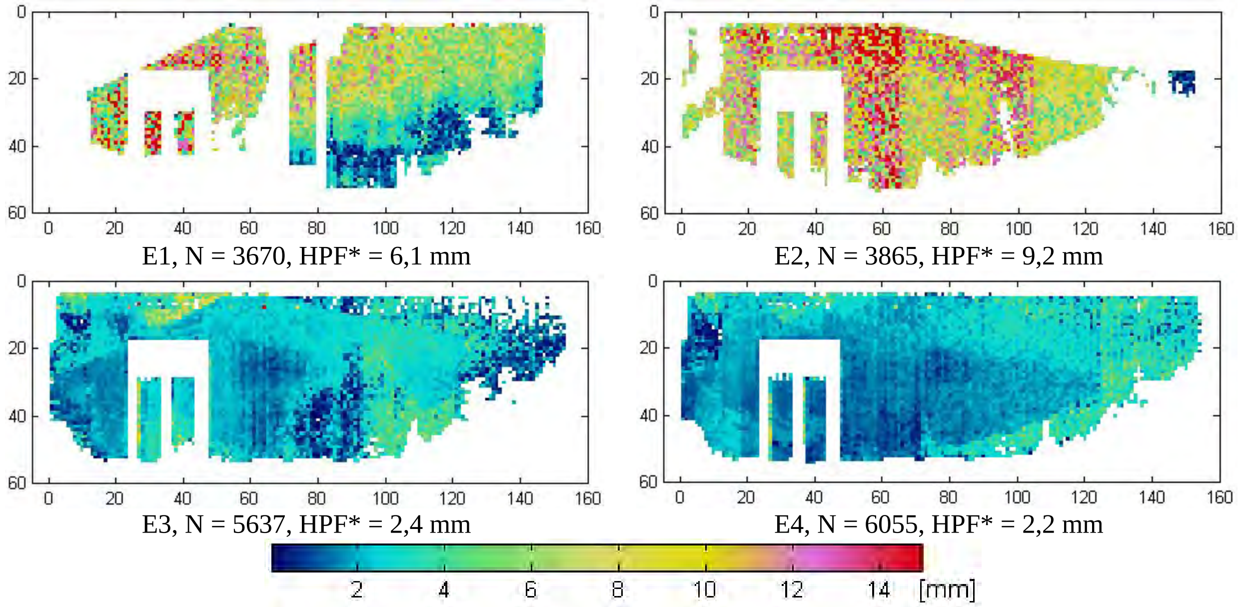


Abbildung 5.15: Helmert'scher Punktfehler für die gemittelten Blockpunkte der vier Epochen

Es ist eine deutliche Verbesserung bei den Epochen E3 und E4 gegenüber den beiden ersten Epochen zu erkennen. Die Anzahl der mehrfach bestimmten Blöcke hat sich erhöht, die Genauigkeit der abgeleiteten Punkte konnte insgesamt gesteigert werden und ist homogener über das Bauwerk verteilt. Diese Qualitätssteigerung erklärt sich durch die höhere Anzahl an Standpunkten und Zielpunkten bei der Registrierung der Epochen E3 und E4 und der damit verbundenen Verbesserung hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geschätzten Transformationsparameter.

Insbesondere die Ergebnisse für die Epochen E3 und E4 verdeutlichen das große Potential der vorgestellten Auswertemethode für die Bauwerksüberwachung mit TLS. Auf der Oberfläche des Bauwerks wurden mehr als 5500 reproduzierbare Punkte absolut im lokalen geodätischen Datum bestimmt. Das entspricht gegenüber der herkömmlichen, tachymetrischen Methode einer Steigerung um einen Faktor größer 1000. Somit können für den modellierten Bereich der Talsperre flächendeckend Bauwerksverformungen aufgezeigt werden, die mit der herkömmlichen Methode aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung nicht aufzudecken wären.

Vergleicht man die erzielten Genauigkeiten mit den Herstellerangaben des Scanners, zeigt sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung durch die gewählte Auswertemethode. Aus den in Tabelle 2.1 angegeben Standardabweichungen für die polaren Messelemente errechnet sich für einen Punkt in einer Entfernung von 100 m ($\varphi = 80$ gon, $\theta = 110$ gon) ein HPF von 7,2 mm für eine nicht kontrollierte und nicht reproduzierbare Einzelmessung. Für die Epochen E3 und E4 wurden reproduzierbare und durch mehrfache Bestimmung kontrollierte Punkte mit einem mittleren HPF von 2,4 bzw. 2,2 mm abgeleitet.

Gegenüber der tachymetrischen Bestimmung der fest vermarkten Objektpunkte sind die erzielten Genauigkeiten um den Faktor 2,5 schlechter (Tachymetrie: HPF = 1 mm). Die hochgenaue tachymetrische Einzelpunktbestimmung resultiert aus der Distanzmessung zu Reflektoren und der Richtungsmessung in zwei Lagen, wodurch die meisten Achsfehler eliminiert werden. Diese instrumentellen Vorteile können durch das vorgestellte Auswerteverfahren nur teilweise kompensiert werden.

Epochenvergleiche

Um die Bewegungen der Objektpunkte auf Signifikanz zu testen, wurde der Differenzvektor $\mathbf{d}_{i,j}^{(a,b)}$ zwischen den Blockpunkten zweier Epochen a und b auf Signifikanz getestet. Formel (5.14) zeigt hierzu den statistischen Test.

$$T = \left(\mathbf{d}_{i,j}^{(a,b)}\right)^T \left(\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}}^{(a,b)}\right)^{-1} \mathbf{d}_{i,j}^{(a,b)} \sim \chi_3^2 \Big| H_0, \quad \text{mit:} \quad \mathbf{d}_{i,j}^{(a,b)} = \hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}^{(b)} - \hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}^{(a)}, \quad \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}}^{(a,b)} = \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}}^{(a)} + \boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}\hat{\mathbf{x}}_{B_{i,j}}}^{(b)} \tag{5.14}$$

Für die anschließende Visualisierung der signifikanten Punktbewegungen werden in Abbildung die Abstände $ds_{i,j}^{(a,b)}$ zwischen den korrespondierenden Blockpunkten der beiden Epochen dargestellt. Diese berechnen sich wie folgt:

$$ds_{i,j}^{(a,b)} = \sqrt{\left(\hat{x}_{B_{i,j}}^{(b)} - \hat{x}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2 + \left(\hat{y}_{B_{i,j}}^{(b)} - \hat{y}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2 + \left(\hat{z}_{B_{i,j}}^{(b)} - \hat{z}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2}\,. \tag{5.15}$$

Um das Vorzeichen der Verschiebung zu ermitteln, wurde für jeden Punkt zu beiden Epochen die Strecke s zum Mittelpunkt des Ellipsoids berechnet, der durch die Parameter in Tabelle 5.3 definiert wurde:

$$\begin{aligned} s_{i,j}^{(a)} &= \sqrt{\left(\hat{x}_M - \hat{x}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2 + \left(\hat{y}_M - \hat{y}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2 + \left(\hat{z}_M - \hat{z}_{B_{i,j}}^{(a)}\right)^2} \\ s_{i,j}^{(b)} &= \sqrt{\left(\hat{x}_M - \hat{x}_{B_{i,j}}^{(b)}\right)^2 + \left(\hat{y}_M - \hat{y}_{B_{i,j}}^{(b)}\right)^2 + \left(\hat{z}_M - \hat{z}_{B_{i,j}}^{(b)}\right)^2} \end{aligned}\,. \tag{5.16}$$

Ist $s_{i,j}^{(a)}$ größer als $s_{i,j}^{(b)}$, so erhält $ds_{i,j}^{(a,b)}$ ein negatives Vorzeichen und umgekehrt.

Die signifikanten, orientierten Abstände zwischen den Blockpunkten sind für die fünf Epochenvergleiche in Abbildung zusammengefasst. Zu jedem Epochenvergleich aus TLS-Messungen ist unter der Grafik die Anzahl der signifikanten Abstände N angegeben. Auf der rechten Seite sind die Ergebnisse aus der tachymetrischen Auswertung dargestellt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die entsprechenden Differenzen ebenfalls mit dem Test aus Formel (5.14) auf Signifikanz überprüft. Die Ergebnisse weichen nur unwesentlich von den Ergebnissen der strengen Deformationsanalyse aus Kapitel 5.3 ab. Zur Verdeutlichung wurden in der grafischen Darstellung für jeden Punkt die neun umgebenen Blöcke eingefärbt. Zum Vergleich sind in Anhang B die Vergleiche aus Abbildung ohne vorherige Signifikanztests dargestellt.

