



Thomas Schäfer

**Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen
an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung
der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche**

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften



Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen
an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung
der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche

Vollständiger Abdruck
der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation

von

Thomas Schäfer

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

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

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 • Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100

e-mail dgk-post@dgk.badw.de • <http://www.dgk.badw.de>

Prüfungskommission

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas A. Wunderlich
2. Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand, em.,
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz
3. Prof. Dr.-Ing. Hans-Berndt Neuner,
Technische Universität Wien, Österreich

Die Dissertation wurde am
10.03.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 20.06.2017 angenommen.

Diese Dissertation ist auf dem Server der Deutschen Geodätischen Kommission unter <http://dgk.badw.de/>
sowie auf dem Server der Technischen Universität München unter
<https://mediatum.ub.tum.de/1350410> elektronisch publiziert

© 2017 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Zusammenfassung

Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche

Auf die lasergestützte, reflektorlose Distanzmessung wirken zahlreiche Einflüsse, die zu einer systematischen Verfälschung des Ergebnisses führen können. Als noch zu klärende Fragestellung verbleiben etwaige Fehlereinflüsse, die im Zuge der Interaktion des Laserstrahls mit der Objektoberfläche auftreten können. Hierzu zählen Oberflächen- und Materialeigenschaften wie Rauheit und Absorptionsvermögen, aber auch geometrische Beziehungen wie Objektentfernung und Einfallswinkel.

Die vorliegende Arbeit widmet sich in ihrem Schwerpunkt dem vielseitig beobachteten Einfluss des Einfallswinkels zwischen Laserstrahl und der Oberflächennormalen bei der berührungslosen Distanzmessung. Hierzu werden zunächst die Grundlagen der scannenden Verfahren innerhalb der geodätischen Lasermesstechnik im Allgemeinen erläutert und auf die instrumentellen Einflussfaktoren im Speziellen eingegangen. Die vorgestellten Technologien werden auf den Bereich der geodätischen Deformations- und Überwachungsmessung übertragen und anhand einer Überwachungsaufgabe einer Autobahnhochbrücke während der Restnutzungs- und Rückbauphase konkretisiert.

Aus diesem Anlass werden zwei Methoden entwickelt, auf deren Basis eine Korrektur der elektronischen Distanzmessung aufgrund der Interaktion zwischen Laserstrahl und Betonoberflächen möglich ist: Zum einen erfolgt dies über eine bildbasierte Bestimmung von Intensitätsverteilungen innerhalb eines Laserstrahlquerschnittes in Kombination mit numerischen Simulationen der Interaktion des Laserstrahls mit naturnahen Oberflächen. Zum anderen wird ein Korrekturmodell aus redundanten Messungen einer Brückenüberwachung unter realen Bedingungen abgeleitet – hierbei werden insbesondere die Konstellationsunterschiede der Messkonfiguration herangezogen, was zu einer weniger aufwändigeren und somit deutlich pragmatischeren Lösung führt.

Auch wenn die anzubringenden Korrekturen deutlich unter den offiziellen Spezifikationen zur Messgenauigkeit liegen, steht mit der insbesondere für das Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens eines Tachymeters entwickelten Simulationsumgebung ein Werkzeug zur Verfügung, welches grundsätzlich die Analyse von theoretisch reflektierten Messsignalen ermöglicht. Diese kann für künftige Fragestellungen für die Simulation zeitlicher Signalstrukturen hinsichtlich Frequenz- und Intensitätsstabilität, die Berücksichtigung von Reflektanzunterschieden innerhalb der von Messstrahlen beleuchteten Oberfläche sowie die Untersuchung der Abhängigkeit der Distanzkorrektur bei weiteren Rauheitsstufen herangezogen werden.

Abstract

Non-contact and area-covering deformation measurements on concrete surfaces with special consideration of the interaction between laser beam and surface

Laser-based reflectorless distance measurement is affected by numerous factors which may lead to systematic distortions of the result. Questions still remaining and to be clarified concern error effects that may occur during the interaction of the laser beam with the object surface. This includes surface and material properties such as roughness and absorbing capacity, but also geometric relations such as the distance to the object and the incidence geometry.

The present work is devoted to the often observed influence of the incidence angle between laser beam and surface normal on the non-contact distance measurement. For this purpose, first the basics of scanning procedures within the geodetic laser measurement technology are generally discussed. Afterwards the instrumental factors in particular will be dealt with. The technologies presented are transferred to the field of geodetic deformation monitoring and specified based on a monitoring task of a motorway bridge in order to extend its lifespan.

On this occasion, two methods are developed to correct the electronic distance measurement due to the interaction between the laser beam and concrete surfaces: On the one hand this is done through an image-based determination of intensity distributions within a laser beam cross section in combination with numerical simulation of the interaction with natural surfaces. On the other hand, a correction model is derived using redundant measurements – in this case, the differences between instrument set-ups are used, leading to a less elaborate and thus markedly more pragmatic solution.

Although these corrections are significantly below the official specifications for measurement accuracy, the developed simulation environment represents a tool, which basically allows to analyze theoretically reflected measurement signals. This can be used for future issues, e. g. for the simulation of time signal structures in terms of frequency and intensity stability, for considering variations of reflectivity within the illuminated surface and for the investigation of the dependence of distance measurements on several levels of surface roughness.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation und Zielsetzung	9
1.2	Bisherige Arbeiten	10
1.3	Gliederung der Arbeit	12
2	Scannende Verfahren der geodätischen Lasermesstechnik	15
2.1	Entwicklungsgeschichte in der zivilen Vermessung	15
2.2	Funktionsweise und Eigenschaften von Laser	16
2.2.1	Physikalische Grundlagen der Lasertechnologie	17
2.2.2	Laserbauarten	20
2.2.3	Betriebsmodi	23
2.2.4	Strahlenschutz und Laserklassen	23
2.2.5	Anwendungen in der Messtechnik	25
2.3	Messprinzipien der berührungslosen Distanzmessung	27
2.3.1	Grundlagen der direkten und indirekten Laufzeitverfahren	27
2.3.2	Pulsmessverfahren	28
2.3.3	Phasenvergleichsverfahren	29
2.3.4	Kombiniertes Pulsmess- und Phasenvergleichsverfahren	31
2.3.5	Neue Mess- und Auswerteprozessoren auf Basis der Signalanalyse	33
2.3.6	Frequenzmodulation	36
2.3.7	Lasertriangulation	38
2.4	Prinzipien der Strahlablenkung und Begriffsdefinitionen	40
2.4.1	Grundlagen polar messender Systeme	40
2.4.2	Terrestrisches Laserscanning	42
2.4.3	Tachymetrisches Scanning	42
3	Laserscanning in der geodätischen Deformations- und Überwachungsmessung	45
3.1	Auswertestrategien	45
3.1.1	Punktbasierte Ansätze	45
3.1.2	Punktwolkenbasierte Ansätze	46
3.1.3	Oberflächenbasierte Ansätze	47
3.1.4	Geometriebasierte Ansätze	47
3.1.5	Parameterbasierte Ansätze	48
3.2	Anwendungsfelder und Praxisbeispiele	49
3.2.1	Oberflächeninspektion	49
3.2.2	Tunnelbauwerke	50
3.2.3	Staumauern	51
3.2.4	Brückenbauwerke	52
3.3	Grenzen des Laserscannings in der Deformationsmessung	52
4	Instrumentelle Einflussfaktoren auf das Messergebnis	55
4.1	Terminologie	55
4.2	Instrumentelle Einflussfaktoren auf die Winkelmessung	56
4.2.1	Grundlegende Justierbedingungen eines Theodolits	56
4.2.2	Ausrichtungsfehler der berührungslos messenden Distanzmessachse	58
4.2.3	Vektorielle Darstellung der Winkelabweichungen	60
4.3	Instrumentelle Einflussfaktoren auf die Distanzmessung	63
4.3.1	Maßstabsfehler	64

4.3.2	Nullpunktskorrektur	64
4.3.3	Zyklischer Phasenfehler	64
4.3.4	Auflösungsvermögen und Präzision	66
4.3.5	Phaseninhomogenitäten	68
4.3.6	Modellbildung der Distanzabweichungen	68
4.4	Auswirkungen fehlerbehafteter Winkel- und Distanzmessungen	69
5	Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche	75
5.1	Effekte und Ursachen	76
5.1.1	Meteorologie	76
5.1.2	Totalreflexionen und Mehrwegeeffekte	77
5.1.3	Mischsignale	77
5.1.4	Materialbeschaffenheit	77
5.1.5	Zielgeometrie und Einfallswinkel	78
5.1.6	Schlussfolgerung	81
5.2	Modellierung von Laserstrahlen	82
5.2.1	Der Gauß-Strahl	82
5.2.2	Modellierung der Atmosphäre	87
5.2.3	Reale Intensitätsverteilung eines Laserstrahls	88
5.3	Simulationsumgebung	103
5.3.1	Oberflächenmodell	105
5.3.2	Reflexionsmodell	106
5.3.3	Sichtbarkeitsanalyse	107
5.3.4	Modellierung der reflektierten Sequenz	109
5.3.5	Analyse der reflektierten Sequenz	110
5.4	Simulationsergebnisse	114
5.4.1	Verifikation am Stufenmodell	114
5.4.2	Einfluss des Einfallswinkels an einer idealen Ebene	120
5.4.3	Einfluss des Einfallswinkels an einer Betonoberfläche	121
6	Entwicklung eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Brückenüberwachung	125
6.1	Projektvorstellung Hochbrücke Freimann	125
6.1.1	Objektbeschreibung	125
6.1.2	Schadensbild	126
6.2	Geodätische Überwachung während der Restnutzungsphase	127
6.2.1	Grundkonzept und Anforderungen an die Ingenieurgeodäsie	127
6.2.2	Berührungslose Messung identischer Punkte an beweglichen Oberflächen	130
6.2.3	Messablauf und Auswertung	132
6.2.4	Brückengeometrie	134
6.2.5	Resultate und Fazit	140
6.3	Weiterentwicklung des Konzeptes im Zuge der Rückbauphase	143
7	Fazit und Ausblick	147
	Literaturverzeichnis	162
	Abbildungsverzeichnis	165
	Tabellenverzeichnis	167
	Abkürzungsverzeichnis	169
	Lebenslauf	171
	Dank	174

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Ingenieurbauwerke allgemein – und Brückenbauwerke im Besonderen – unterliegen geometrischen und physikalischen Imperfektionen. Hinzu kommen noch Veränderungen von Material- und Bodenparametern sowie eine Änderung der Belastung, z. B. bei Brücken in Hinblick auf ein erhöhtes Verkehrsaufkommen. Eine geodätische Überwachung ist daher sowohl begleitend in der Bauphase, wie auch in regelmäßigen Abständen in der Betriebsphase erforderlich. Die Überwachung von Brückenbauwerken dient dabei der Qualitätskontrolle, der Feststellung von Auswirkungen bei Belastungstests, dem Standsicherheitsnachweis und demzufolge der Gewährleistung der Betriebssicherheit.