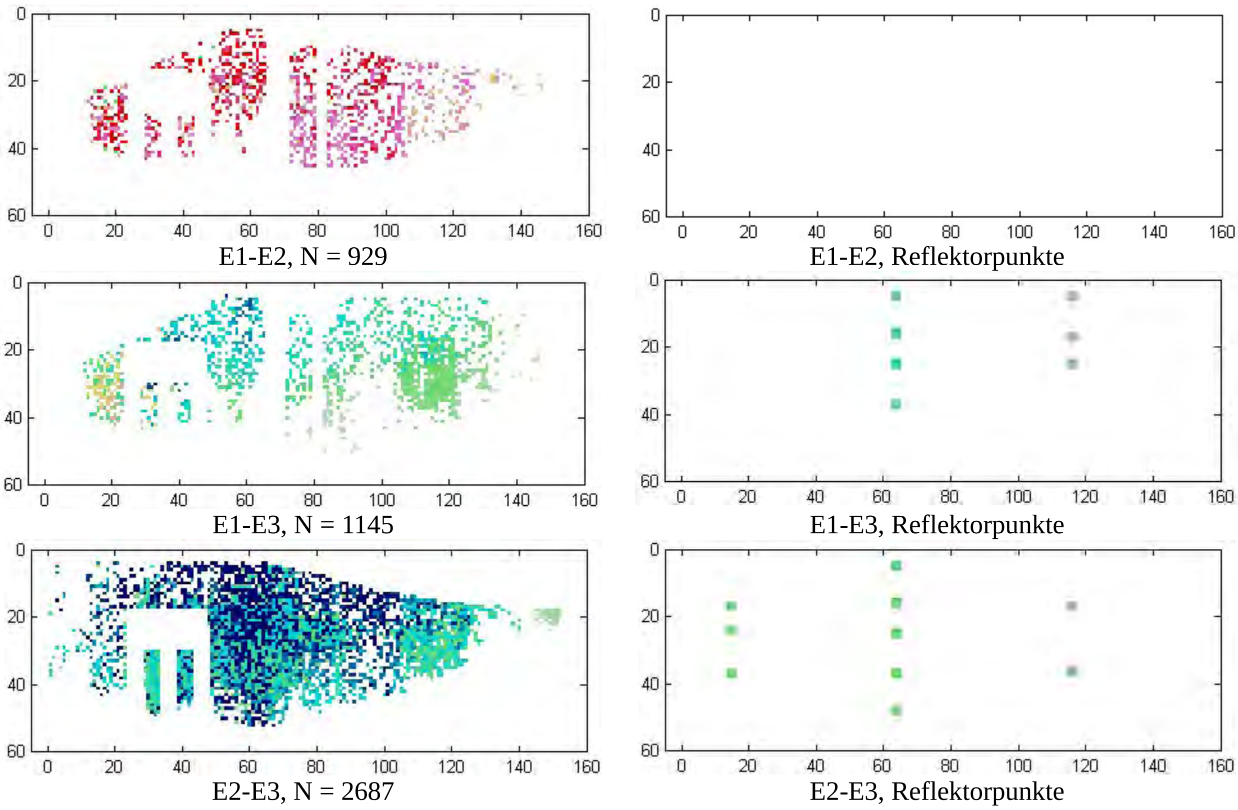


Abbildung 5.16: Epochenvergleiche, Laserscanning und Tachymetrie

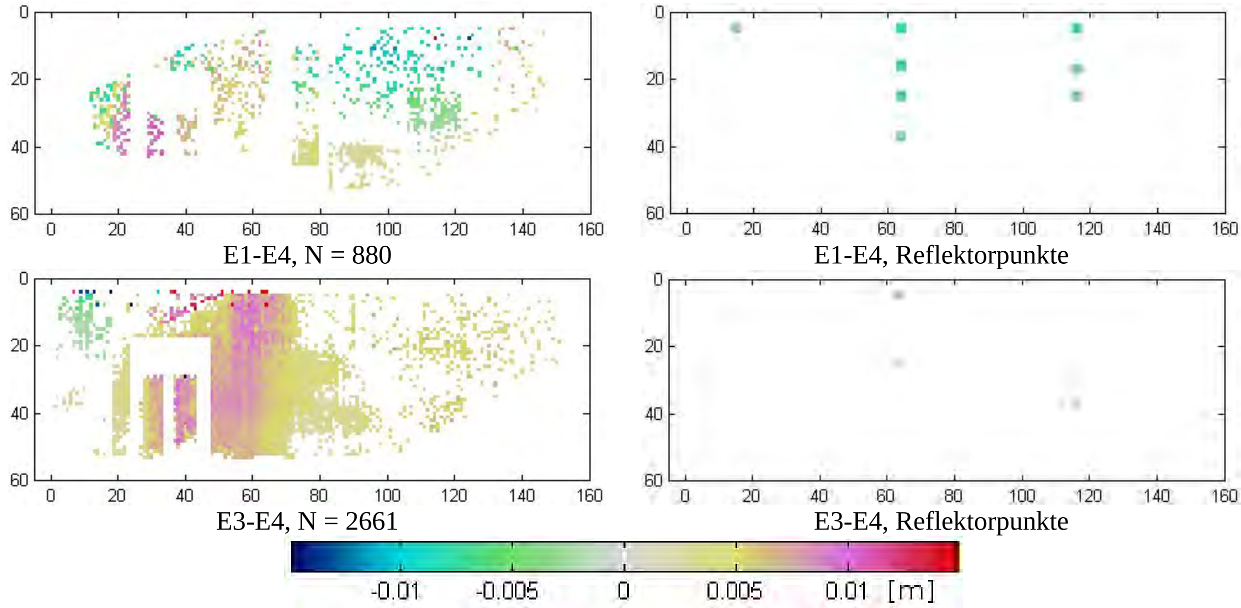


Abbildung 5.16: Epochenvergleiche, Laserscanning und Tachymetrie - Fortsetzung

Bewertung der Epochenvergleiche

Die aus den abgeleiteten Blockpunkten der TLS-Messungen berechneten Epochenvergleiche werden nach zwei Kriterien bewertet:

A) Sind die berechneten Punktbewegungen plausibel hinsichtlich ihrer Homogenität und ihrer räumlichen Verteilung auf der Talsperre?

Bei den ersten vier Vergleichen ist wenigstens eine der beiden Epochen E1 und E2 beteiligt. Bei diesen beiden Epochen ist die Genauigkeit und Anzahl der abgeleiteten Blockpunkte deutlich schlechter als bei den Epochen E3 und E4. Die betroffenen Epochenvergleiche zeigen ein fleckiges Bild, d.h. die abgeleiteten Punktbewegungen ändern sich sprunghaft zwischen benachbarten Punkten und sind daher als unplausibel und nicht realistisch zu bewerten. Besonders deutlich zeigt sich dies in den Vergleichen in Anhang B, die ohne Signifikanztest berechnet wurden.

Der fünfte Vergleich zwischen den Epochen E3 und E4 zeigt ein homogeneres Bild. Abgesehen von einzelnen Blöcken sind die Farben und damit die Bereiche ähnlicher Punktbewegungen flächiger verteilt und gehen fließend ineinander über. Zu den Bauwerksflanken hin werden die Beträge der Bewegungen kleiner und ihre Signifikanz nimmt ab. Nur in der Bauwerksmitte und an der Heberanlage zeigen sich bis hinunter zur Talsohle Bewegungen, die konstruktiv nicht plausibel sind.

B) Werden die Punktbewegungen in ihrer Größenordnung durch die Ergebnisse der tachymetrischen Messungen bestätigt?

Bei den ersten vier Epochen zeigen sich auch im Vergleich zu den tachymetrischen Ergebnissen starke Differenzen. Aber auch für den Vergleich zwischen den Epochen E3 und E4 sind die Beträge der signifikanten Punktbewegungen nicht plausibel. Sie zeigen Verschiebungen zwischen 4 und 10 mm, während die tachymetrischen Messungen nur minimale Punktverschiebungen kleiner als 3 mm beschreiben.

5.4.3 Ergebnisanalysen für die Epochen E3 und E4

Im Folgenden wird versucht die Ursachen für die Differenzen zwischen der tachymetrischen und der Lasercanning-Auswertung für den Vergleich der Epochen E3 und E4 zu finden und möglichst zu kompensieren. Die anderen Epochenvergleiche werden nicht weiter analysiert, da die Qualität der Epochen E1 und E2 offensichtlich nicht ausreichend ist.

Als mögliche Gründe für die Abweichungen kommen u.a. die in Abbildung 2.18 genannten Module bei der Datenerfassung mit TLS in Frage. Hierzu zählen insbesondere die Module Scanner, Atmosphäre und Objekt. Weitere Ursachen könnten in der gewählten Auswertemethodik (Registrierung, Modellbildung, Filterung, Ableiten der Blockpunkte) begründet sein.

Beim Modul Scanner könnten systematische Abweichungen auftreten, welche bei den in Kapitel 4.1 beschriebenen Untersuchungen nicht aufgedeckt wurden, bzw. nicht auftraten. Bei der Registrierung der Punktwolken für die Epochen

E3 und E4 zeigten sich jedoch in den Restklaffen nach der Einführung von Maßstab und/oder Nullpunktfehler für die Streckenmessung keine Systematiken. Für die Messungen der Talsperre wurden die abgeleiteten Blockpunkte mehrfach bestimmt und anschließend gewichtet gemittelt, um mögliche systematische Abweichungen aufzudecken. Bei den Epochen E3 und E4 traten hier keine Auffälligkeiten auf.

Zur Berücksichtigung des Moduls Atmosphäre wurden bei allen Messungen die aktuellen Werte für Lufttemperatur und Luftdruck bei der Steuersoftware des Scanners eingegeben. Es war allerdings nicht in Erfahrung zu bringen, welches Atmosphärenmodell für die Korrektur der Messwerte angewendet wird. Dieser Gesichtspunkt wurde für diese Arbeit nicht weiter verfolgt, sollte jedoch Bestandteil zukünftiger Untersuchungen sein.

Bezogen auf das Modul Objekt könnten mögliche Ursachen in der wechselnden Farbe und Feuchte der Talsperre (obere 75% hell und trocken, untere 25% dunkel und feucht) und in der rauen Oberflächenstruktur liegen. Diese Eigenschaften könnten sowohl die Richtungs- als auch die Streckenmessung beeinflussen. Hinsichtlich der Richtungsmessung wurde exemplarisch eine Untersuchung durchgeführt.

Es wurde ein Grenzwert von 50 gon für den Auftreffwinkel des Laserstrahls am Objekt in die Auswertung eingeführt (sonst: 15 gon). Hierzu wurde vor der gewichteten Mittelbildung für die Blockpunkte der einzelnen Standpunkte getestet, ob der räumliche Schnittwinkel zwischen dem Normalenvektor auf die geschätzte Ebene und dem Vektor zwischen Scanner und Blockpunkt kleiner als der Grenzwert ist. Anschließend wurden für die Epochen E3 und E4 die Mittel gebildet und der Epochenvergleich ohne Signifikanztest durchgeführt. In Abbildung 5.17 sind die Ergebnisse für die Grenzwerte 15 gon und 50 gon gegenübergestellt. Durch den höheren Grenzwert werden weniger Blöcke mehrfach bestimmt. Ansonsten sind keine Unterschiede in den Grafiken zu erkennen. Durch das Ergebnis kann allerdings nicht beurteilt werden, ob für die ausgewerteten Blöcke die Messwerte durch den Auftreffwinkel systematisch beeinflusst werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

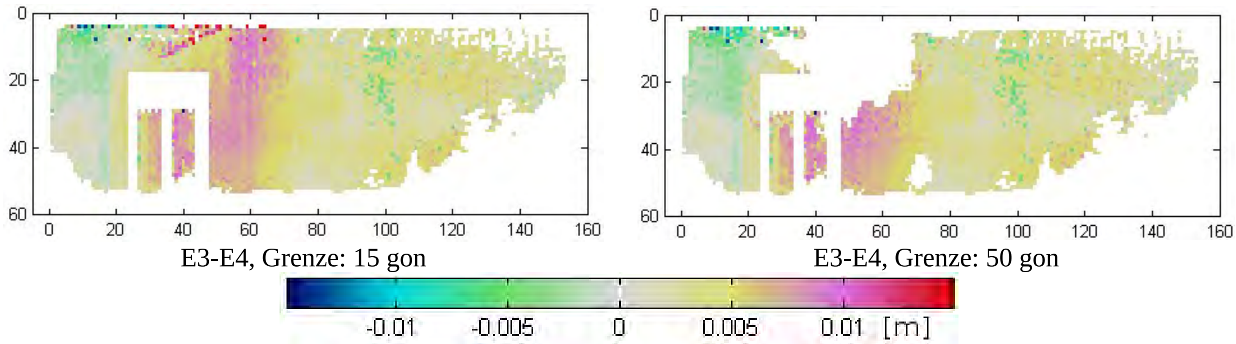


Abbildung 5.17: Einfluss des Auftreffwinkels auf das Ergebnis des Epochenvergleichs

Für eine weiterführende Analyse der Differenzen wurden für die Epochen E3 und E4 die orientierten Abstände $ds_{i,j}^{(p,q)}$ nach Formel (5.15) zwischen den abgeleiteten Blockpunkten der Standpunkte p und q einer Epoche berechnet. Unter der Annahme, dass sich die Staumauer zwischenzeitlich nicht verformt hat, ist der Erwartungswert für diese Differenzen gleich Null. In Abbildung sind vier Standpunktvergleiche der Epochen E3 und E4 gegenübergestellt. Zu jedem Vergleich ist als Maß für die mittlere Abweichung zwischen den Blockpunkten die Standardabweichung s0 aller berechneten Abstände angegeben.

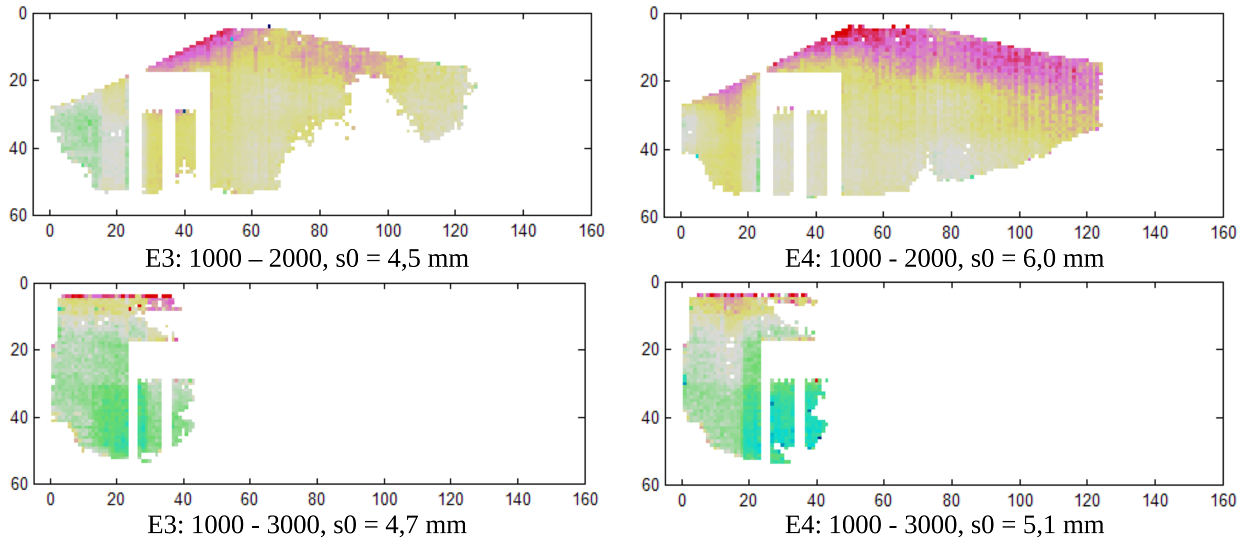


Abbildung 5.18: Differenzen zwischen den Blockpunkten der Standpunkte zu den Epochen E3 und E4

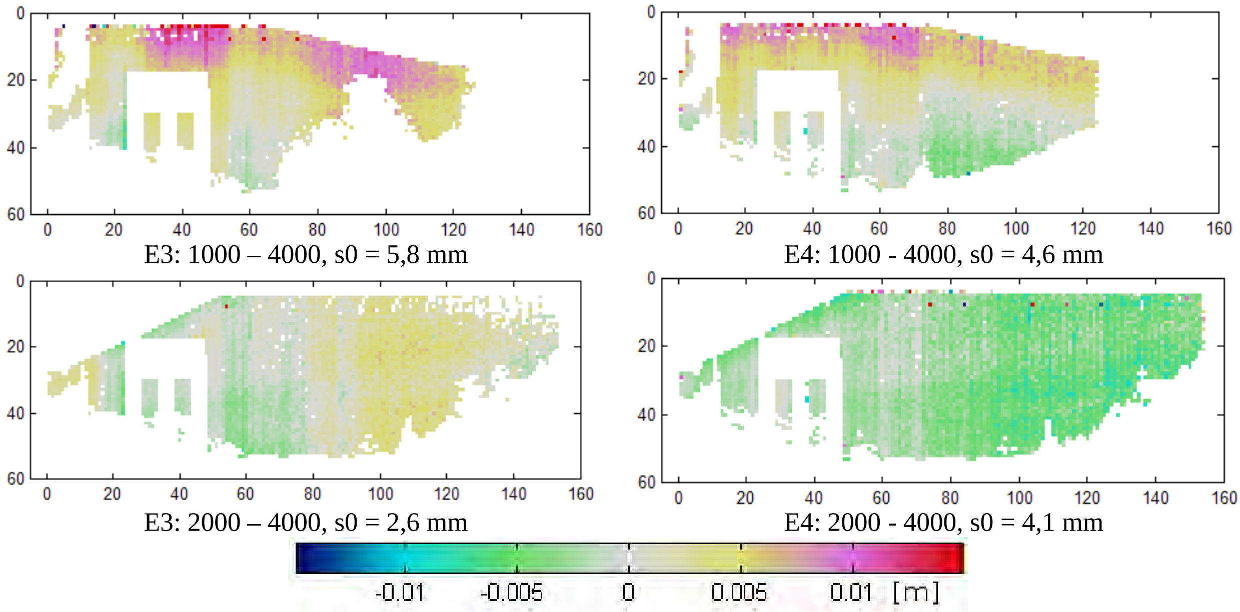


Abbildung 5.18: Differenzen zwischen den Blockpunkten der Standpunkte zu den Epochen E3 und E4 - Fortsetzung

Würden keine systematischen Abweichungen in den Ergebnissen vorliegen, wären in den obigen Grafiken vorwiegend grau/weiße Bereiche zu erkennen und der Wert s0 wäre für alle Vergleiche Null. Stattdessen zeigen sich große farbige Flächen und der Wert für s0 liegt im Mittel bei ca. 5 mm.

Zwischen den entsprechenden Vergleichen der beiden Epochen gibt es auffällige Ähnlichkeiten. Die auftretenden Muster ähneln sich in Form und Farbe. D. h. es treten bei beiden Epochen die nahezu gleichen Differenzen an den gleichen Stellen der Mauer auf. Nur beim letzten Vergleich (2000 – 4000) unterscheiden sich im rechten Bereich der Mauer die Differenzen zwischen den Epochen deutlich.

Die bei drei der vier berechneten Vergleiche gezeigten Ähnlichkeiten in den Differenzen zwischen den Standpunkten deuten darauf hin, dass die Abweichungen nicht zufällig sind, sondern von der jeweiligen Konfiguration an den Standpunkten abhängen. Zu diesen pro Epoche wiederkehrenden Konfigurationen zählen z. B. die Streckenlängen und Auftreffwinkel zu den gleichen Oberflächenelementen mit den gleichen Oberflächeneigenschaften sowie die nahezu identischen Zielpunktkonstellationen bei der Registrierung.

Falls die systematischen Abweichungen zwischen den Standpunkten einer Epoche tatsächlich eine Folge der jeweiligen Messkonfiguration ist, stellt sich die Frage, ob die Differenzen reproduzierbar sind und somit bei der Auswertung berücksichtigt werden könnten. Um diese Frage zumindest teilweise beantworten zu können, wird im nächsten Kapitel eine alternative Registrierung der gemessenen Punktwolken durch eine ICP-Lösung beschrieben und ausgewertet.

5.4.4 Standpunktverknüpfung mit ICP

Um eine mögliche Erklärung für die in Abbildung dargestellten systematischen Abweichungen zwischen den Blockpunkten verschiedener Standpunkte einer Epoche zu finden, wurden die Punktwolken der Epochen E3 und E4 alternativ über ein ICP-basiertes Verfahren verknüpft. ICP-Algorithmen nutzen die Objektgeometrie für die Schätzung der Transformationsparameter. Sie wurden in Kapitel 2.2.3 kurz eingeführt. Für die Standpunkte der Epochen E3 und E4 kam hierzu die Software Cyclone zum Einsatz. Die Berechnungen wurden durch Mitarbeiter von Prof. Dr. Staiger (Hochschule Bochum) durchgeführt.

Die Software Cyclone nutzt für die Verknüpfung der Standpunkte über ICP eine Punktwolke als so genannten Homescan. Die anderen Punktwolken werden durch die Software bestmöglich an den Homescan angepasst. Hierzu müssen vorab alle störenden Elemente aus den Punktwolken entfernt werden, und die Näherungswerte für die zu schätzenden Transformationsparameter vorliegen. Da in diesem Beispiel die bereits registrierten und dem Blockgittermodell zugeordneten Punktwolken verwendet wurden, konnte der vorbereitende Aufwand minimiert werden.

Als Homescan wurde für beide Epochen die registrierte Punktwolke von Standpunkt 4000 verwendet. Nach der Verknüpfung und der Ableitung der Blockpunkte je Standpunkt wurden die Vergleiche aus Abbildung erneut gerechnet. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5.19.

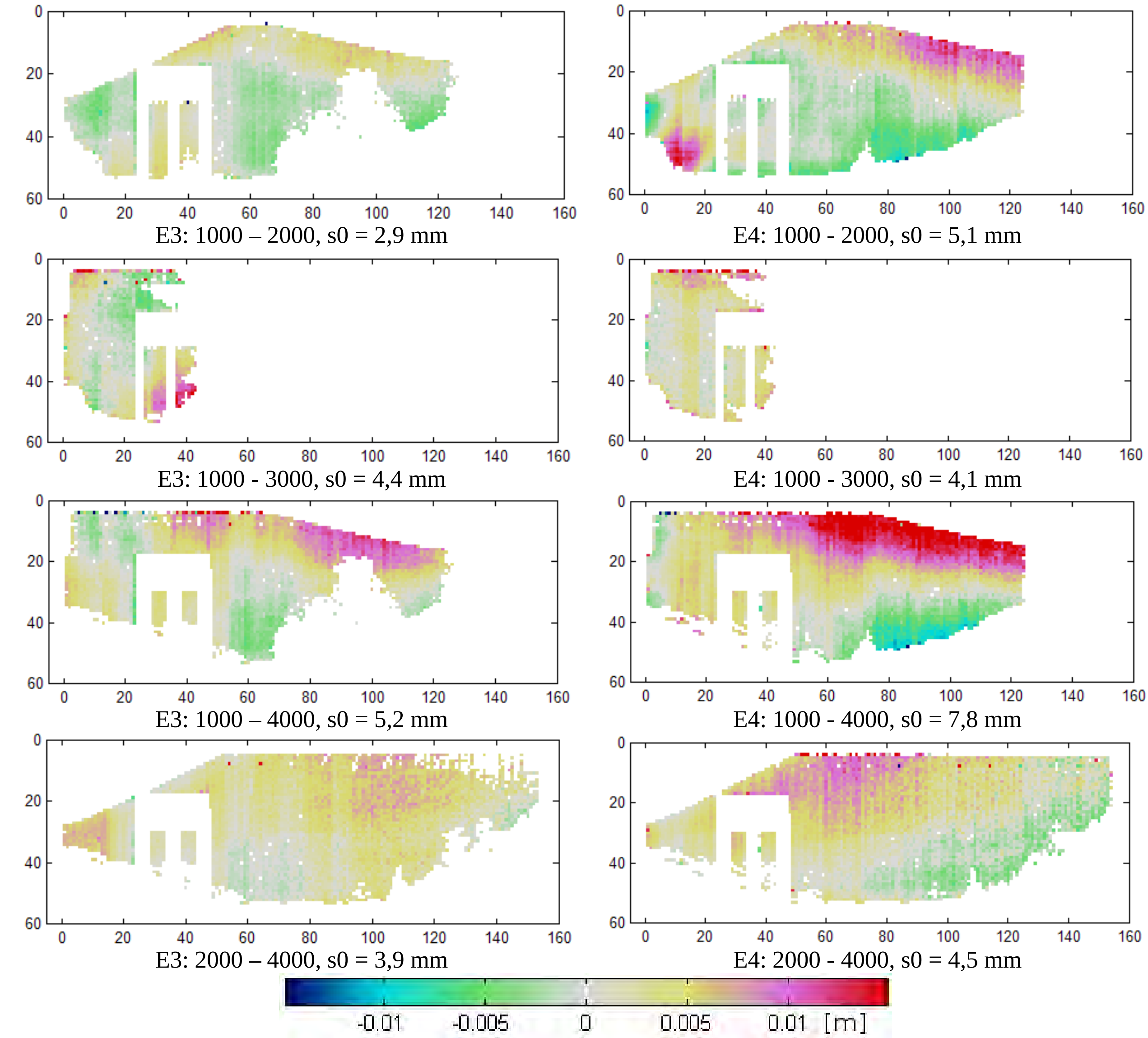


Abbildung 5.19: Differenzen zwischen den Blockpunkten der Standpunkte zu den Epochen E3 und E4 (ICP)

Die Grafiken in Abbildung 5.19 weisen ebenfalls vergleichbare Muster zwischen den Epochen auf. Zudem ähneln sich die Verteilung und Ausprägung der Differenzen zwischen den beiden Registrierungsmethoden (vgl. Abbildung) bei Epoche E3 sehr. Bei Epoche E4 treten diese Ähnlichkeiten auch auf, aber weniger stark ausgeprägt.

Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass der Großteil der systematischen Abweichungen zwischen den Standpunkten einer Epoche nicht durch die Registrierung erklärt werden kann. Es bleibt zukünftigen Arbeiten vorbehalten zu untersuchen, ob die Objektoberfläche und die geometrische Konstellation bei den jeweiligen Standpunkten die wesentlichen Einflussfaktoren sind und ob diese reproduziert werden können.

Vergleich der Registrierung über identische Punkte - ICP

Im Folgenden werden die Ergebnisse der beiden Registrierungsarten miteinander verglichen. Hierdurch soll geklärt werden, ob die Verknüpfung der Punktwolken mit ICP eine Alternative bzw. Ergänzung zu der Registrierung über Zielmarken für die Anwendung an der Okertalsperre darstellt.

Bei der Registrierung der Punktwolken für die absolute Bauwerksüberwachung sind zwei Aspekte entscheidend:

- Die Verknüpfung der Punktwolken mit möglichst geringen Differenzen am zu untersuchenden Objekt,
- die Anbindung an das lokale geodätische Datum (Referenzierung).

Für den ersten Gesichtspunkt lassen sich die Ergebnisse der beiden Methode gut anhand der Grafiken und dem Maß für die mittlere Abweichung zwischen den Blockpunkten s0 in Abbildung und Abbildung 5.19 beurteilen. Die Werte für s0 unterscheiden sich nur geringfügig. Nach beiden Ansätzen liegt s0 durchschnittlich bei ca. 5 mm.

Hinsichtlich des zweiten Gesichtspunktes geben die Restklaffen an den identischen Punkten Aufschluss darüber, wie gut die Anbindung an das lokale geodätische Datum ist. In Anhang C sind die Transformationsparameter und die Restklaffen für die Standpunkte 1000, 2000 und 3000 der beiden Methoden gegenübergestellt. Auf die Darstellung der Ergebnisse von Punkt 4000 konnte verzichtet werden, da dieser mit identischen Transformationsparametern als Homescan in Cyclone verwendet wurde. Die Restklaffen nach der Transformation der identischen Punkte mit den entsprechenden Transformationsparametern sind deutlich größer als bei der Registrierung über Zielmarken. Dies könnte daran liegen, dass die Oberfläche der Staumauer kaum räumliche Strukturen aufweist und sich ihre Krümmung wenig ändert. Unter diesen speziellen Bedingungen können bei Verknüpfungen der Punktwolken mit ICP Verschiebungen entlang der Objektoberfläche auftreten.