Die grundsätzliche Bedeutung der Prüfung und Überwachung von Brückenbauwerken wurde in der Bundesrepublik bereits am Anfang des letzten Jahrhunderts erkannt, und wird deshalb seit 1930 in der DIN 1076 (Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung) geregelt. Grundsätzlich unterscheidet die Norm zwischen Bauwerksüberwachung und Bauwerksprüfung. Die Bauwerksüberwachung beschränkt sich dabei auf regelmäßige visuelle Kontrollen ohne größere Hilfsmittel. Dabei wird zwischen einer jährlichen Besichtigung zur Erkennung offensichtlicher Mängel oder Schäden und einer laufenden, halbjährlichen Beobachtung im Rahmen der Streckenkontrollen unterschieden. Die Bauwerksprüfung hingegen ist aufgeteilt in Hauptprüfungen, einfache Prüfungen, Prüfungen aus besonderem Anlass und schließlich Prüfungen nach besonderen Vorschriften. Diese Prüfungen umfassen bautechnische sowie vermessungstechnische Prüfungen. Als weitere relevante Normen zur vermessungstechnischen Kontrolle von Brückenbauwerken sind DIN 4107 (Satzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken) und insgesamt die Neuauflage der DIN 18710 (Ingenieurvermessung) herauszuheben.

Die vorliegende Dissertation ist inspiriert durch eine Bauwerksprüfung der Hochbrücke Freimann, die ein zentrales Brückenbauwerk im Norden der Landeshauptstadt München darstellt. Bedingt durch Umwelteinflüsse sind nach Jahrzehnten der Nutzung schwerwiegende Schäden aufgetreten, die einen Neubau erforderten. Rechnerische Untersuchungen auf Basis einer FEM-Modellierung ergaben bereits Jahre vor dem Rückbau Schadensszenarien, die bei partiellem Ausfall der Bügelbewehrung oder einem örtlichen Bruch der Spannglieder in einem möglichen Ablösen der Betonbodenplatten münden. An der Brückenunterseite zeigten sich dabei in Abhängigkeit von Ort und Umfang der Schädigung Ausbeulungen in der Größenordnung von bis zu 8 mm (Penka u. a., 2005).

Das mit der Prüfung des Bauwerks vertraute Büro Zilch+Müller Ingenieure, kurz ZM-I, sowie der Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München zogen die Expertise des Lehrstuhls für Geodäsie im Bereich Brückenmonitoring hinzu, um durch geeignete geodätische Überwachungsmessungen die visuellen Kontrollen der Bauwerksprüfung zu ersetzen und eine gesicherte Verlängerung der Restnutzungsdauer der Hochbrücke Freimann zu erwirken. Die Rahmenbedingungen für ein mögliches Messkonzept umfassten zum einen die flächenhafte Überwachung einer Betonoberfläche von mehr als 20.000 m² und zum anderen eine hohe Präzisionsanforderung an die geometrischen Parameter der erfassten Oberfläche. Um diese Kombination aus Effizienz und Messgenauigkeit zu bewerkstelligen, wurde bereits 2003 eigens ein Messverfahren entwickelt, das die berührungslose Datengewinnung eines terrestrischen Laserscanners mit der hohen Winkel- und Streckenmessgenauigkeit eines Tachymeters verbinden soll. Auch wenn diese Kombination durch die Verwendung rein tachymetrischer Hardwarekomponenten eines Leica TCRA1101plus (mit einer Distanzmessgenauigkeit von ca. 3 mm bei einer maximalen Reichweite von 80 m und einer typischen Messdauer von 3 Sekunden)

bewerkstelligt wurde, beweisen aktuelle Entwicklungen, z. B. durch die Markteinführung der MultiStation Nova MS50 von Leica im Jahre 2013, dass die damalige Herangehensweise durchaus wegweisend war. Dabei steht weniger die bemerkenswerte Abtastrate von 1000 Punkten pro Sekunde bei einem Messrauschen von 1 mm in einer Entfernung von 50 m im Fokus als vielmehr die Flexibilität bei der Erfassung und Auswertung von Objektpunkten. Laserscanner erzeugen bekanntlich Punktwolken, die eine Oberfläche zwar hochauflösend und in einem festen Winkelintervall abtasten – die Messpunkte selbst sind jedoch nicht reproduzierbar anzuzielen. Dies wiederum ist ein wesentliches Merkmal der Punktanzielung mit Fernrohr und Fadenkreuz und entspricht der traditionellen Herangehensweise in der geodätischen Deformationsmessung, bei der die zeitliche Variation der Koordinaten eines Objektpunktes beobachtet wird.

Eine Kombination aller Vorteile – berührungslos, hochauflösend, wiederholt messbare aber nicht signalisierte Objektpunkte – ist offenkundig. Der technologische Fortschritt im Bereich der Messsensorik sowie die Möglichkeit, mit eigener Software Tachymeterapplikationen zu entwickeln, eröffnen dabei neue Chancen für Geodäten (Wunderlich, 2008). Zur Überwachung der Hochbrücke Freimann wurde auf ebendiese Möglichkeit zurückgegriffen und ein auf Tachymetermessungen basierendes Scan-Verfahren entwickelt. Erste Erfahrungen in der Auswertung von Punktwolken für Deformationsmessungen wurden in Gabčíkovo (Schäfer u. a., 2004) gewonnen und werden im Rahmen dieser Arbeit für die oben genannte Anwendung einer Brückenüberwachung weiterentwickelt. Die praktischen Erfahrungen aus diesem Projekt weisen darauf hin, dass neben einer zuverlässigen Kalibrierung aller Sensorkomponenten auch die Berücksichtigung des Auftreffwinkels zwischen dem Messstrahl und der Oberfläche von entscheidender Bedeutung ist, was sich zudem mit den in Publikationen beschriebenen Beobachtungen deckt. Diesen Sachverhalt näher zu beschreiben und wissenschaftlich darzustellen ist eine wesentliche Motivation dieser Arbeit. Ein Ziel der Arbeit besteht demnach im Zugewinn des Verständnisses der Interaktion eines Laserstrahls mit der Objektoberfläche im Allgemeinen und mit einer Betonoberfläche im Speziellen – darauf aufbauend eröffnet sich die Möglichkeit, etwaige systematische Verfälschungen von Streckenmessungen zu korrigieren und eine Genauigkeitssteigerung der berührungslosen Distanzmessung zu erreichen.

1.2 Bisherige Arbeiten

Da gemessene Verformungsänderungen an einer Brücke direkte Rückschlüsse auf Schädigungen innerhalb des Tragwerks ermöglichen, nimmt die Messtechnik im sog. verformungsbasierten Monitoring eine zentrale Rolle ein (Heunecke u. a., 2013). Messmethoden aus Industrie und Geodäsie bieten hierfür eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten, solche Verformungssituationen speziell an Brückenstrukturen effektiv und präzise zu erfassen. Hierunter zählen die direkte Verformungswegbestimmung (z. B. mittels induktiver Wegaufnehmer), die Bestimmung von Positionsänderungen von Messpunkten (z. B. durch Tachymetrie, Nahbereichsphotogrammetrie oder satellitengestützte Verfahren), die Änderung von Neigungen oder die Ermittlung von Verzerrungsparametern (z. B. durch Neigungssensoren, Dehnungsmessstreifen oder vermehrt faseroptische Sensoren). Einen näheren Überblick verschafft Retze (2007) und beschreibt die relevantesten Monitoringverfahren. Deren Leistungsfähigkeit wird zudem anhand einer realen Brückenstruktur infolge definierter Schädigungstests diskutiert.

Da jedes Verfahren seine Vorzüge, auf der anderen Seite aber auch stets Grenzen aufweist, ist es wenig verwunderlich, dass heute oftmals eine Kombination unterschiedlicher Messmethoden unerlässlich ist. In (Schmitt u. a., 2013b) wird beispielsweise die Überwachung von Brückentragwerken durch terrestrisches Laserscanning sowie Sensoren der Baumesstechnik verknüpft. Lienhart (2007) kombiniert klassische Messverfahren mit faseroptischen Sensoren, die im Zuge der Bauphase in die Brückenstruktur mit eingebracht werden und liefert dabei einen wichtigen Beitrag zur jungen Disziplin des *Structural Health Monitoring*, sozusagen der Gesundheitsprüfung von Bauwerksstrukturen.

Bereits 2002 untersucht Kuhlmann in seinem Beitrag (Kuhlmann, 2002) zur angewandten Geodäsie alternative Messverfahren, die bis dato nicht für die Bauwerksüberwachung eingesetzt wurden. Hierbei konzentriert sich der Autor auf Eignung der reflektorlosen Tachymetrie am Beispiel einer Autobahnbrücke. Dabei wird eine reproduzierbare Genauigkeit der plastischen Verformung von 5 bis 10 mm angestrebt. Da in der umgesetzten Messkonfiguration von zwei unterschiedlichen Standpunkten aus gearbeitet wird, werden bereits hier erste

Untersuchungen hinsichtlich der Abhängigkeit der Distanzmessung vom Einfallswinkel des Messstrahls auf die Betonoberfläche durchgeführt und vorgestellt. Die erhaltenen Differenzen zwischen einem frontalen und schiefen Auftreffwinkel spiegeln dabei einen deutlichen Zusammenhang wider.

Die Auswirkungen von unterschiedlichen Oberflächenformen auf Entfernungsmessungen werden auch in den Dissertationen von Kern (2003) sowie Juretzko (2005) diskutiert. Beide Arbeiten beobachten Effekte aufgrund der Rauheit der Oberfläche, welche zu einer systematischen Verfälschung des gemessenen Ergebnisses führen. Auch (Schäfer u. Schulz, 2005) und schließlich (Schulz, 2007) betrachten den Einfluss des Auftreffwinkels auf die Messgenauigkeit. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass ein umgekehrt-proportionaler Zusammenhang zwischen innerer Messgenauigkeit und der Streckenmessung besteht, kurz: je flacher der Laserstrahl auf die Objektoberfläche trifft, desto unsicherer wird die Distanzmessung.