Aus diesen Gründen stellt eine reine ICP-Lösung keine sinnvolle Alternative für die Registrierung der Punktwolken dar. Zukünftige Untersuchungen sollten eine Kombination der Registrierung über Zielmarken mit ICP-Algorithmen beinhalten. Durch einen solchen Ansatz könnten sich beide Verfahren ergänzen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Registrierung zu steigern.

An dieser Stelle sind für diese Arbeit die Anwendung und Analyse der entwickelten Methode zur Bauwerksüberwachung mit TLS an der Okertalsperre abschließend behandelt. Die Ergebnisse und offenen Fragen werden im folgenden Kapitel nochmals zusammenfassend behandelt.

6 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein methodischer Ansatz zur absoluten Bauwerksüberwachung mit terrestrischem Laserscanning entwickelt. Die Methode wurde an der Okertalsperre im Harz getestet. Im Folgenden wird zunächst ein allgemeines Fazit gezogen, bevor die Ergebnisse der praktischen Erprobung zusammenfassend diskutiert werden. Anschließend wird ein Ausblick auf mögliche Arbeitsschritte für die Zukunft gegeben.

6.1 Fazit

Für die vorliegende Arbeit kann ein positives Fazit gezogen werden. Wie im Folgenden erläutert wird, wurden die zu Beginn formulierten Ziele erreicht und die Praxistauglichkeit der entwickelten Methode wurde bei der Erprobung an der Okertalsperre gezeigt.

Die Methode für die absolute Bauwerksüberwachung mit TLS ist allgemein formuliert, sodass sie für das jeweils zu überwachende Objekt adaptiert werden kann. Der wesentliche Arbeitsschritt liegt dabei in der Definition des Blockgittermodells, das mithilfe einer geeigneten Modellierung des Bauwerks erstellt wird. Eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung absoluter Deformationen ist die örtliche Existenz eines dauerhaften, wiederholbaren, absoluten, räumlichen Bezugssystems. Hierzu kann beispielsweise ein lokales geodätisches Datum durch ein Netz von Vermessungspfeilern realisiert werden, dessen räumliche Stabilität durch regelmäßige Deformationsanalysen nachgewiesen wird.

Wenn das Blockgitter einmal definiert ist, verläuft die weitere Auswertung registrierter Punktwolke mit der entwickelten Methode für jede neue Epoche weitgehend automatisch ab. Die Auswertung beinhaltet die redundante Bestimmung der abgeleiteten Blockpunkte. Dadurch können systematische Effekte in den Ergebnissen aufgedeckt werden, wie bei der praktischen Erprobung in Kapitel 5.4.3 gezeigt wurde.

Im Laufe der Arbeit wurden vier Anforderungen an eine Bauwerksüberwachung mit TLS entwickelt, mit denen aktuelle und zukünftige Ansätze vergleichbar bewertet werden können und welche die Grundlage für die Entwicklung der hier vorgestellten Methode waren (vgl. Kapitel 3.2).

Für die praktische Erprobung der Methode an der Okertalsperre im Harz wurde ein Ellipsoid als bestanpassende quadratische Form identifiziert und damit das Blockgittermodell für den Hauptteil der Talsperre entwickelt. Es wurden zu vier Epochen Scanner-Messungen mit einem Trimble GX 3D durchgeführt. Bei der Auswertung der Messungen zeigte sich, dass in den ersten beiden Epochen die Anzahl der Standpunkte und der identischen Punkte für die Registrierung nicht ausreichte, um die angestrebte Genauigkeit und Abdeckung der Mauer zu erreichen. Daher wurden ab der dritten Epoche zusätzliche Zielpunkte ins Netz eingebunden und die Anzahl der Standpunkte auf vier erhöht. Mit dieser Konfiguration wurden in den letzten beiden Epochen die folgenden Ergebnisse erzielt.

Die bei der Registrierung geschätzten Kalibrierparameter bestätigten die Werte der zeitnah durchgeführten Kalibrierungen. Die bei der Registrierung geschätzten Varianzkomponenten für die polaren Messelemente entsprachen den Herstellerangaben für den Scanner. Es konnten die Koordinaten von ca. 6000 Punkten überbestimmt im lokalen Datum der Talsperre geschätzt werden. Dadurch wurde eine nahezu flächenhafte Abdeckung der Staumauer erreicht. Die mittlere Genauigkeit der abgeleiteten Punkte, ausgedrückt als Helmert'scher Punktfehler, lag mit 2,4 bzw. 2,2 mm um einen Faktor drei besser als die Einzelpunktgenauigkeit des eingesetzten Scanners.

Der Vergleich der beiden letzten Epochen E3 und E4 weist für größere Bereiche der Mauer unplausible Deformationen auf. Eine Analyse der pro Standpunkt abgeleiteten Blockpunkte zeigte systematische Abweichungen zwischen den Standpunkten der jeweiligen Epoche von durchschnittlich 5 mm, deren Muster sich für beide Epochen auffällig ähnelten. Diese Ähnlichkeiten in den Abweichungen deuten auf eine systematische Beeinflussung der Ergebnisse durch die wiederkehrende geometrische Konfiguration der Messungen und die Reflexionseigenschaften des Bauwerks hin.

Um eine mögliche Erklärung für die systematischen Abweichungen zu finden, wurden die Punktwolken der Epochen E3 und E4 alternativ über ein ICP-basiertes Verfahren verknüpft. Dadurch konnte keine Verbesserung erzielt werden. Die Abweichungen zwischen den Standpunkten waren für beide Epochen in ihrer Größenordnung und Verteilung auf der Maueroberfläche vergleichbar mit den Ergebnissen nach der Registrierung über identische Punkte. Eine nachträgliche Berechnung der Restklaffen an den identischen Punkten mit den Transformationsparametern aus der ICP-Lösung zeigte deutlich höhere Werte als mit bei der ursprünglichen Lösung erzielt wurden, sodass die Anbindung an das lokale geodätische Datum nicht mehr gewährleistet war.

6.2 Ausblick und offene Fragen

An dieser Stelle soll abschließend aufgezeigt werden, wie die entwickelte Methode zukünftig optimiert werden kann und worin die offenen Fragen bestehen.

Hinsichtlich der messtechnischen Umsetzung ist eine Automatisierung der Scanner-Messungen anzustreben, um die Messdauer und den manuellen Aufwand zu reduzieren. Dies ist ohne großen Aufwand möglich. Durch die epochenweise wiederkehrende Konfiguration könnten je Standpunkt sowohl die Messungen der Zielmarken als auch des Objekts nach einer manuellen oder sensorgestützten Vororientierung des Scanners vollautomatisiert ablaufen. Die Umbauten zwischen den Standpunkten werden auch zukünftig manuell erfolgen müssen.

Für die Registrierung der Punktwolken ist ein kombinierter Ansatz von identischen Punkten für die Anbindung an das lokale geodätische Datum und flächenbasierten Methoden für eine optimale Ausnutzung der gescannten Objektgeometrie anzustreben. Die Herausforderungen liegen dabei in der Abstimmung des stochastischen Modells und bei vergleichsweise glatten Oberflächen mit geringen Krümmungsänderungen in der optimalen Wahl für die Zielfunktion des flächenbasierten Ansatzes.

Für das Beispiel der Okertalsperre lassen die Ergebnisse der Epochen E3 und E4 einen reproduzierbaren Einfluss der Oberflächeneigenschaften auf die Koordinaten der abgeleiteten Blockpunkte vermuten. Daher sollte untersucht werden, ob die systematischen Abweichungen durch geeignete Anpassungen des funktionalen und des stochastischen Modells der Auswertung minimiert werden können.

Die vorgestellte Auswertemethode leitet aus den flächenhaften Scannerdaten reproduzierbare Punkte für einen Epochenvergleich ab. Dadurch wird die klassische, punktorientierte Auswertestrategie der Ingenieurgeodäsie weiter verfolgt. Zu Beginn dieser Arbeit wurde darauf hingewiesen, dass für eine flächenbasierte Auswertung eine epochenweise wiederkehrende, schwierig zu automatisierende Modellierung des Objekts notwendig ist. Es sollte untersucht werden, ob hierzu der vorgestellte Ansatz weiterentwickelt werden kann. Bisher liegen nach der Auswertung für jeden mehrfach gescannten Block ein reproduzierbarer Punkt mit einer äußeren Genauigkeit und eine lokal bestanpassende Raumebene als Ergebnisse vor. Durch eine Einbeziehung der benachbarten Blöcke, lokale Filterungen mit polynomialen Flächen und definierten Stetigkeitsbedingungen für den Übergang zwischen den Blöcken könnte eine bestanpassende NURBS-ähnliche Modellierung automatisiert entwickelt werden. Dieses Objektmodell könnte als Eingangsgröße für einen flächenbasierten Epochenvergleich verwendet werden.

Anhang A Ergebnisse der Registrierung mit Zielmarken

Epoche E1 (21.09.2006)

Tabelle A.1: Signifikanztests der Modellerweiterungen für Epoche E1

Bezeichnung	Ausgangsmodell	Erweiterung um	Testgröße	Quantil, α = 5%	Entscheidung
A	ohne m, ohne k_0	m	22,71	4,60	signifikant
B	mit m, ohne k_0	k_0	2,74	4,67	nicht signifikant
C	ohne m, ohne k_0	k_0	22,48	4,60	signifikant
D	ohne m, mit k_0	m	5,50	4,67	signifikant

Tabelle A.2: Transformationsparameter für Epoche E1

Standpunkt	Parameter		Standard-abweichung	Auswirkung in 100 m Entfernung in [mm]
2000	X_0	99,994 m	0,8 mm	0,8
	Y_0	265,578 m	0,7 mm	0,7
	Z_0	102,536 m	1,4 mm	1,4
	r_x	-0,007 gon	1,9 mgon	2,8
	r_y	0,008 gon	2,5 mgon	3,6
	r_z	57,109 gon	0,6 mgon	0,9
4000	X_0	51,850 m	1,1 mm	1,1
	Y_0	263,161 m	1,1 mm	1,1
	Z_0	135,001 m	1,8 mm	1,8
	r_x	-0,004 gon	3,2 mgon	4,7
	r_y	-0,010 gon	3,8 mgon	5,5
	r_z	58,315 gon	1,3 mgon	1,5

Tabelle A.3: Punktbezogene Restklaffen für Epoche E1

Standpunkt	Zielpunkt	x [mm]	y [mm]	z [mm]
2000	1000	0,6	0,0	-6,5
	2000	-1,0	0,5	-0,3
	3000	0,3	-0,6	6,5
	4000	-2,8	-0,2	-2,3
	10000	-0,1	1,0	2,9
4000	1000	-1,2	0,6	-5,7
	3000	-0,4	-1,0	6,9
	4000	0,4	-1,5	-0,1
	8000	0,7	1,6	-2,1