Von Soudarissanane u. a. (2007, 2009) werden diese Einflüsse für einen Laserscanner anhand zahlreicher Scans einer Oberfläche unter verschiedenen Orientierungswinkeln innerhalb eines festen Bezugssystems exemplarisch ermittelt. Intensitätsvariationen und Messrauschen werden hierin mit dem Einfallswinkel des Laserstrahls in Verbindung gebracht und modelliert. Die Modellierung der durch den Einfallswinkel induzierten Fehlerkomponente erscheint der Autorin schlussfolgernd ein gangbarer Schritt für den Aufbau des Gesamtfehlerbudgets von Laserscannermessungen.

Am Geodätischen Institut der Universität Hannover wurde in zwei Forschungsprojekten (2007-2009) zur Untersuchung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern ein Simulator für TLS-Messungen entwickelt, der mit Hilfe eines stochastischen Modells auf Basis von numerischen Zufallsexperimenten Messungen zu Objekten verschiedener Form und verschiedener räumlichen Lage gegenüber dem Messsensor simuliert. Darauf aufbauend führt er die Schätzung des Modells und eine Genauigkeitsanalyse von Ergebnissen durch. Der Simulator stellt eine effektive und variable Unterstützung zur Planung von Messungen dar.

In der Dissertation zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner untersucht Gordon (2008) potenzielle Einflussfaktoren auf die Laserscannermessgenauigkeit. Hierbei wird zwischen systematischen Einflüssen und äußeren Umgebungseinflüssen unterschieden. Die systematischen Einflüsse beziehen sich auf Unzulänglichkeiten des Laserscanner-Messsystems. Äußere Umgebungsbedingungen beeinflussen die Laserabtastung beispielsweise durch die Dämpfung des Laserstrahls in der Atmosphäre oder durch die Oberflächeneigenschaften des Messobjektes. Aus der Analyse der zahlreichen Einflussfaktoren resultiert ein umfassendes Modell zur Beschreibung der Messunsicherheit beim terrestrischen Laserscanning. Auf der Grundlage dieses Genauigkeitsmodells wird ein Algorithmus entwickelt, der die Systemkalibrierung eines Laserscanners erlaubt.

Zámečnicková u. Neuner (2014) berichten von einem experimentell ermittelten Einfluss des Einfallswinkels im Nahbereich. Im Unterschied zu früheren Untersuchungen werden hier die gescannten Messpunkte im Nachgang abgesteckt und durch ein Theodolitmesssystem, welches als Bezugsmessung anzusehen ist, analysiert. In einem weiteren Beitrag (Zámečnicková u. a., 2014) konzentrieren sich die Autoren auf die Einflüsse, die nachweislich durch die Reflektivität der rückstrahlenden Oberfläche bzw. der Signalstärke hervorgerufen werden. Der Messaufbau basiert nun auf einer interferometrischen Messbahn und bezieht neben Laserscannern auch reflektorlos messende Tachymeter in seine Überlegungen mit ein.

Ausgelöst durch eine Brückenüberwachung, wie bereits im vorangestellten Abschnitt 1.1 erwähnt und in (Penka u. a., 2005) sowie in (Schäfer u. a., 2006) beschrieben, flossen die bisher genannten Arbeiten in die weitere wissenschaftliche Behandlung des Themas mit ein. So entstanden im Vorfeld zu dieser Dissertation Beiträge zur Fehlerabschätzung der reflektorlosen Distanzmessung (Schäfer, 2011a,b) und schließlich (Schäfer, 2014).

Im Laufe der Jahre wurde in anwendungsorientierten Projekten und wissenschaftlichen Publikationen vermehrt über die erfolgreiche Anwendung des TLS zur Bauwerksüberwachung anhand zahlreicher Ingenieurbauwerke berichtet. Da herkömmliche Methoden zur Deformationsanalyse auf der Zuordnung homologer Objekt- bzw. Stützpunkte zweier Beobachtungsepochen aufbauen, lassen sich diese Ansätze jedoch nicht ohne weiteres auf hochauflösende und flächenhafte TLS-Daten übertragen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass aus registrierten Punktwolken mehrerer Messepochen keine identischen Objektpunkte direkt reproduzierbar sind. Gleichwohl existieren inzwischen zahlreiche Anwendungsbeispiele aus Forschung und Praxis, welche diese Problemstellung behandeln. In (Wunderlich u. a., 2016) werden diese Herausforderungen aktuell diskutiert.

Einen Überblick über die Schwierigkeiten und unterschiedlichen Herangehensweisen zur Ableitung von flächenhaften Deformationen geben bereits (Ohlmann-Lauber u. Schäfer, 2011), welche zudem in Abschnitt 3.2 erläutert werden. Ebenda werden weitere Anwendungsfelder exemplarisch erschlossen – an dieser Stelle soll der Fokus jedoch noch auf den Brückenüberwachungsmessungen verweilen:

Im Zusammenhang mit anstehenden Instandsetzungsarbeiten an einer Autobahnbrücke wurden Belastungsversuche zur Untersuchung von Ermüdungsproblemen und zur Verbesserung der Berechnungsmodelle durchgeführt. Zogg u. Ingensand (2008) beschreiben ihre Herangehensweise und stellen die gewonnenen Ergebnisse einem Präzisionsnivellement gegenüber. Auch wenn der verwendete Ansatz keine flächenhafte Deformationsmessung beinhaltet, sondern vornehmlich Positionsveränderung von TLS-Zielmarken im Sinne von Einzelpunktbestimmungen darstellt, liefert der Vergleich mit hochpräzisen Setzungsmessungen einen wichtigen, vertrauensbildenden Beitrag für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet.

Aufbauend auf der tachymetergestützten Projektarbeit zur Bauwerksüberwachung der Hochbrücke Freimann, wurden von Ohlmann-Bartusel u. Mayr (2007) zwei Panoramascanner unterschiedlicher Fabrikate eingesetzt, um eine etwaige Höhenänderung der Brückendecke aus Punktwolken abzuleiten. Dabei wurde die Erfordernis erkannt, das Messrauschen zum Nachweis geringer Deformationen zu reduzieren. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag daher auf der Entwicklung geeigneter Filtermethoden mit dem Ziel, repräsentative Punkte für eine Deformationsanalyse zu extrahieren.

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhaben des Institutes für Massivbau und des Geodätischen Institutes der Universität Hannover wurden von 2010 bis 2013 Strategien und Methoden des *Life-Cycle-Engineerings* für Ingenieurbauwerke und Gebäude entwickelt. Ziel der Kooperation war die Erfassung statischer und dynamischer Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf Spannbetonbrücken. Parallel zu Beobachtungen mit Mitteln der Baumesstechnik (Dehnungsmessstreifen und optische Sensoren wurden auch Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt (Schmitt u. a., 2013b). Grundsätzlich ist es gelungen, die Dehnung der Brücke über die gemessene Durchbiegung zu modellieren (Schmitt u. a., 2013a; Neuner u. a., 2015). Aufgrund der Verwendung der hochfrequent erfassten Profildaten und der anschließenden Approximation und Zeitreihenanalyse dieser, spricht die Forschungsgruppe in diesem Zusammenhang auch von kinematischem Laserscanning, kurz k-TLS – dabei resultiert die Kinematik allerdings aus der Objektbewegung, und nicht aus der Bewegung der Messplattform wie beispielsweise bei *Mobile-Mapping*-Systemen, dem die Bezeichnung k-TLS vermutlich entspringt. Letzt genanntes Beispiel gibt daher bereits einen Ausblick auf zukunftsweisende Messverfahren, wie sie abschließend in Kapitel 7 diskutiert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit widmet sich im nachfolgenden 2. Kapitel den Grundlagen der scannenden Verfahren innerhalb der geodätischen Lasermesstechnik. Dabei werden zum einen die Entwicklungsgeschichte und die Funktionsweise der Lasertechnologie sowie zum anderen die umgesetzten Messprinzipien der berührungslosen Distanzmessung und deren Umsetzung in aktuellen Tachymetern und terrestrischen Laserscannern behandelt.

Kapitel 3 befasst sich schließlich mit der Übertragung der vorgestellten Technologien auf den Bereich der geodätischen Deformations- und Überwachungsmessung und bezieht dabei konkrete Anwendungsfelder und Auswertestrategien mit ein.

Nach einem einführenden Abschnitt über die Terminologie Prüf-, Kalibrier- und Justierverfahren behandelt der Inhalt des 4. Kapitels die grundlegenden instrumentellen Einflussfaktoren auf die Winkel- und Streckenmessung. Insbesondere die Fehlergrößen der reflektorlosen Distanzmesseinheit dienen hierbei als Entscheidungsgrundlage für die grundsätzliche Eignung eines tachymetrischen Scannings für geodätische Überwachungsmessungen. Die Prüfergebnisse des eingesetzten Instrumentariums werden abschließend herangezogen, um die systematischen Auswirkungen von unberücksichtigten Korrekturen durch eine Simulation zu veranschaulichen.

Neben zufällig verteilten Abweichungen verbleiben insbesondere bei der elektrooptischen Entfernungsmessung nach wie vor systematische Anteile, die auf die Interaktion des Messstrahls mit der Objektoberfläche

sowie das dazwischen liegende Medium zurückzuführen sind. Als wesentliche Bestandteile dieser Interaktion sind aufgrund atmosphärischer Einflüsse die Laufwege zwischen Sender, Objekt und Empfänger anzusehen. Aber auch die geometrische und radiometrische Oberflächenbeschaffenheit, welche die Reflektivität des Materials maßgeblich beeinflussen und unter Umständen zu einer Übersteuerung der Empfangsdiode und somit einer Streckenverfälschung führen können, sind hierzu zu zählen. Als weiteren geometrischen Einfluss ist der Einfallswinkel, unter dem der Laserstrahl auf die Objektoberfläche trifft, zu nennen. Inwiefern sich der Einfluss des Einfallswinkels als Distanzabweichung von einer Solldistanz bemerkbar macht, wird insbesondere in Kapitel 5 anhand einer eigens entwickelten Simulationsumgebung untersucht.

Auch wenn die anzubringenden Korrekturen im Sub-Millimeterbereich und damit deutlich unter den offiziellen Spezifikationen der Messgenauigkeit von etwa $2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ bis $3\text{ mm} + 3\text{ ppm}$ liegen, so existieren im Bereich der ingenieurgeodätischen Deformationsmessung durchaus Anwendungen, bei denen eine Korrektur sinnvoll erscheint. Die bereits in Kapitel 3 vorgestellten Anwendungsfelder werden schließlich in Kapitel 6 durch eine Entwicklung eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Überwachung einer Autobahnbrücke im Zuge der Restnutzungsphase ergänzt. Das Kapitel befasst sich mit der praktischen Umsetzung einer innovativen Überwachungsaufgabe, wie sie erstmals von Penka u. a. (2005) und Schäfer u. a. (2006) vorgestellt wurde. Als Demonstrationsbauwerk wird die, inzwischen durch einen Neubau ersetzte, Hochbrücke Freimann der Bundesautobahn (BAB) 9 zwischen München und Nürnberg/Berlin heran gezogen.

Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf weiterführende Forschungsschwerpunkte sowie das Potenzial des Bauwerksmonitorings im Hinblick auf den Einsatz zukunftsweisender Messtechnologien.

Kapitel 2

Scannende Verfahren der geodätischen Lasermesstechnik

Der Begriff *Scan* steht in der Messtechnik für das berührungsfreie Abtasten von Objekten – insbesondere von Interesse im geodätischen Kontext ist dabei die Abtastung der Geometrie. Hierfür überstreicht ein Laserstrahl in einem definierbaren Raster das zu vermessende Objekt – vereinfacht dargestellt wird die Ablenkung des Laserstrahls durch Winkencoder abgegriffen, der Laserstrahl selbst wird für eine Streckenmessung herangezogen: Dies führt (von einigen Ausnahmen abgesehen) im Wesentlichen zu einem polaren Messverfahren, das im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch näher dargestellt wird. Eine Ausnahme bilden scannende Verfahren, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten. Diese Verfahren werden vorwiegend im Nahbereich, z. B. für industrielle Anwendungen, eingesetzt und sind der Stereophotogrammetrie ähnlich. Anstelle zweier Stereokameras wird eine durch eine aktive Lichtquelle ersetzt, die einen Lichtpunkt oder -linie auf die zu messende Szene projiziert. So genannte Laserscanner ermöglichen dabei eine nahezu vollständige Geometrieerfassung beliebig geformter Objekte – auch wenn hierzu insbesondere in Messbereichen, die durch andere Objekte abgeschattet sind, mehrere Scans von unterschiedlichen Standpunkten aus erforderlich sind. Eine Verknüpfung dieser Punktwolken erfolgt über homologe Punkte (Passpunkte) und 3D-Ähnlichkeitstransformationen, die heute weitestgehend automatisiert durchgeführt werden. Die resultierende Gesamtpunktwolke ist im Zuge einer Auswertung je nach Anwendung und Zielsetzung einer Flächenrückführungen zu unterziehen, bei der die Punktwolke durch geeignete Modellierungen (z. B. durch Ebenenapproximationen und Schnittberechnungen) in ein Oberflächenmodell überführt werden kann (Schäfer, 2008b).

Dieses Kapitel behandelt nach einer kurzen Darstellung der Entwicklungsgeschichte der berührungslosen Distanzmessung und des Laserscannings die grundlegende Funktionsweise eines Lasers und stellt die Messprinzipien der daraus entstandenen elektronischen Distanzmessverfahren sowie deren technische Umsetzungen vor.

2.1 Entwicklungsgeschichte in der zivilen Vermessung

Die Entwicklung begann offenkundig mit dem Aufkommen von Laserdioden und neuen Zeitmessmethoden (insb. der Messung von Pulslaufzeiten) zur Bestimmung von Distanzen. Ein Beispiel hierfür ist das RF2K, welches Ende der 1970er Jahre von D. J. Vyner für marine Anwendungen entwickelt wurde. Mit einer Auflösung von 10 cm und einer Standardabweichung von 50 cm bei Entfernungen bis zu 2 km auf retro-reflektierende Prismen kam ein erstes Instrument zum Einsatz, das allerdings auch ohne retro-reflektierende Prismen Streckenmessungen zu bis zu einer Distanz von 100 m ermöglichte (Petrie, 1990). Dieser spezielle Instrumententyp wurde später von anderen Herstellern weiterentwickelt: Eine Verbesserung und Miniaturisierung von elektronischen Bauteilen führte schließlich zu serienreifen Konstruktionen wie z. B. dem Pulse-Ranger von Keuffel & Esser (1982) oder die Distanzmesser der Serie FEN des westdeutschen Herstellers Fennel und der ersten reflektorlosen Totalstation FET 2 durch IBEO nach einer Konstruktionsidee von Fennel (Heer, 2011), der russische SP 2 TOPAS, die Wild Distomat-Instrumente DI 3000 und DIOR 3002, sowie der DM90 der Firma Dr. Riegler (1985) und das Zeiss Eldi 10 (Kampmann u. a., 1988).

Reflektorlose Messungen erfolgen, wie der Name bereits erahnen lässt, nämlich ohne retroreflektierende Spiegelprismen oder Reflexmarken, sondern nutzen direkt die raue Oberfläche des Messobjektes. Daher bietet

die reflektorlose Distanzmessung zusätzlich den Vorteil, dass keine prismenspezifische Additionskonstanten zwischen Signalpunkt und Messobjekt erforderlich sind. Modellhaft kann man sich eine solche Oberfläche zusammengesetzt aus sehr vielen differentiell kleinen Spiegelflächen (Joeckel u. a., 2008) vorstellen, die aber aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtungen den Messstrahl in der Regel diffus reflektieren (für eine detailliertere Betrachtung der Reflexionsmodelle sei auf Abschnitt 5.3.2 verwiesen). Dabei wird nur ein Bruchteil der auftreffenden Energie in Richtung der Sende- und Empfangseinheit des EDM zurückgeworfen. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Strahldivergenz, woraus sich deutlich geringere Reichweiten von 15 bis heute (zumindest im zivilen Bereich der Tachymetrie) typischerweise 1200 m ergeben. Zusätzlich existieren aber zwischenzeitlich sog. *Long Range Laserscanner* mit Reichweiten von weit über 1 km.

Der Frage, ob Distanzen mit Unsicherheiten im Millimeterbereich erfasst werden können und somit für Aufgaben der Ingenieurvermessung geeignet sind, ging Kampmann u. a. (1988) nach. Hierin werden auch Messungen zu unterschiedlichen Oberflächenstrukturen diskutiert. Ein erster Schritt zur Integration eines berührungslosen Messverfahrens erfolgte 1986 mit dem DIOR3002 der Firma Wild als modulares Aufsatz-EDM für Theodolite (Leica Geosystems, 2013). Die spätere Integration in das optische Fernrohr moderner Tachymeter (z. B. im RecEltaRL der Firma Zeiss im Jahre 1993 und in den Baureihen TPS300 und 1100 der Firma Leica im Jahre 1998) beeinflusste die Arbeitsweise des Geodäten nachhaltig und trug wesentlich zu seiner Effizienzsteigerung bei (Wunderlich, 2004). Die reflektorlose Distanzmessung hat sich demnach inzwischen überall dort als besonders vorteilhaft erwiesen, wo zum einen unzugängliche oder nur schwer zugängliche Punkte zu vermessen sind oder es sich zum anderen lohnt, auf einen Markierungsaufwand, z. B. bei einer hohen Anzahl von Objektpunkten oder aus rein ästhetischen Gesichtspunkten, zu verzichten. Die polare Aufnahme einzelner Punkte, wie sie beispielsweise bei der Einmessung von Gebäuden anfällt, ist mit einem manuellen Vorgang beim Anvisieren verbunden. Besteht hingegen Interesse an einer großen Anzahl von Objektpunkten oder gar eine flächenhafte Erfassung, wie sie bei photogrammetrischen Ansätzen üblich ist, kommen heute oftmals scannende Verfahren zum Einsatz. Das Laserscanning erlaubt dabei eine vollständige und rasche dreidimensionale Abbildung nahezu beliebiger Oberflächen und Objekte.

Ein erster Prototyp eines abbildenden 3D-Messsystems für den Nahbereich mit opto-elektronischem Messkopf, Sende- und Empfangsoptik, einer Signalerzeugungs- und Signalverarbeitungselektronik, sowie einer Steuerelektronik für die optische Ablenkung des Sende- und Empfangsstrahls wurde von Wehr (1991) entwickelt. Bereits 1994 folgte ein erster Laserscanner für die Bahnvermessung der Fa. Zoller+Fröhlich gefolgt von einer Entwicklung eines 3D-Laserscanners für die Bestandsaufnahme von Objekten (Fröhlich, 1996). Seit der Einführung der beiden in Serie gefertigten Laserscanners, dem Cyrax 2400 mit einer Datenrate von 1000 Messpunkten pro Sekunde und dem LMS-Z210 der Firma Riegler im Jahre 1998, entwickelte sich das Terrestrische Laserscanning, kurz TLS, schließlich in Bezug auf Hard- und Softwareprodukte rasant zu einem vielseitig einsetzbaren Messverfahren, das in zahlreichen geodätischen Aufgabenstellungen Anwendung findet. Heutige Laserscanner decken, je nach Modell selbstverständlich, Reichweiten von wenigen Metern bis zu mehreren Kilometern ab – und dies bei Messraten von bis zu 500.000 Punkten pro Sekunde. Für eine optimale Entscheidungsfindung ist eine ausführliche Studie der aktuellen Marktübersicht folglich unerlässlich.

Für die weiterführende Thematik dieser Arbeit ist zunächst die Funktionsweise und Eigenschaft von Laserlicht von Bedeutung, weshalb im folgenden Abschnitt hierauf näher einzugehen ist.

2.2 Funktionsweise und Eigenschaften von Laser

Der im deutschen Sprachgebrauch längst etablierte Anglizismus „Laser“ stellt in Wahrheit ein Akronym dar, dessen vollständige Bezeichnung *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* die grundlegende Funktionsweise bereits gut beschreibt: die Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Ein Laser stellt im Allgemeinen einen rückgekoppelten Verstärker für Strahlung dar, wobei die Verstärkung in einem Lasermedium (beispielsweise einem Kristall, einem Gas oder einer Flüssigkeit) innerhalb eines Resonators erreicht wird, welchem durch optisches Pumpen oder auf andere Weise Energie zugeführt wird, um eine Besetzungsinversion zu erreichen. Bevor jedoch die Erzeugung von Laserlicht näher erörtert wird, sollen zunächst die hervorstechenden Eigenschaften sowie die Entstehungsgeschichte des so vielseitig verwendbaren Lichts Erwähnung finden.

In erster Linie ist emittiertes Laserlicht für seinen hohen Grad an räumlicher und zeitlicher Kohärenz bekannt. Die räumliche Kohärenz drückt sich dabei durch einen stark gebündelten Lichtstrahl mit begrenzter transversaler Ausdehnung und Divergenz aus. Im Gegensatz zur allgemeinen Kugelwelle handelt es sich demnach um so genannte paraxiale Wellen, deren Strahlbündelung eine sehr hohe Bestrahlungsstärke resp. Energiedichte ermöglicht. Die zeitliche Kohärenz impliziert eine polarisierte und monochromatische Welle mit einer einzigen Frequenz (bzw. meist mit einem sehr engen Frequenzspektrum), deren Phasenlage über einen relativ großen Abstand (der so genannten Kohärenzlänge) entlang der Ausbreitungsrichtung korreliert ist. Im Gegensatz zu herkömmlichen Lichtstrahlen, beispielsweise als Produkt einer thermischen Lichtquelle mit einer sofort zufällig variierenden Amplitude und Phase, existiert bei Laserlicht in Bezug auf Zeit und Position eine feste Phasenbeziehung zwischen allen Wellenzügen, was zu einer einheitlichen Wellenfront führt.

Als zu Beginn der 50er Jahre des 20. Jahrhunderts Forscher die theoretischen Grundlagen erkannt hatten, welche für die Koordinierung elektromagnetischer Wellen und somit für die Strahlbündelung erforderlich sind, galt es diese Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen. Da Laserlicht die einzige photonische Strahlungsquelle darstellt, die kein natürliches Vorbild hat, stellte sich somit die Frage, wo der erste Laser das – im wahrsten Sinne des Wortes – Licht der Welt erblicken würde. Schließlich war es Theodore Harold Maiman vom Hughes Research Laboratory in Kalifornien, der am 16. Mai 1960 dem ersten funktionierenden (Rubin-)Laser einen Laserpuls entlockte und schließlich auch den Begriff Laser prägte. Rückblickend wird heute oftmals die Anekdote erzählt, wonach ein Mitarbeiter Maimans diese Geburt mit dem Zitat „Jetzt haben wir eine Lösung, die nach ihrem Problem sucht“ kommentierte. Ein Beleg dafür, wie die von Neugier getriebene Absichtslosigkeit der Grundlagenforschung die Welt nachhaltig verändern kann. Anlässlich des 50 jährigen Bestehens von dieser rein künstlichen Strahlung erschienen 2010 zahlreiche Fachbücher zu diesem Thema; einen detaillierten und anschaulichen Einblick in die Entstehungsgeschichte des Lasers und das damit verbundene technologische Zeitalter der Photonik gibt zum Beispiel Fischer (2010).

2.2.1 Physikalische Grundlagen der Lasertechnologie

Zur Erklärung des Laserlichts, bzw. ganz allgemein zur Beschreibung des physikalischen Phänomens „Licht“ sind zwei parallel gültige, aber grundsätzlich verschiedene Modelle erforderlich – ein wellenoptisches und ein quantenoptisches Modell. Diese Koexistenz beider Modelle wird als Welle-Teilchen-Dualismus bezeichnet und darf keinesfalls als Widerspruch verstanden werden.

Das wellenoptische Modell beschreibt Licht als ein Bündel elektromagnetischer Wellen durch die Kennzeichnung von Amplituden und Phasenlagen. Mit Hilfe der Wellenoptik können beispielsweise Interferenzexperimente erklärt oder, wie in Kapitel 5, Abschnitt 5.2 ausgeführt, die Ausbreitung des Lichts im Raum beschrieben werden. Die Quantenoptik hingegen gibt Auskunft über die Entstehung und Vernichtung von Licht an Materie, seine Wechselwerkeigenschaften und seine physikalischen Erhaltungsgesetze (Energie und Impuls). Die Entstehungsgeschichte und Wirkungsweise dieses Modells ist wesentlich für das weitere Verständnis der Laserphysik und soll daher näher ausgeführt werden.

Ende des 19. Jahrhunderts beobachtete Heinrich Hertz einen lichtelektrischen Effekt, bei dem ultraviolettes Licht in der Lage ist, Elektronen aus der Oberfläche eines Metalls zu lösen. Die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen hängt dabei jedoch nicht von der Lichtintensität, also von der Amplitude einer elektromagnetischen Welle, sondern ausschließlich von der Frequenz und somit der Farbe des Lichts ab. Ein Umstand, der sich nicht mit dem herkömmlichen Wellencharakter des Lichts erklären lässt.

Max Planck konnte zur Jahrhundertwende bei Experimenten zur Wärmestrahlung beobachten, dass sich die Farbfolge eines leuchtenden Körpers nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft ändert. Daraus schloss Planck, dass bei der Wechselwirkung einzelner Elektronen des Metalls mit dem Licht nur „diskrete“ Energieportionen mit bestimmten, quantisierten Werten auftreten. Daraus leitete Planck eine Formel ab, die seine experimentellen Resultate gut reproduzierte und die Energie E proportional zur Frequenz des Lichts ν setzte

$$E = h \cdot \nu. \quad (2.1)$$

Die Quantisierung der Energiewerte wird hierin durch eine Hilfsgröße und später als Planck'sches Wirkungsquantum h bezeichnete Konstante realisiert. Heute zählt h zu den fundamentalen Naturkonstanten der Physik und als Begründer der Quantentheorie erhielt Planck 1918 den Nobelpreis für Physik.

Schließlich war es 1905 Albert Einstein, der den von Planck erkannten Sachverhalt zu interpretieren verstand und eine längst verworfene Idee (wieder) aufgriff: Einstein konnte nachweisen, dass es Lichtteilchen geben musste, die er in seinen Beiträgen als Photonen bezeichnete. Für die Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts wurde er 1921 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

Die Wechselwirkung zwischen Materie (Atomen oder Molekülen) und Licht in Form von Photonen erfolgt über den Übergang unterschiedlicher aber diskreter Zustände der Materie. Dabei muss akzeptiert werden, dass Materie verschiedene diskrete Zustände annehmen und zwischen diesen hin und her springen kann. Diese Übergänge sind ebenfalls diskret (und niemals kontinuierlich) und werden als Quantensprünge bezeichnet. Diese unterschiedlichen Zustände verfügen über unterschiedliche Energieniveaus und können zum Beispiel durch Bestrahlung mit Licht manipuliert werden – nimmt Materie in einem elektromagnetischen Strahlungsfeld Licht auf (Absorption) gelangt sie (über einen Quantensprung) in einen angeregten Zustand höherer Energie. Da Materie bestrebt ist, wieder zurück in den energiearmen Grundzustand zu wechseln, kann umgekehrt Materie auch wieder durch einen Quantensprung Licht aussenden (Emission). Da der exakte Zeitpunkt dieses Quantensprungs und die Richtung des emittierten Lichts wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, nicht vorhersagbar, sondern nur durch eine Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden kann, spricht man in diesem Zusammenhang von einer ungeordneten, spontanen Emission.



Abbildung 2.1: Die spontane Emission des Lichts kommt durch Wechselwirkungen geeigneter atomarer Systeme mit Photonen zustande. Befinden sich geeignete Atome, Moleküle oder Kristalle in einem elektromagnetischen Strahlungsfeld, so können sie aus diesem Photonen absorbieren und aus einem Energiezustand E_1 in einen energetisch höheren Zustand E_2 angeregt werden. Dazu ist es notwendig, dass im Strahlungsfeld Photonen enthalten sind, die genau die Energiemenge $h\nu_{12}$ liefern. Meist kehren die Elektronen nach sehr kurzer Zeit ($\approx 10^{-8}$ Sekunden) von selbst in den energieärmeren Zustand zurück, wobei sie ein Lichtquantum (Photon) der Differenzenergie $h\nu_{12}$ spontan emittieren. Diese Emission ist ungeordnet und erzeugt inkohärente Strahlung. Zeichnung nach (Hecht, 2005) und (Meschede, 2005)

Einen weiteren Baustein in der Theorie der Lichterzeugung stellt das Modell des Wasserstoffatoms nach Nils Bohr (1913) dar. Für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung zählt auch Nils Bohr zu den Nobelpreisträgern der Physik. Im Bohr'schen Atommodell kreist das negativ geladene Elektron in festen Umlaufbahnen um den Atomkern. Durch eine entsprechende Anregung kann das Elektron zwischen den Umlaufbahnen springen und sein Energieniveau ändern. Dabei sind nach Bohr nur diskrete Bahnen/Energieniveaus für die Elektronen erlaubt, womit das Modell ebenfalls mit der Idee der Quantisierung verknüpft ist. Es liegt daher nahe, die als Quantensprünge bezeichneten Übergänge dem Wechsel von Elektronen zwischen unterschiedlichen Umlaufbahnen und damit Energieniveaus gleichzusetzen. Quantensprünge kommen dabei aber nur zustande, wenn die Energie des absorbierten oder ausgesendeten Lichts genau der Energiedifferenz zwischen zwei stationären Umlaufbahnen entspricht. Es müssen daher Photonen einer ganz bestimmten Frequenz oder Wellenlänge beteiligt sein um einen angeregten Zustand zu erzeugen oder zurück in einen Zustand niedrigerer Energie zu kehren – nach diesem Prinzip kann demnach monochromatisches Licht erzeugt werden.

Wieder war es Einstein, der neben der spontanen Emission einen weiteren Weg erkannte, auf dem ein Elektron in ein niedrigeres Energieniveau springen und dabei Licht freisetzen kann. Dieser Vorgang kann erzwungen werden, indem einem zuvor angeregten Elektron erneut die gleiche Energie in Form von zusätzlichem Licht zugeführt wird, die bereits den ersten Quantensprung auslöste (vgl. Abbildung 2.2). Da dieser Quantensprung nicht spontan sondern erzwungen wurde, spricht man von einer stimulierten Emission, bei der sich die Zahl der Photonen jeweils verdoppelt. Eine weitere Besonderheit liegt darin, dass dies als vollständig gerichteter Vorgang angesehen werden muss. Das heißt mit anderen Worten, dass sich bei der Rückkehr in den Grundzustand das stimulierte Licht genauso verhält wie das Licht, das die Stimulation ausgelöst hat. Dies betrifft die Frequenz (resp. Wellenlänge), die Bewegungsrichtung, aber auch die Polarisationsrichtung und die Phasenlage. Die Photonen werden somit in gewisser Weise synchronisiert und erzeugen kohärentes Licht.