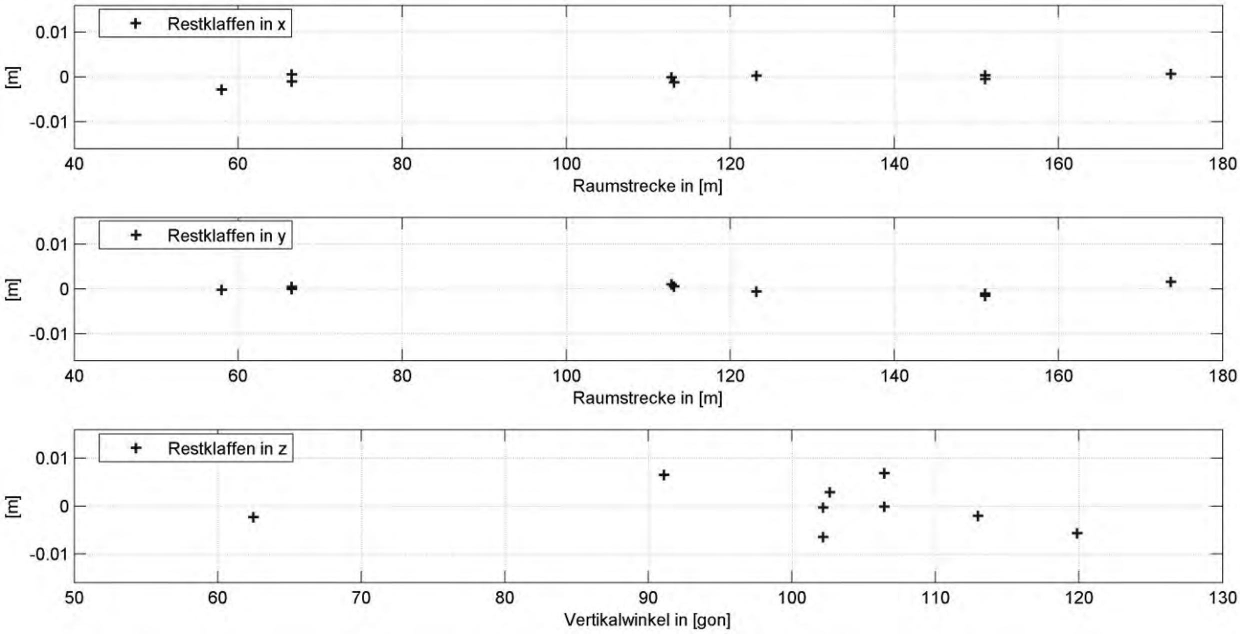


Abbildung A.1: Restklaffen gegenüber der Raumstrecke (x,y) und dem Vertikalwinkel (z) für Epoche E1

Epoche E2 (29/30.11.2006)

Tabelle A.4: Signifikanztests der Modellerweiterungen für Epoche E2

Bezeichnung	Ausgangsmodell	Erweiterung um	Testgröße	Quantil, α = 5%	Entscheidung
A	ohne m, ohne k_0	m	4,27	4,18	signifikant
B	mit m, ohne k_0	k_0	4,14	4,20	nicht signifikant
C	ohne m, ohne k_0	k_0	8,84	4,18	signifikant
D	ohne m, mit k_0	m	0,26	4,20	nicht signifikant

Tabelle A.5: Transformationsparameter für Epoche E2

Standpunkt	Parameter		Standard-abweichung	Auswirkung in 100 m Entfernung in [mm]
1000	X_0	152,480 m	0,9 mm	0,9
	Y_0	224,798 m	0,7 mm	0,7
	Z_0	100,489 m	1,7 mm	1,7
	r_x	-0,001 gon	1,9 mgon	3,5
	r_y	-0,000 gon	2,5 mgon	3,9
	r_z	-93,442 gon	1,3 mgon	2,5
2000	X_0	99,993 m	0,8 mm	0,8
	Y_0	265,579 m	1,0 mm	1,0
	Z_0	102,539 m	1,5 mm	1,5
	r_x	0,004 gon	2,5 mgon	4,4
	r_y	0,000 gon	2,5 mgon	4,0
	r_z	187,890 gon	1,9 mgon	3,1
4000	X_0	51,852 m	1,0 mm	1,0
	Y_0	263,160 m	1,0 mm	1,0
	Z_0	134,999 m	1,9 mm	1,9
	r_x	-0,006 gon	2,5 mgon	4,3
	r_y	0,000 gon	3,2 mgon	5,4
	r_z	-77,065 gon	1,9 mgon	3,1

Tabelle A.6: Punktbezogene Restklaffen für Epoche E2

Standpunkt	Zielpunkt	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1000	1000	-0,1	-1,1	1,2
	2000	1,4	1,1	-0,2
	3000	-2,0	1,2	0,7
	4000	5,3	9,7	4,7
	8000	7,3	-3,6	-2,3
	10000	5,5	-9,8	-4,3
2000	1000	3,1	3,7	-3,5
	2000	-0,5	0,6	1,6
	3000	-0,8	-0,2	3,2
	4000	-0,8	8,6	-0,7
	10000	-2,3	0,5	-2,4
4000	1000	-4,3	-4,6	-8,7
	3000	-3,4	-4,6	8,3
	4000	-0,4	-1,0	1,0
	8000	7,2	0,7	9,2
	10000	5,0	2,9	-7,8

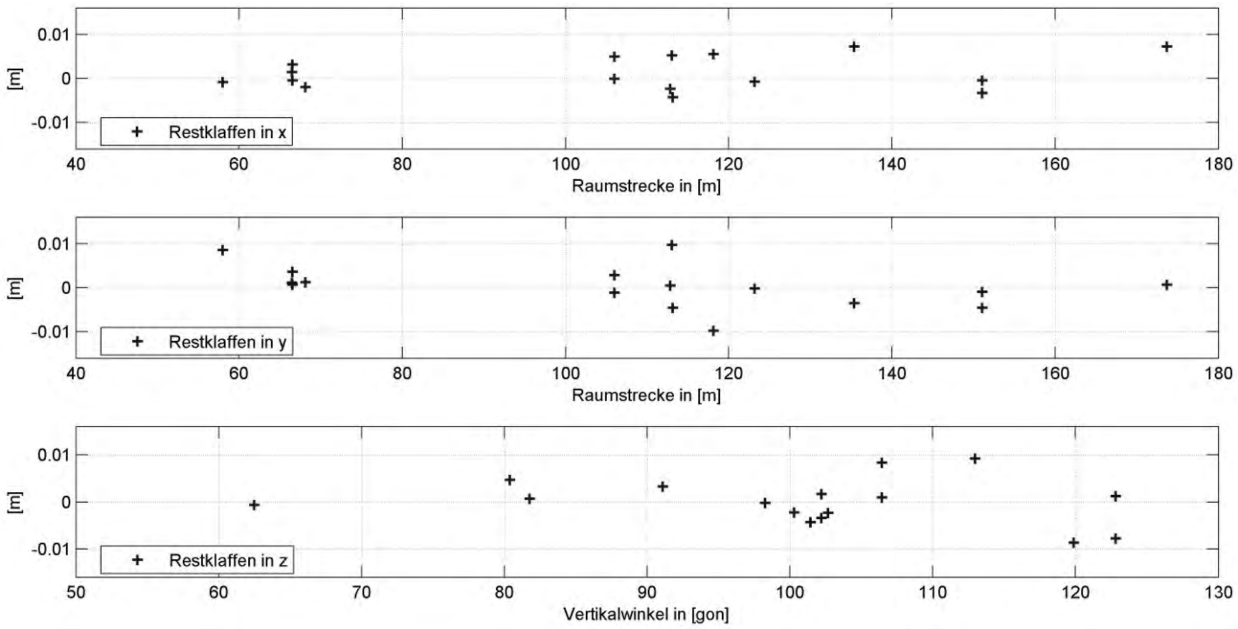


Abbildung A.2: Restklaffen gegenüber der Raumstrecke (x,y) und dem Vertikalwinkel (z) für Epoche E2

Epoche E3 (04/05.07.2007)

TabelleA.7: Signifikanztests der Modellerweiterungen für Epoche E3

Bezeichnung	Ausgangsmodell	Erweiterung um	Testgröße	Quantil, α = 5%	Entscheidung
A	ohne m, ohne k_0	m	15,68	4,00	signifikant
B	mit m, ohne k_0	k_0	6,21	4,00	signifikant
C	ohne m, ohne k_0	k_0	3,16	4,00	nicht signifikant
D	ohne m, mit k_0	-	-	-	-

Tabelle A.8: Transformationsparameter für Epoche E3 (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Standpunkt	Parameter		Standard-abweichung	Auswirkung in 100 m Entfernung in [mm]
1000	X_0	152,480 m	0,7 mm	0,7
	Y_0	224,798 m	0,5 mm	0,5

	Z_0	100,486 m	1,3 mm	1,3
	r_x	0,004 gon	2,5 mgon	3,7
	r_y	0,015 gon	2,5 mgon	3,9
	r_z	-19,772 gon	1,2 mgon	1,5
2000	X_0	99,992 m	0,5 mm	0,5
	Y_0	265,581 m	0,7 mm	0,7
	Z_0	102,533 m	1,1 mm	1,1
	r_x	0,011 gon	1,9 mgon	3,2
	r_y	0,005 gon	2,5 mgon	3,7
	r_z	30,348 gon	1,2 mgon	1,5
3000	X_0	161,204 m	0,7 mm	0,7
	Y_0	160,058 m	0,5 mm	0,5
	Z_0	119,963 m	1,5 mm	1,5
	r_x	-0,006 gon	2,5 mgon	3,9
	r_y	-0,039 gon	2,5 mgon	4,4
	r_z	-119,800 gon	1,2 mgon	1,5
4000	X_0	51,854 m	0,6 mm	0,6
	Y_0	263,159 m	0,8 mm	0,8
	Z_0	134,999 m	1,6 mm	1,6
	r_x	0,004 gon	2,5 mgon	3,9
	r_y	-0,001 gon	2,5 mgon	3,8
	r_z	40.990 gon	1,2 mgon	1,6

Tabelle A.9: Punktbezogene Restklaffen für Epoche E3

Standpunkt	Zielpunkt	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1000	10	2,0	3,0	-3,1
	1000	-1,8	0,3	2,4
	2000	-2,3	-3,5	3,8
	3000	-0,3	0,3	0,2
	4000	-0,3	0,1	-0,1
	8000	-1,2	1,0	1,2
	10000	-0,5	1,3	-10,3
2000	20	0,6	0,3	-2,0
	30	-3,0	3,8	11,0
	1000	-0,5	0,2	-3,1
	2000	0,0	-1,7	3,7
	3000	0,5	1,7	7,7
	4000	2,4	-0,8	2,8
	10000	-3,7	2,3	-6,7
3000	10	1,9	-0,8	15,7
	1000	0,6	-0,6	-3,8
	2000	-0,5	0,3	4,2
	3000	-2,3	0,8	0,1
	4000	4,6	2,7	4,8
	8000	2,2	-5,0	5,7
	10000	2,0	1,0	-9,4
4000	10	0,6	0,8	1,9
	20	0,2	3,6	-3,4
	30	-0,1	2,6	6,5
	1000	0,4	8,8	-6,5
	3000	-4,0	-7,2	16,7
	4000	-2,7	0,5	0,1
	8000	-0,1	-2,0	8,7
	10000	-6,3	1,1	-5,4

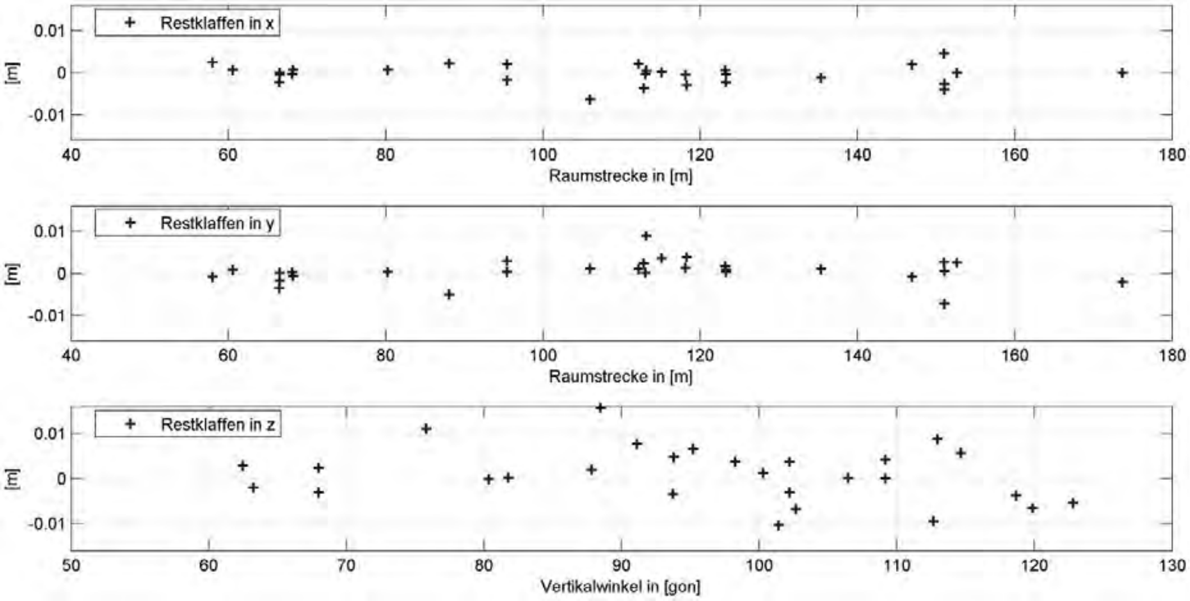


Abbildung A.3: Restklaffen gegenüber der Raumstrecke (x,y) und dem Vertikalwinkel (z) für Epoche E3