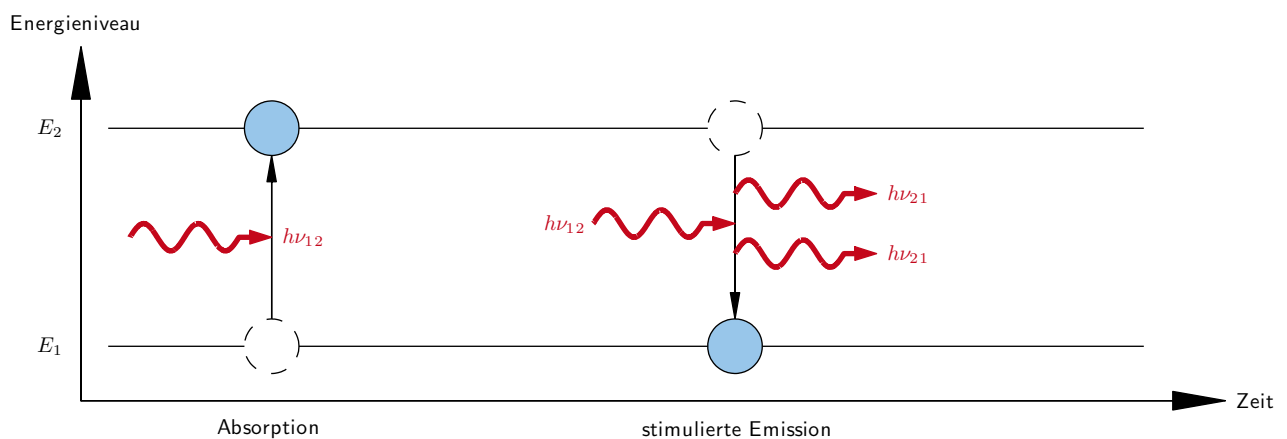


Abbildung 2.2: Die stimulierte Emission zeichnet sich durch einen zusätzlich induzierten Übergang aus, die durch ein weiteres Photon desselben Energiequantums $h\nu_{12}$ verbunden ist. Das so entstehende Licht umfasst neben dem stimulierenden Photon ein freigesetztes Photon, welches mit dem verursachenden Anteil kohärent ist. Zeichnung nach (Hecht, 2005) und (Meschede, 2005)

Beide so freigesetzte Photonen sind nun in der Lage, weitere Atome, die sich in einem angeregten Zustand befinden, zur Emission von Licht zu stimulieren. Im weitesten Sinne stellt dies den Beginn einer Kettenreaktion dar. Diese Kettenreaktion kommt jedoch zum Erliegen, wenn sich in der Materie nicht mehr ausreichend viele Atome oder Moleküle in einem angeregten Zustand befinden. Üblicherweise befindet sich ein Medium mit einer großen Zahl anregbarer Atome im thermischen Gleichgewicht, d. h. es gibt wesentlich mehr Materie, die das niedrigere Energieniveau E_1 besetzen, als Materie, die sich in einem höheren Energieniveau E_2 befindet. Daher ist eine permanente Energiezufuhr erforderlich, die ausreichend Materie in einen angeregten Zustand versetzt. Dieser Vorgang wird als Pumpen bezeichnet, der die natürliche Verteilung innerhalb der Energieniveaus umkehrt – die Folge ist eine Inversion der Besetzungszahlen.

Eine Schwierigkeit bei der stimulierten Emission liegt in der Verweildauer der Materie im angeregten Zustand, der nur etwa 10^{-8} Sekunden beträgt (Kuchling, 2011). Die spontane Emission erfolgt also rasch nach der Anregung und lässt einem weiteren Photon kaum Zeit, andere angeregte Atome oder Moleküle zu stimulieren. Daraus resultiert, dass insgesamt mehr Photonen aus dem Strahlungsfeld absorbiert werden und weniger Photonen durch eine erzwungene Emission freigesetzt werden – das Strahlungsfeld wird infolgedessen schwächer und das Licht erlischt. Umgangen wird dieses Szenario durch die Verwendung eines laseraktiven Mediums, welches neben den beiden bisher genannten Energieniveaus ein drittes Energieniveau E_3 annehmen kann (s. Abbildung 2.3). Bei einem solchen Medium kann das Elektron nicht über eine spontane Emission direkt vom Energieniveau E_3 auf den Grundzustand E_1 fallen, sondern fällt zunächst durch eine spontane Emission (oder unter Freigabe von Wärme) in einen metastabilen Zustand E_2 . Dort beträgt die Verweildauer immerhin etwa 10^{-3} Sekunden und es bleibt deutlich mehr Zeit, um durch ein anderes Photon der Energie $h\nu_{21}$ zum Wechsel in den Grundzustand E_1 stimuliert zu werden. Wie bereits erläutert findet auch hier die für die stimulierte Emission charakteristische Verdopplung der Photonen mit den Eigenschaften des Laserlichts statt.

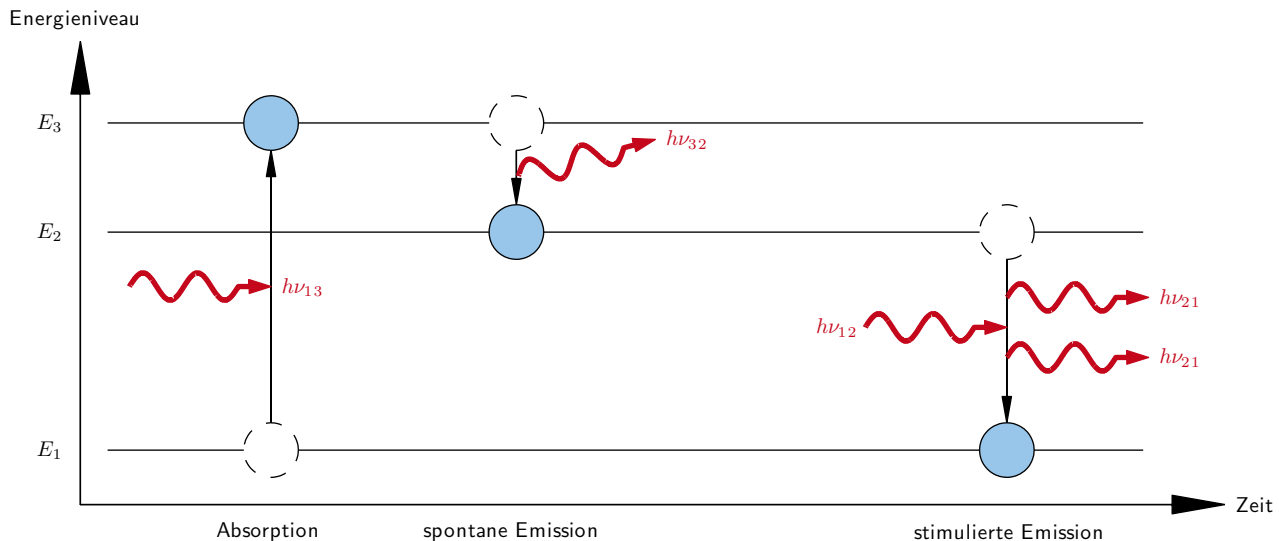


Abbildung 2.3: Bei der stimulierten Emission mit drei Energieniveaus strahlt man Photonen der Energie $h\nu_{13} = E_3 - E_1$ in das System ein und bringt auf diese Weise viele Atome/Moleküle durch optisches Pumpen in einen energetisch noch höheren Zustand E_3 , so werden diese laufend in den nächstniedrigeren Zustand E_2 übergehen und nach und nach dieses Energieniveau überbesetzen (Inversion der Besetzungszahlen). Eine stimulierte Emission durch Photonen der Energie $h\nu_{12}$ erzeugen anschließend kohärentes Laserlicht. Zeichnung nach (Hecht, 2005) und (Meschede, 2005)

2.2.2 Laserbauarten

Laser lassen sich nach mehreren Gesichtspunkten kategorisieren. Dies kann die Wellenlänge, die Leistung oder die zeitliche Länge eines Laserpulses sein. Es ist aber zunächst sinnvoll, hierfür den Aggregatzustand des Lasermediums heranzuziehen. Bei der Erzeugung von Laserlicht können sowohl gasförmige (Kohlendioxid, Stickstoff, Helium-Neon Gemische und Metaldämpfe), flüssige (mit Lösungen organischer Farbstoffmoleküle) als auch feste Stoffe (z. B. Rubinkristalle und Halbleiter) verwendet werden.

Ob Gas-, Farbstoff- oder Festkörperlaser – für alle Bauarten gilt ein generelles Design bestehend aus drei Hauptbestandteilen (vgl. Abbildung 2.4): Neben einem laseraktiven Medium für die Lichtverstärkung sind eine externe Energiequelle und ein mit zwei Spiegeln versehener Resonator für die Verstärkung der Laserwirkung erforderlich.

Um Materie zur Abgabe von Laserlicht zu bringen, muss sie zuvor durch entsprechende Energiezufuhr, dem Pumpen, in einen angeregten Zustand versetzt werden. Die erforderliche Energie zum Erreichen und zur Erhaltung der Inversion der Besetzungszahlen wird in der Regel als elektrischer Strom in das System eingespeist. Werden hierfür Energiequellen in Form von Licht eingesetzt, spricht man von optischem Pumpen, welches meist bei Festkörper- oder Farbstofflasern zum Einsatz kommt. Die Energie wird in diesem Fall durch intensive Strahlung einer thermischen Hochleistungslichtquelle (z. B. einer Blitzlampe) oder einer weiteren Laserquelle zugeführt.

Eine weitere grundlegende Voraussetzung für die Erzeugung von Laserlicht ist die Überschreitung der so genannten Laserschwelle. Die anfänglich durch spontane Emission initiierte Strahlung wird hierfür durch eine geeignete Anordnung zweier planparalleler oder gekrümmter Spiegel immer wieder durch die Zone geleitet, in dem die Besetzungsinversion herrscht. Durch diese Retroreflexion entsteht eine fortwährende Rückkopplung, da die vorher emittierten Photonen ihrerseits wieder zur Induktion verwendet werden können. Wird eine ausreichende Verstärkung erreicht, die den Verlust durch spontane Emission, Streuung und ausgekoppelter Leistung kompensiert, kann die Zahl der induzierten Emissionen größer werden als die Absorptionsrate und es wird überschüssige Strahlung der Energie $h\nu_{12}$ bzw. der medienspezifischen Wellenlänge frei. Dieser Lichtstrahl wird dann durch einen der beiden Spiegel, der teildurchlässig gestaltet ist, ausgekoppelt. Die meisten praktischen Laser enthalten darüber hinaus zusätzliche Elemente, die Eigenschaften wie Polarisierung, Wellenlänge und Strahlgeometrie des emittierten Lichts beeinflussen können.