Epoche E4 (11/12.09.2007)

Tabelle A.10: Signifikanztests der Modellerweiterungen für Epoche E4

Bezeichnung	Ausgangsmodell	Erweiterung um	Testgröße	Quantil, α = 5%	Entscheidung
A	ohne m, ohne k_0	m	35,71	3,97	signifikant
B	mit m, ohne k_0	k_0	1,77	3,98	signifikant
C	ohne m, ohne k_0	k_0	17,70	3,97	nicht signifikant
D	ohne m, mit k_0	m	16,34	3,98	signifikant

Tabelle A.11: Transformationsparameter für Epoche E4 (Fortsetzung auf der nächsten Seite)

Standpunkt	Parameter		Standard-abweichung	Auswirkung in 100 m Entfernung in [mm]
1000	X_0	152,480 m	0,7 mm	0,7
	Y_0	224,797 m	0,6 mm	0,6
	Z_0	100,499 m	1,1 mm	1,1
	r_x	-0,017 gon	1,3 mgon	1,9
	r_y	-0,005 gon	1,3 mgon	2,3
	r_z	171,718 gon	0,6 mgon	1,3
2000	X_0	99,994 m	0,6 mm	0,6
	Y_0	265,579 m	0,7 mm	0,6
	Z_0	102,547 m	1,0 mm	1,0
	r_x	0,010 gon	1,3 mgon	2,0
	r_y	0,017 gon	1,3 mgon	2,0
	r_z	13,089 gon	0,6 mgon	1,3
3000	X_0	161,202 m	0,9 mm	0,9
	Y_0	160,058 m	0,7 mm	0,7
	Z_0	119,976 m	1,6 mm	1,6
	r_x	-0,037 gon	1,9 mgon	3,3
	r_y	-0,022 gon	1,9 mgon	3,3
	r_z	-82.672 gon	1,3 mgon	1,8
4000	X_0	51,850 m	0,6 mm	0,6
	Y_0	263,160 m	0,8 mm	0,8
	Z_0	135,012 m	1,5 mm	1,5

	r_x	-0,029 gon	1,9 mgon	2,7
	r_y	0,000 gon	1,3 mgon	2,4
	r_z	193,288 gon	0,6 mgon	1,3

Tabelle A.12: Punktbezogene Restklaffen für Epoche E4

Standpunkt	Zielpunkt	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1000	40	2,4	4,8	-5,2
	50	2,0	1,2	-0,1
	1000	-0,3	-0,1	1,3
	2000	-2,1	-1,6	0,5
	3000	-2,7	-0,8	-1,4
	4000	0,8	0,6	2,4
	8000	5,9	-2,9	-4,6
	10000	3,3	-5,2	-4,4
2000	50	-0,5	-2,7	1,0
	60	-1,4	0,2	3,7
	70	0,6	3,5	2,7
	1000	0,4	2,9	-3,8
	2000	0,7	-1,8	2,4
	3000	-1,4	-0,9	1,6
	4000	1,0	1,5	0,3
	8000	-3,2	-0,3	-2,9
	10000	14,5	-7,1	2,2
3000	40	2,0	-2,4	19,4
	1000	0,0	-0,1	-0,4
	2000	1,3	0,6	0,0
	3000	-1,2	0,6	-0,7
	4000	0,9	1,0	-3,6
	10000	-0,7	-18,8	0,6
4000	40	-2,0	0,0	-0,7
	50	-0,3	0,1	-0,5
	60	0,1	-0,2	7,4
	70	0,0	-2,9	2,7
	1000	-2,3	1,0	-9,2
	3000	2,3	1,6	5,3
	4000	1,1	-0,8	0,6
	8000	6,9	2,1	5,2
	10000	-5,5	5,5	-13,4

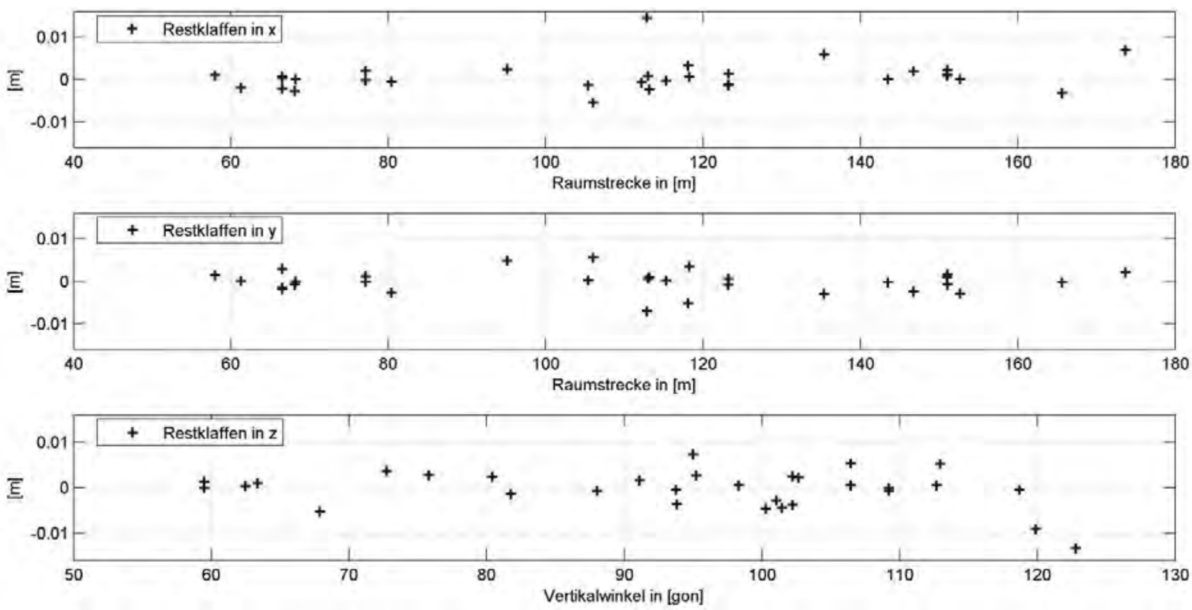


Abbildung A.4: Restklaffen gegenüber der Raumstrecke (x,y) und dem Vertikalwinkel (z) für Epoche E4

Anhang B Epochenvergleiche

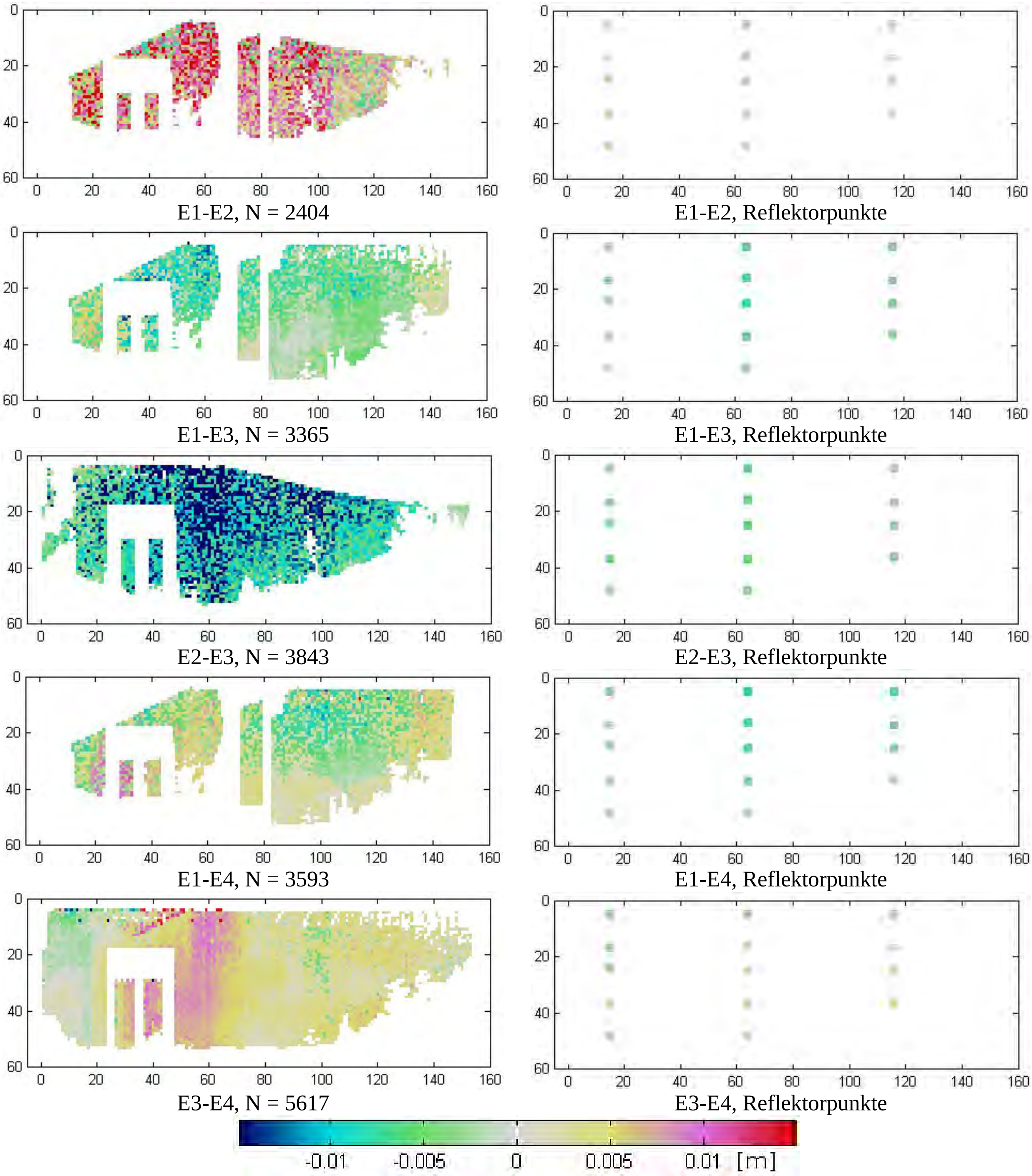


Abbildung B.1: Epochenvergleiche ohne Signifikanztests, Laserscanning und Tachymetrie

Anhang C Vergleich der Registrierung mit ICP und Zielmarken

Epoche E3 (04/05.07.2007)

Tabelle C.1: Gegenüberstellung der Transformationsparameter für Epoche E3

Standpunkt	Parameter, ZM		Parameter, ICP	Abweichung in 100 m Entfernung in [mm]
1000	X_0	152,480 m	152,496 m	16,0
	Y_0	224,798 m	224,804 m	6,0
	Z_0	100,486 m	100,522 m	36,0
	r_x	0,004 gon	0,019 gon	22,6
	r_y	0,015 gon	0,050 gon	55,0
	r_z	-19,772 gon	-19,798 gon	-40,9
2000	X_0	99,992 m	99,992 m	0,0
	Y_0	265,581 m	265,576 m	-5,0
	Z_0	102,533 m	102,540 m	6,0
	r_x	0,011 gon	0,012 gon	1,7
	r_y	0,005 gon	0,014 gon	13,7
	r_z	30,348 gon	30,342 gon	-8,5
3000	X_0	161,204 m	161,211 m	7,0
	Y_0	160,058 m	160,062 m	4,0
	Z_0	119,963 m	120,043 m	80,0
	r_x	-0,006 gon	-0,023 gon	-26,6
	r_y	-0,039 gon	0,099 gon	216,3
	r_z	-119,800 gon	-119,803 gon	0,2