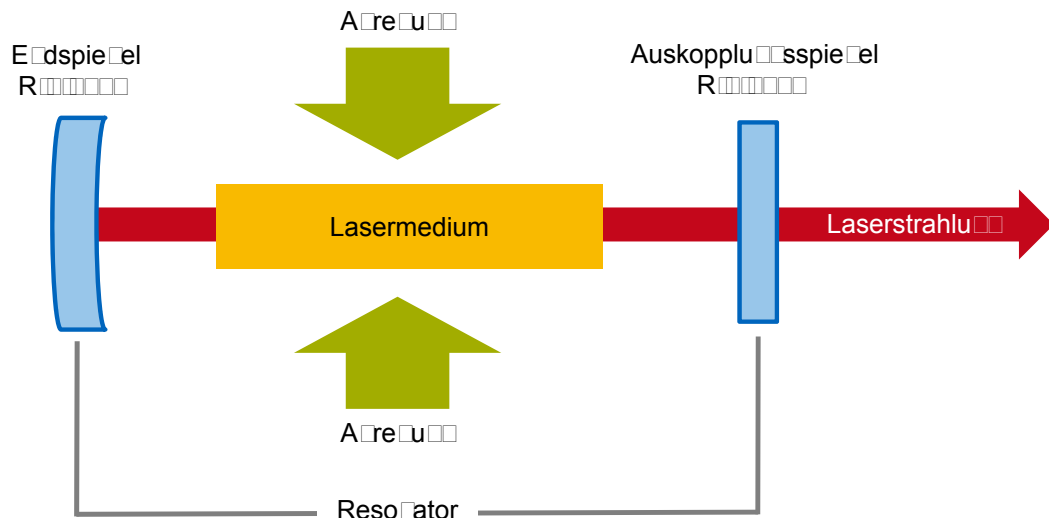


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau eines Lasers. Zeichnung nach (Graf, 2009)

In nahezu allen modernen Instrumenten der geodätischen Messtechnik, z. B. in einem Tachymeter oder einem Laserscanner, wird die Laserstrahlung durch lichtemittierende Diodenlaser (LED-Laser) erzeugt. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für den (nicht nur geodätischen) Sensormarkt ist eine nähere Beschreibung der grundsätzlichen Funktionsweisen von Halbleitern, Lumineszenzdiolen und schließlich von Diodenlasern erforderlich.

Als Halbleiter werden kristalline Stoffe wie beispielsweise Silicium (Si) und Germanium (Ge) bezeichnet. Die Namensgebung geht auf deren Nutzbarkeit als elektrische Leiter zurück; denn ob sie leiten oder isolieren, hängt von ihrer Temperatur ab: Bei tiefen Temperaturen verhalten sich Halbleiter wie Isolatoren, bei zunehmender Temperatur entwickeln sie jedoch eine zunehmende Leitfähigkeit. Möglich wird dies durch chemisch gebundene Elektronen in der äußeren Schale (Valenzelektronen), die bei zunehmender Energieeinwirkung losgelöst werden und als freie Elektronen durch die Kristallstruktur des Halbleiterelements wandern können.

Verstärkt wird dieser Effekt durch den Einbau von Fremdatomen in das Kristallgitter. Dieser Vorgang, der im Weiteren als Dotierung bezeichnet wird, bringt eine Störung des regelmäßigen Kristallgitters mit sich. Bei gängigen Halbleiterbauelementen aus Silicium oder Germanium kommen für p-Gebiete die Elemente Bor, Indium, Aluminium oder Gallium und für n-Gebiete die Elemente Phosphor, Arsen oder Antimon zum Einsatz. Wird ein Dotierelement anstelle eines Siliciumatoms eingebracht, befindet sich an dieser Stelle ein freies oder ein zusätzlich gebundenes Valenzelektron. Ist das Dotierelement in der Lage, Elektronen abzugeben (Donatoren) wird ein Gebiet mit Elektronenüberschuss erzeugt, welches aufgrund der negativen Ladung als n-leitend bezeichnet wird. Die im so genannten Leitungsband existierenden freien Elektronen stehen für einen Ladungstransport zu Verfügung. Im umgekehrten Fall (Akzeptoren) herrscht Elektronenmangel und spricht man von einem p-leitenden Gebiet. Hier kommt eine elektrische Leitfähigkeit zustande, indem ein Loch im Valenzband durch ein benachbartes Elektron gefüllt wird, welches wiederum ein Loch hinterlässt. Es kommt also im so genannten Valenzband zu einem Transport von positiver Ladung.

Treffen infolge gezielter Dotierung in einem Halbleiterkristall ein n- und ein p-leitendes Gebiet aufeinander, kommt es an dieser Grenzfläche zur gegenseitigen Auslöschung der Ladungsträger. Diese Zone wirkt indes wie eine Sperrschicht mit einem hohen elektrischen Widerstand und lässt Strom nur in einer Richtung passieren. Ein solches Bauelement wird als Diode bezeichnet und kann z. B. eingesetzt werden, um Wechselstrom in Gleichstrom umzuwandeln.

Eine Licht emittierende Diode (LED) bzw. Leuchtdiode besitzt einen ähnlichen Aufbau wie eine pn-Halbleiterdiode, wobei hier der Effekt der Photonenemission im Vordergrund steht. Die Emission von Licht entsteht durch Rekombinationsprozesse von Elektronen und Löchern am Übergang zwischen p- und n-dotiertem Bereich. Ist die geometrische Gestaltung so ausgeführt, dass die Endflächen des Kristalls als Spiegel fungieren, entsteht zudem ein optischer Resonator. Wird durch Anlegen eines elektrischen Gleichstroms eine Besetzungsinver-

sion (elektrisches Pumpen) erzeugt, kann die stimulierte Emission zum dominierenden Strahlungsprozess werden und es kommt zur Emission von Laserstrahlung.

Etwa 90% der heute verwendeten Laserdioden sind Gallium-Arsenid- (Ga-As-) Halbleiter, die ihre Strahlung bei einer Wellenlänge von etwa 875 bis 960 nm abgeben. Die meisten Laserdioden sind, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, so genannte Kantenemitter, bei denen das Laserlicht an der Bruchkante des Kristalls quer zum angelegten Gleichstrom aus der Sperrschicht (aktive Zone), abgestrahlt wird.

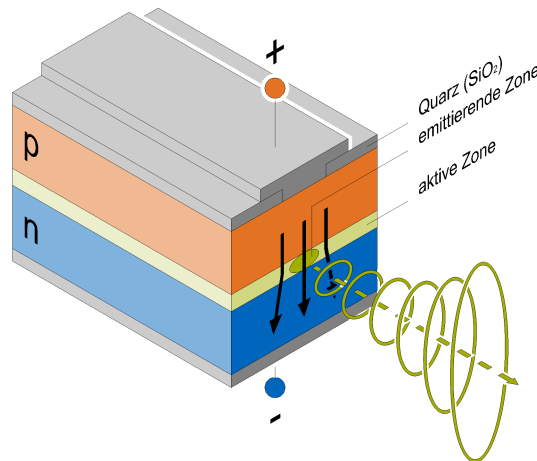


Abbildung 2.5: Schematischer Aufbau eines einfachen Diodenlasers konzipiert als Kantenemitter. Zeichnung nach (Fischer, 2010)

Durch die geringe Dicke der emittierenden Sperrschicht von nur 1 bis 2 μm wirkt diese jedoch wie ein enger Spalt, so dass das austretende Laserlicht starken Beugungserscheinungen unterliegt. Dies führt zu einer hohen Strahldivergenz von 25° bis 35° quer zur aktiven Schicht. In der dazu orthogonalen Komponente ist die Divergenz mit etwa 6° bis 25° deutlich geringer, da die Schichtbreite größer als die Dicke der aktiven Zone ist (Eichler u. Eichler, 2015). Der resultierende Laserstrahl hat demzufolge ein elliptisch ausgeprägtes Querprofil. Die gegenüber anderen Lasern schlechtere Strahlqualität macht LED-Laser für die Materialbearbeitung weniger geeignet und auch für Zwecke der Messtechnik muss die Divergenz im Allgemeinen durch eine Optik nachträglich korrigiert werden, bevor der stärker gebündelte Laserstrahl auf die Messstrecke ausgesandt wird (Fischer, 2010). Der Vorteil liegt allerdings in der Einfachheit und Kompaktheit des Aufbaus. Halbleiterlaser haben eine Dimension von weniger als 1 mm^3 , was den Einbau in andere Systeme begünstigt. Zudem sind sie in der Herstellung kostengünstig und für eine hohe Lebensdauer ausgelegt, was sie wiederum für den Einsatz im Dauerbetrieb attraktiv macht. Das Pumpen geschieht, wie bereits erwähnt, über das direkte Anlegen eines elektrischen Stroms, der bei einem vergleichsweise hohen Wirkungsgrad von 20 bis über 25% in Laserleistung umgewandelt wird.

Wird bei einem kantenemittierenden Laser die aktive Schicht in einem Winkel von 45° abgeätzt, erfährt der Laserstrahl an dieser Stelle eine Totalreflexion und wird im rechten Winkel abgelenkt. Da hierbei die zweite spiegelnde Fläche des Resonators entfällt, ist ein parallel zur aktiven Schicht liegender Spiegel notwendig. Schlussendlich verlässt der Laserstrahl den Halbleiterchip nun nicht mehr an der Kante, sondern an der Oberfläche einer Dotierungsschicht – eine solche Laserbauart wird als horizontal oberflächenemittierende Laser (engl. *horizontal-cavity surface-emitting laser*, kurz HCSEL) bezeichnet. Die vertikale Ausführung (engl. *vertical-cavity surface-emitting laser*, kurz VCSEL) weist einen deutlich komplexeren Aufbau mit mehreren Dotierungsschichten auf. Kernstück ist hier ein vertikal angeordneter Resonator, deren verspiegelte Flächen nicht die Kantenflächen des Halbleiterlasers darstellen, sondern als parallele Schichten zur aktiven Zone aufgebracht sind. Weitere Einzelheiten zum schematischen Aufbau von VCSEL sind (Fouckhardt, 2011) und (Bachmann, 2011) zu entnehmen. Oberflächenemitter haben gegenüber Kantenemittern zwar eine geringere Leistungen, besitzen jedoch eine bessere Strahlqualität. Weitere Vorteile der oberflächenemittierenden Laser liegen in der Kühlung und Montage. Die Einsatzgebiete für VCSEL erstrecken sich von der Glasfaser-Datenübertragung bis zur Konzentrationsmessung von Gasen.

2.2.3 Betriebsmodi

Prinzipiell werden Laser neben der Bauart bzw. dem Medium auch nach ihrer zeitlichen Signalform unterschieden. Dabei treten zwei Betriebsmodi auf, in denen ein Laser betrieben werden kann: ein kontinuierlicher und ein gepulster Modus.