Tabelle C.2: Gegenüberstellung der Restklaffen für Epoche E3

		Zielmarken			ICP		
Standpunkt	Zielpunkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1000	10	2,0	3,0	-3,1	38,1	7,5	4,1
	1000	-1,8	0,3	2,4	-18,2	-5,6	-33,3
	2000	-2,3	-3,5	3,8	-1,2	11,8	6,2
	3000	-0,3	0,3	0,2	-32,5	-13,9	-54,8
	4000	-0,3	0,1	-0,1	16,4	28,2	28,8
	8000	-1,2	1,0	1,2	-69,8	14,3	-33,9
	10000	-0,5	1,3	-10,3	-44,8	36,4	-4,2
2000	20	0,6	0,3	-2,0	9,5	-0,1	-16,6
	30	-3,0	3,8	11,0	0,3	-0,2	-8,7
	1000	-0,5	0,2	-3,1	-3,5	1,2	-17,5
	2000	0,0	-1,7	3,7	0,5	3,9	-2,8
	3000	0,5	1,7	7,7	-4,5	0,0	-8,8
	4000	2,4	-0,8	2,8	7,2	8,3	2,9
	10000	-3,7	2,3	-6,7	-13,2	10,6	-8,4
3000	10	1,9	-0,8	15,7	49,9	5,1	25,9
	1000	0,6	-0,6	-3,8	-50,1	-9,0	-82,2
	2000	-0,5	0,3	4,2	-47,9	-6,3	28,3
	3000	-2,3	0,8	0,1	-10,7	-2,7	-79,8
	4000	4,6	2,7	4,8	26,2	4,8	134,4
	8000	2,2	-5,0	5,7	-49,7	-14,5	74,0
	10000	2,0	1,0	-9,4	-55,5	-8,6	147,1

Epoche 4 (11./12.09.2007)

Tabelle C.3: Gegenüberstellung der Transformationsparameter für Epoche E4

Standpunkt	Parameter, ZM		Parameter, ICP	Abweichung in 100 m Entfernung in [mm]
1000	X_0	152,480 m	152,493 m	13,0
	Y_0	224,797 m	224,779 m	-18,0
	Z_0	100,499 m	100,497 m	-3,0
	r_x	-0,017 gon	-0,006 gon	16,5
	r_y	-0,005 gon	0,038 gon	66,8
	r_z	171,718 gon	171,748 gon	47,9
2000	X_0	99,994 m	99,984 m	-10,0
	Y_0	265,579 m	265,571 m	-8,0
	Z_0	102,547 m	102,562 m	15,0
	r_x	0,010 gon	-0,002 gon	-18,9
	r_y	0,017 gon	0,024 gon	11,4
	r_z	13,089 gon	13,075 gon	-22,5
3000	X_0	161,202 m	161,195 m	-7,0
	Y_0	160,058 m	160,050 m	-8,0
	Z_0	119,976 m	119,976 m	0,0
	r_x	-0,037 gon	-0,040 gon	-5,2
	r_y	-0,022 gon	0,046 gon	106,1
	r_z	-82.672 gon	-82,649 gon	35,7

Tabelle C.4: Gegenüberstellung der Restklaffen für Epoche E4

		Zielmarken			ICP		
Standpunkt	Zielpunkt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
1000	40	2,4	4,8	-5,2	-13,5	-6,4	42,5
	50	2,0	1,2	-0,1	-9,2	18,6	6,3
	1000	-0,3	-0,1	1,3	-13,5	17,9	4,6
	2000	-2,1	-1,6	0,5	-34,6	-8,1	45,6
	3000	-2,7	-0,8	-1,4	28,3	16,6	-14,2
	4000	0,8	0,6	2,4	-10,0	-34,4	80,0
	8000	5,9	-2,9	-4,6	51,0	-12,8	13,2
	10000	3,3	-5,2	-4,4	15,3	-36,6	56,4
2000	50	-0,5	-2,7	1,0	20,2	-0,1	-23,8
	60	-1,4	0,2	3,7	11,1	-4,7	-17,1
	70	0,6	3,5	2,7	4,8	-2,3	-11,1
	1000	0,4	2,9	-3,8	1,9	-1,9	-16,8
	2000	0,7	-1,8	2,4	10,4	6,5	-12,2
	3000	-1,4	-0,9	1,6	-12,0	-5,5	0,2
	4000	1,0	1,5	0,3	12,8	26,7	-7,7
	8000	-3,2	-0,3	-2,9	-31,0	3,9	13,6
	10000	14,5	-7,1	2,2	-0,2	9,0	12,1
3000	40	2,0	-2,4	19,4	-11,9	-10,6	72,7
	1000	0,0	-0,1	-0,4	-37,6	5,0	4,2
	2000	1,3	0,6	0,0	-49,8	-12,1	58,2
	3000	-1,2	0,6	-0,7	5,2	8,4	-1,5
	4000	0,9	1,0	-3,6	-16,0	-27,2	106,6
	10000	-0,7	-18,8	0,6	-21,4	-51,3	115,7

Literaturverzeichnis

Akca, D.; Grün, A. (2007): Generalized Least Squares multiple 3D Surface Matching. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, S. 1-7.

Alba, M.; Fregonese, L.; Prandi, F.; Scaioni, M.; Valgoi, P. (2006): Structural Monitoring of a large Dam by Terrestrial Laser Scanning. IAPRS Volume XXXVI, Part 5.

Bae, K.-H.; Lichti, D. (2007): On-Site Self-Calibration using planar Features for Terrestrial Laser Scanners. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, S. 14-19.

Barnea, S.; Filin, S. (2007): Registration of terrestrial Laser scans via Image based Features. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, S. 32-37.

Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14(2), S. 239-256.

Böhler, W.; Marbs, A. (2004): Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage. Wichmann Verlag, S.82-89.

Böhler, W.; Bordas Vicent, M.; Marbs, A. (2003): Investigating Laser Scanner Accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/C15. Antalya, S.696-701.

Brenner, C.; Dold, C. (2007): Automatic relative Orientation of Terrestrial Laser Scans using planar Structures and Angle Constrains. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007, S. 84-89.

Britz, U., Eling, D., Fahland, S. (2002): Statistische und Strukturmechanische Auswertungen von Überwachungsmessungen an Talsperren. Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen, DVW Schriftenreihe, S. 151-168, Band 43, Wittwer Verlag, Stuttgart.

Canny, J. (1986): A Computional Approach to Edge Detecction. IEEE transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6): 679-698.

Chen, Y; Medioni, G. (1992): Object modeling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing, 10 (3), S. 145-155.

Deumlich, F.; Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9. Auflage, Wichmann Verlag.

DIN 19700-10: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für normung e.V., Berlin, Juli 2004.

DIN 19700-11: Stauanlagen – Teil 11: Talsperren. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für normung e.V., Berlin, Juli 2004.

Dold, C.; Brenner, C. (2006): Registration of Terrestrial Laser Scanner Data using Planar Patches and Image Data. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, S. 78-83.

Dold, C.; Ripperda, N; Brenner. C. (2007): Vergleich verschiedener Methoden zur automatischen Registrierung von Laserscandaten. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, S.196-205.

Drixler, E. (1993): Analyse der Lage und Form von Objekten im Raum. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 409, München.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) (1991): Meß- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit von Staumauern und Staudämmen. Merkblätter, Heft 222/1991, Verlag Paul Parey, Hamburg.

Eling, D.; Kutterer, H. (2006): Terrestrisches Laserscanning für die Deformationsanalyse an Talsperren. Workshop Messtechnische Überwachung von Stauanlagen. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida Nr. 1, S. 31-40.

Eling, D.; Kutterer, H. (2007): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung am Beispiel einer Talsperre. In: F. K. Brunner (Hrsg.): Ingenieurvermessung 2007. Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 119-130.

Elkhrachy, I.; Niemeier, W. (2006): Optimization and Strength Aspects for Geo-Referencing Data with Terrestrial Laser Scanning Systems. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden.

Fahland, S. (2004): Verformungsverhalten einer kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer unter Betriebsbedingungen. Dissertation, TU Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen (Hrsg.).

Fröhlich, C. (1996): Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung. Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, Dissertation, Technische Universität München, Pro Universitate Verlag.

Gordon, J.; Lichti, D. (2007): Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement. Journal of Surveying Engineering, S. 72-80.

Gordon, S.; Lichti, D.; Stewart, M.; Franke, J. (2003A): Structural Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanners. In: Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements. Santorini.

Gordon, S.; Lichti, D.; Chandler, I.; Stewart, M.; Franke, J. (2003B): Precision Measurements of Structural Deformation Using Terrestrial Laser Scanners. In: Grün/Kahmen (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, Zürich, Schweiz, pp. 322-329.

Gordon, S.; Lichti, D.; Stewart, M. (2001): Application of a High-Resolution, Ground-Based Laser Scanner For Deformation Measurements. Proceedings 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, USA, pp. 23-32.

Grimm-Pitzinger, A.; Rudig, S. (2005): Laserscannerdaten für flächenhafte Deformationsanalysen. In: Beiträge zur 13. Internationalen Geodätischen Woche, Obergurgl, Österreich, S. 115-124.

Grün, A., Akca, D. (2005): Least Squares 3D surface and curve matching. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 59, S. 151-174.

Heister, H. (2006): Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: Terrestrisches Laser-

Scanning (TLS 2006), Schriftenreihe des DVW. Band 51. Wißner-Verlag, S.35-44, 2006.

Hennes, M.; Ingensand, H. (2000): Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung. Beitrag zum XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München, 13.-17.03.2000.

Hesse, C. (2007): Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. DGK Reihe C, Heft Nr. 608, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation.

Hesse, C.; Kutterer, H. (2006): Automated form recognition of laser scanned deformable objects. In: Sanso, F., Gil, A. (Eds.) (2007): Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles. IAG Symposia, Vol. 131, Springer.

Hesse, C.; Stramm, H. (2004): Deformation Measurements with Laser Scanners - Possibilities and Challenges. International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields, Sofia, Bulgarien, 04./05.11.2004, S. 228-240.

Horn, B. K. P. (1987): Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. In: Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision. Bd. 4. Washington, D.C., OSOA, 1987, S. 629 – 642

Iavarone, A.; Martin, E. (2003): Calibration Verification Facilities for Long-Range Laser Scanners. In: Grün/Kahmen (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques VI, Vol. I, Zürich, Schweiz, pp. 268-278.

Illner, I. (1985): Datumsfestlegung in freien Netzen. Dissertation. DGK-Reihe C, Nr. 309.

Ingensand, H. (2006): Metrological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology. 3rd IAG / 12th FIG Symposium. Baden.

Ingensand, H.; Ryf, A.; Schulz, T. (2003): Performance and Experiences in Terrestrial Laserscanning. Proceedings of the Optical 3D Measurement Congress, Zürich.

Ioannidis, C.; Valani, A.; Georgopoulus, A.; Tsiligiris, E. (2006): 3D Model generation for Deformation Analysis using Laser Scanning Data of a Cooling Tower. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden.

Kern, Fredie (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Geodätische Schriftenreihe der TU Braunschweig: Band Nr. 19. Braunschweig, Dissertation.

Kersten, Th.; Sternberg, H.; Mechelke, K.; Acevedo Pardo, C. (2004): Terrestrial laser scanning system Mensi GS100/GS200 - Accuracy tests, experiences and projects at the Hamburg University of Applied Sciences. IAPRS, Vol. XXXIV, PART 5/W16, Editors H.-G. Maas & D. Schneider, Proceedings of the ISPRS working group V/1 'Panoramic Photogrammetry Workshop, Dresden, Germany, February 19-22, 2004.

Koch, K.-R. (2004): Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Vierte bearbeitete Auflage, Bonn 2004, http://www.geod.uni-bonn.de, ehemals Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.

Kopacik, A.; Korbasova, M. (2004): Optimal Configuration of Standpoints by Application of Terrestrial Laser Scanners. In: Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2.

Kutterer, H.; Hesse, H. (2006): High Speed Laser Scanning for Near Real-Time Monitoring of Structural Deformations. Tregoning, P. & C. Rizos (Hrsg.): Dynamic Planet. IAG Symposia, Vol. 130, Springer, 2006, S. 776-781.

Kutterer, H. & S. Schön (1999): Statistische Analyse quadratischer Formen – der Determinantenansatz. AVN 10/1999, S. 322-330.

Lenk, U. (2001): 2.5D-Gis und Geobasisdaten – Integration von Höheninformationen und digitalen Situationsmodellen. DGK Reihe C, Heft Nr. 546, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation.

Lichti, D.; Gordon, J. (2004): Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording. In: Proceedings of the FIG Working Week, Athens, May 2004. Session WSA2.

Lichti, D. (2006): Error modelling, calibration analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61 (5), S. 307-324.

Lichti, D.; Gordon, S.; Tipdecho, T. (2005): Error Models and Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Networks. Journal of Surveying Engineering, November 2005, S.135-142.

Lindenbergh, R.; Pfeifer, N. (2005): A Statistical Deformation analysis of two Epochs of Terrestrial Laser Data of a Lock. In: Grün/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VII, Wien, 2005, Volume 2, S. 61-70.

Luhmann, T. (2000): Nahbereichsphotogrammetrie. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.

Maas, H.-G. (1998): Photogrammetric techniques for deformation measurements on reservoir walls. IAG SC4 Symposium: Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt, Österreich, 04/1998.

Mechelke, K.; Kersten, T. P., Lindstaedt, M. (2007): Comparitive Investigations into the accuracy Behaviour of the new generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. In: Gruen/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VIII., Zürich, S. 319-327.

Merziger, G.; Mühlbach, G.; Wille, D.; Wirth, T. (1996): Formeln + Hilfen zur höheren Mathematik. Binomi Verlag, Springe.

Monserrat, O.; Jaszczak, P.; Crosetto, M. (2007): Deformation Measurement based on terrestrial Laser Scanner Data. In: Gruen/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VIII., Zürich, S. 249-256, 2007.

Müller, K. (2006): NURBS und Unterteilungsflächen: Adaptive Visualisierung von Unterteilungsflächen und ihre Erweiterung auf nicht-uniforme Flächen. Dissertation: Technische Universität Braunschweig, FB 1: Mathematik, Informatik, 2006.

Neitzel, Frank (2006A): Bestimmung von Ziel- und Kippachsfehler polarer Messsysteme aus Minimalkonfigurationen und überbestimmten Konfigurationen . ZfV, 131. Jahrgang, S. 132-140, 03/2006.

Neitzel, Frank (2006B): Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS 2006), Schriftenreihe des DVW, Band 51, Wißner-Verlag, S. 15-34, 2006.

Niemeier, Wolfgang (2002): Ausgleichungsrechnung. De Gruyter Verlag, Berlin, 2002.

Ohlmann-Bartusel, J. (2009): Gaining areal deformations by using driving-attendant laser scanning for the New Austrian Tunnelling Method. In: A. Grün, H. Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques IX, Volume II, S. 20-28, Selbstverlag, Wien, ISBN 978-3-9501492-5-8, 2009.

Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Kutterer, H. (2007): Entwicklung eines remote-monitoring Systems für den HDS 4500. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, S.188-195.

Paffenholz, J.-A.; Kutterer, H. (2008): Ein Verfahren zur schnellen statischen Georeferenzierung von 3D-Laserscans. In: Luhmann, T. und Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Verlag Herbert Wichmann, 2008, S. 272-279.

Patzad, D. (2005): Lesson learnde – Digitale Fabrik. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS), Schriftenreihe des DVW, Band 48, Wißner-Verlag, S. 185-203, 2005.

Pelzer, H. (1971): Zur Analyse geodätischer Deformationsmessungen. Habilitationsschrift, DGK Reihe C, Nr. 164, 1971.

Pelzer, H. (Hrsg.) (1985): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Wittwer Verlag, Stuttgart.

Pelzer, Hans (1987): Ingenieurvermessung. Verlag Konrad Wittwer, 1987.

Pfeiffer, N.; Briese, C. (2007): Geometrical Aspects of Airborne Laser Scanning and Terrestrial Laser Scanning. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007, S. 311-319.

Piegl, L. A.; Tiller, W. (1997): The Nurbs Book. Springer Verlag, 1997, ISBN 3540615458

Rehr, I. (2007): Untersuchungen zur Bauwerksüberwachung mit Laserscanning. Diplomarbeit (unveröffentlicht), Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover.

Reshetyuk, Y. (2009): Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. Trita-TEC-PHD,ISSN 1653-4468;09-001, ISBN 978-91-85539-34-5.

Reshetyuk, Y.; Horemuz, M.; Sjöberg, L.E. (2005): Determination of the Optimal Diameter For Spherical Targets Used in 3D Laser Scanning. Survey Review, 38, 297, July 2005, pp. 243-253.

Rietdorf, Andreas (2005): Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. DGK Reihe C, Heft Nr. 582, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, Dissertation.

Rietdorf, A.; Gielsdorf, F.; Gründig, L. (2004): A Concept for the Calibration of Terrestrial Laser Scanners. In: Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2.

Rohrberg, K. (2007): Modellextraktion von Flächen und Körpern aus Punktwolken. In: Luhmann/Müller (Hrsg.), Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, S.226-233.

Santala, J.; Joala, V. (2003): On the Calibration of a Ground-Based Laser Scanner. Proceedings FIG Working Week 2003, Paris, France, April 13-17 2003, Session TS12.

Schäfer, T.; Schulz, T. (2005): Kalibrierung, Einflussgrößen und Genauigkeit von Terrestrischen Laserscannern. In: Terrestrisches Laserscanning (TLS), Schriftenreihe des DVW, Band 48. Wißner-Verlag, S.29-48, 2005.

Schäfer, T.; Weber, T.; Kyrinovic, P.; Zamecnikova, M. (2004): Deformation Measurements using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabcikovo. In: Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2.

Schäfer, T.; Penka, E.; Wunderlich, T.; Zilch, K. (2006): Efficient Local Deformation Recognition on Highway Bridges. In: Shaping the Change, XXIII FIG Congress, München, 8.-13.10.2006.

Schneider, D.; Maas, H.-G. (2007): Integrated Bundle Adjustment with Variance Component Estimation – Fusion of Terrestrial Laser Scanner Data, Panoramic and Central Perspective Image Data. IAPRS Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007, S. 373-378.

Schneider, D.; Schwalbe, E. (2008): Integrated processing of terrestrial laser scanner data and fisheye-camera image data. Paper presented at the XXIth Congress of the ISPRS in Beijing. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVII.

Schneider, D. (2006): Terrestrial Laser Scanning for Area based Deformation Analysis of Towers and Water Damns. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, 2006.

Schulz, T.; Ingensand, H. (2004A): Terrestrial Laser Scanning – Investigations and Apllications for High Precision Scanning. In: Proceedings of the FIG Working Week, Athens, May 2004. Session TS26.

Schulz, T.; Ingensand, H. (2004B): Influencing Variables, Precision and Accuracy of Terrestrial Laser Scanners. In: Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2.

Schulz, Thorsten (2007): Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Diss. ETH No. 17036, Zürich, 2007.

Schwarz, W. (1995): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Verlag Konrad Wittwer Stuttgart.

Schweizerisches Talsperrenkomitee (2005): Messanlagen zur Talsperrenüberwachung. Teil 1-3. www.swissdams.ch, März 2005.

Staiger, R. (2003): Terrestrial Laser Scanning, Technology, Systems and Applications. In: Proceedings 2nd FIG Regional Conference, Marrakech, December 2-5 2003. Session TS12.

Staiger, Rudolf (2005A): The Geometrical Quality of Terrestrial Laser Scanner (TLS). Proceedings of the FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Kairo, Ägypten, 2005.

Staiger, Rudolf (2005B): Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universalmessmethode? In: Terrestrisches Laserscanning (TLS), Schriftenreihe des DVW, Band 48, Wißner-Verlag, S. 3-15, 2005.

Staiger, R.; Wunderlich, T. (2006): Terrestrisches Laserscanning 2006 – Technische Möglichkeiten und Anwendungen. ZfV, 132. Jahrgang, S. 81 -86, 02/2007.

Sternberg, H; Kersten, T. P. (2007): Comparison of Terrestrial Laser Scanning Systems in Industrial As-Built-Documentation Apllications. In: Gruen/Kahmen (Hrsg.): Optical 3-D Measurement Techniques VIII. Zürich, S.389-397, 2007.

Sternberg, H. (2006): Deformation Measurements at historical Buildings with the Help of Three-Dimensional Recording Methods and Two-Dimensional Surface Evaluations. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, 2006.

Sternberg, H.; Kersten, Th.; Conseil, N. (2005): Untersuchungen des Mensi GS 100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der 4. Oldenburger 3D-Tage 2005, Th. Luhmann (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005, pp. 56-65.

Toriya, H. (Hrsg.); Chiyokura, H. (Hrsg.) (1991): 3D-CAD-Principles and Applications. Berlin, Hedelber, New York, Springer Verlag, (Computer Science Workbench).

Tsakiri, M.; Lichti, D.; Pfeifer, N. (2006): Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring. 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden.

Van Gosliga, R.; Lindenbergh, R.; Pfeifer, N. (2006): Deformation Analysis of a bored Tunnel by means of Terrestrial Laser Scanning. IAPRS Volume XXXVI, Part 5.

Welsch, W.; Heunecke, O.; Kuhlmann, H. (2000): Handbuch Ingenieurvermessung, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser, M. u. a. (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Herbert Wichmann Verlag.

Witte, B; Schmidt, H. (2006): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 6. überarbeitete Auflage, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.

Wunderlich, T. (2006): Der Anwendungsreichtum des terrestrischen Laserscanning. Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB). 04/2006, S. 170-174.

Zamecnikova, M.; Kopacik, A. (2004): Testing of Terrestrial Laser Systems. In: Proceedings of the INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, November 2004, Session TS2.

Zamecnikova, M.; Kopacik, A. (2006): Terrestrial Laser System Testing using Reference Bodies. 3rd IAG/12th FIG Symposium. Baden, 2006.

Lebenslauf

	Dirk Eling
23.07.1974	geb. in Erwitte

Schulausbildung

1981-1985	Grundschule, Anröchte
1985-1994	Städtisches Gymnasium, Erwitte

Zivildienst

07/1994 – 09/1995	Technischer Dienst, privates Seniorenheim, Bad Sassendorf

Studium

10/1995 – 11/1995	Lehramt Sekundarstufe 2 (Mathematik und Geographie), Universität Köln
10/1996 – 08/2001	Vermessungswesen, Universität Hannover, Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufserfahrung

11/1995 – 08/1996	Vermessungstechnischer Außendienst, ÖbVI Scharlemann, Elbert in Köln
11/2001 – 10/2007	Wissenschaftlicher Assistent, Geodätisches Institut, Universität Hannover
seit 03/2008	Angestellter bei der Altrass Freileitungs GmbH in Essen

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich jenen Personen danken, die mich auf dem Weg zu meiner Promotion besonders unterstützt haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herrn Prof. Kutterer danke ich für die ausgezeichnete Motivation und Hilfe während und nach meiner aktiven Zeit am Geodätischen Institut. Er fand immer die nötige Zeit mich durch gezielte Anregungen und Fragen qualitativ voranzubringen und mich freundlich daran zu erinnern, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren.

Herrn Prof. Wunderlich danke ich für die Übernahme des Korreferats und die hilfreichen Anregungen, die er mir während unserer Gespräche gegeben hat.

Bei Herrn Prof. Heipke möchte ich mich für die Übernahme des zweiten Korreferats und seine konstruktiven Vorschläge für die Veröffentlichung bedanken.

Herrn Prof. Staiger und seinen Mitarbeitern danke ich für die Berechnung von alternativen Transformationsparametern mittels ICP und die wertvollen Gespräche in Bochum.

Den Harzwasserwerken und dabei insbesondere Herrn Britz möchte ich für die Möglichkeit danken, dass ich stets kurzfristig an und in der Okertalsperre messen konnte sowie Datenbestände nutzen durfte.

Bei Herrn Professor Pelzer möchte ich mich posthum für die Chance bedanken, die er mir durch die Anstellung am GIH gegeben hat. Ich bin froh, ihn als meinen Lehrer bezeichnen zu dürfen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am GIH für die schöne gemeinsame Zeit bedanken. Dr. Christian Hesse, Dr. Ingo Neumann, Dr. Hans Neuner und Harald Vennegeerts möchte ich zudem besonders für ihre aktive Unterstützung meiner Promotion danken.

Ein großes Lob und Dankeschön möchte ich Ilka Rehr, Phillip Brieden und Vincent Meiser für Ihren hervorragenden Einsatz bei den Messkampagnen an der Okertalsperre aussprechen.

Dr. Otmar Schuster und Hanns F. Schuster danke ich für ihre freundliche Gastfreundschaft.

Dr. Folke Santel und Dr. Karsten Raguse danke ich für Ihre spontane Hilfe während des Schlussspurts.

Meinen Eltern danke ich für Ihren großartigen Rückhalt und die Chancen, die sie mir eröffnet haben.

Um Brittas Beitrag zu dieser Arbeit zu würdigen, fehlen mir Platz und Worte. Er ist gar nicht hoch genug einzuschätzen.