Einige Laseranwendungen, z. B. zum Abtasten einer CD-Oberfläche, erfordern einen ununterbrochenen Lichtstrahl mit konstanter Ausgangsleistung. Ein solcher Laser arbeitet im so genannten Dauerstrichbetrieb und erzeugt eine kontinuierlich Welle (engl. *continuous wave*, kurz *cw*). Voraussetzung für den Dauerstrichbetrieb ist eine permanente Energiezufuhr, um das Niveau der Besetzungsinversion im Medium stets aufrecht zu halten.

Für manche laseraktive Medien ist ein kontinuierliches Pumpen jedoch nicht praktikabel oder aufgrund einer übermäßigen Hitzeentwicklung nicht möglich. Zudem gibt es zahlreiche Laseranwendungen, insbesondere im Bereich der Materialbearbeitung, die einen unterbrochenen Lichtstrahl in Form von Lichtblitzen erfordern. Da hier das Licht in zeitlich begrenzten aber periodisch sehr exakt gepulsten Lichtportionen abgegeben wird, wird dieser Modus als Pulsbetrieb bezeichnet. Je nach zeitlicher Länge der Pulse spricht man von Kurz- oder Ultrakurzpulslasern, die derzeit bereits in der Lage sind, Pulse im Bereich von Femto-Sekunden zu erzeugen.

Beide Betriebsmodi finden für die lasergestützte Distanzmessung Anwendung, auch wenn sich deren Mess- bzw. Auswertprinzipien grundsätzlich unterscheiden. Eine eingehende Beschreibung der Verfahren wird in den Abschnitten 2.3.2 (Pulsmessverfahren) und 2.3.3 (Phasenvergleichsverfahren) vorgenommen. Als wesentlicher Unterschied in Bezug auf die Leistungsmerkmale liegen die Vorteile beim Impulsverfahren bei einer deutlich größeren Reichweite, da mit einem Laserpuls größere Leistungspakete generiert werden. Zugleich kann aufgrund einer limitierten Zeitbasis (vgl. Folgeabschnitt 2.2.4) eine größere Augensicherheit erreicht werden. Die Vorteile des Phasenvergleichsverfahrens liegen hingegen in der sehr hohen Messgeschwindigkeit und räumlichen und Auflösung bei einer geringeren Messunsicherheit im nahen und mittleren Entfernungsbereich.

2.2.4 Strahlenschutz und Laserklassen

Natürliche optische Strahlung, wie beispielsweise ultraviolette (UV) oder infrarote (IR) Strahlung, können für das menschliche Gewebe sowohl nützlich wie auch gefährlich sein. Dabei können falsch dosierte Bestrahlungen zu akuten und langfristigen Schädigungen der Haut, inklusive der Netzhaut führen. Laserstrahlen erstrecken sich über einen Wellenlängenbereich von etwa 160 bis 10000 nm und reichen somit vom ultravioletten über das sichtbare Licht bis zum fernen Infrarotbereich. Damit zählen Laser ebenfalls zu den Lichtquellen optischer, wenngleich vollständig künstlicher, Strahlung. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Laserstrahlen auf biologisches Gewebe sind der normalen optischen Strahlung dabei durchaus ähnlich, wobei deren Ausmaß, neben unterschiedlichen Reflexions-, Streuungs- und Absorptionseigenschaften des Gewebes, in erster Linie von Wellenlänge, Bestrahlungsdauer und Intensität abhängig sind.

Im Hinblick auf die Augensicherheit ist anzumerken, dass für Wellenlängen im Bereich von etwa 350 bis etwa 1200 nm die Hornhaut transparent ist und auch bei relativ geringer Leistung von wenigen Milliwatt Schäden auf der Netzhaut entstehen können. Diese Transparenz endet bei etwa 1400 nm, wobei im anschließenden Wellenlängenbereich mit oberflächlichen Verbrennungen und Verkohlungen der Hornhaut zu rechnen ist. Laser im Ultraviolettbereich können zudem fotochemische Veränderungen des Gewebes verursachen, die beispielsweise eine Trübung der Augenlinse zur Folge haben. Der Begriff der Augensicherheit kann sich demnach nicht auf den für Menschen sichtbaren Spektralbereich von 400 bis 700 nm beschränken, sondern besitzt im gesamten Bereich, in dem mit Schädigungen des Auges zu rechnen ist, Gültigkeit. Abgesehen von der potenziellen Gefahr für das Augenlicht können Laserstrahlen im Nahinfrarot-Bereich (um 1000 nm) tief unter die Haut vordringen und zu schmerzlosen aber schlecht heilenden Verbrennungen im Unterhautgewebe führen. Für die Bestrahlungsdauer müssen zum einen extrem kurze Pulse im Bereich von Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ Sekunden}$) mit hoher Intensität sowie kontinuierlich strahlende Laserquellen berücksichtigt werden. Zum anderen gilt der Lidschlussreflex als eine wichtige Zeitbasis für die Betrachtung von Laserstrahlen mit

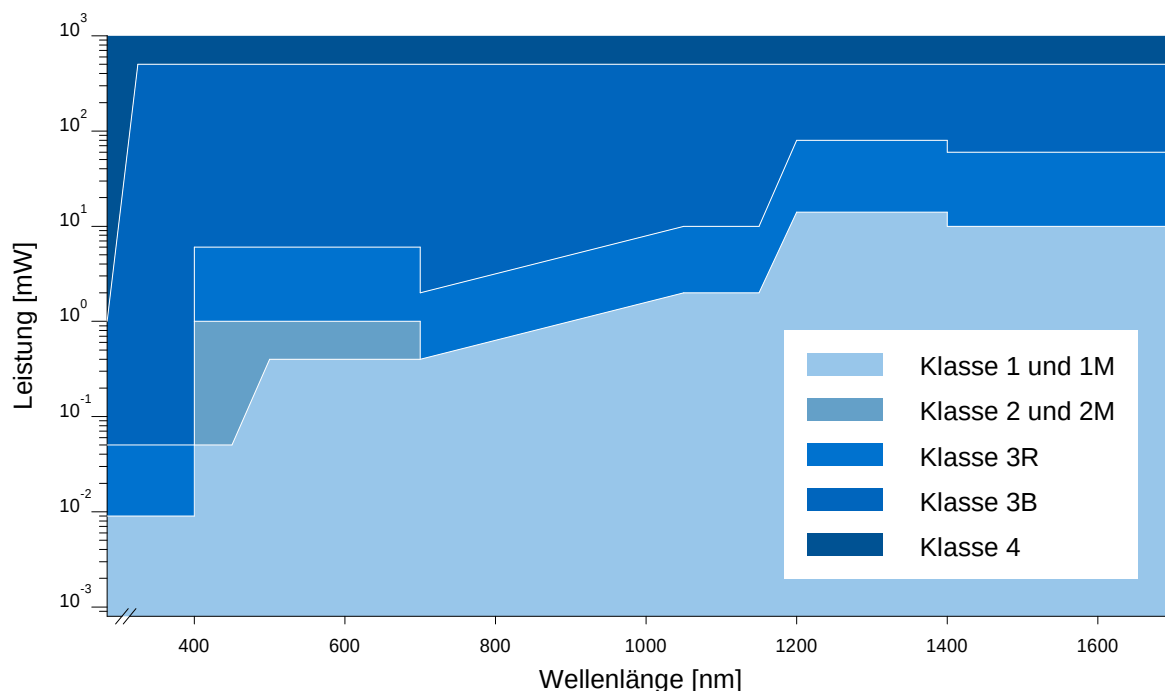


Abbildung 2.6: Maximal zulässige Leistungen im Dauerstrichbetrieb nach EN 60825-1

bloßem Auge. Dieser wird durch die Blendwirkung binnen 0,25 Sekunden ausgelöst und dient für die Laserklassen 2 und 2M als Zuordnungskriterium. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass dieser Reflex bei weniger als 20% einer Testgruppe von 1400 Probanden gegeben war und daher von einem ausreichenden physiologischen Schutzmechanismus der Augen auf Basis des Lidschlussreflexes im Regelfall nicht ausgegangen werden kann (Reidenbach u. a., 2003). Zudem ist die Intensität, also die Lichtenergie pro Zeit pro Fläche, in vielen Laseranwendungen durch eine optische Strahlbündelung erhöht, so dass besondere Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen bei der Anwendung von Laserstrahlung prinzipiell zu beachten sind. Schließlich sind die so genannten Grenzwerte der zugänglichen Strahlung (GZS) zu erwähnen, die entweder als feste oder als wellenlängenabhängige Grenzwerte definiert sind.

Für die Festlegung der zu treffenden Sicherheitsvorkehrungen werden Laser nach DIN EN 60825-1/11.01 entsprechend ihrem Gefährdungspotenzial (insbesondere des Augenlichts) in Klassen eingeteilt (siehe Abb. 2.6 und Tab. 2.1). Dieser Normungsstandard wurde im Jahr 2001 erheblich überarbeitet und mündete in der Einführung von drei neuen Laserklassen (1M, 2M und 3R) sowie der Abschaffung der Klasse 3A. Entsprechend der berufsgenossenschaftlichen Unfallverhütungsvorschriften zum Betrieb von Lasereinrichtungen (BGI, 2003, 2004) lassen sich die Laserklassen folgendermaßen beschreiben:

Die Strahlung der Klassen 1 und 1M kann im sichtbaren oder unsichtbaren Bereich liegen und ist unter allen vorhersehbaren Betriebsbedingungen als ungefährlich und augensicher einzustufen. Darunter zählen jedoch auch Laser, die durch eine bauliche Einhausung eingekapselt sind, so dass ein Austritt von Strahlung vollständig verhindert und Nutzern der Zugang zur Strahlung verwehrt bleibt. Laser der Klasse 1 können demnach durchaus eingebettete Laser einer höheren Laserklasse enthalten. Bekannte Beispiele hierfür sind CD- und DVD-Player, mit Laserkomponenten der Klasse 3R oder 3B sowie Laserdrucker mit eingebetteten Lasern der Klasse 4. Speziell Strahlung der Klasse 1M ist für die direkte Betrachtung mit bloßem Auge zwar sicher, aber möglicherweise gefährlich, wenn sie mit Hilfe optischer Instrumente (Ferngläser, Teleskope, Mikroskope, Lupe aber nicht verschreibungspflichtigen Brillen) betrachtet wird.

Laser der Klasse 2 beinhalten sichtbares Laserlicht im Bereich von 400 bis 700 nm und sind für die versehentliche Betrachtung unter allen Betriebsbedingungen augensicher. Jedoch möglicherweise nicht sicher für eine Person, die absichtlich für mehr als 0,25 Sekunden in den Laserstrahl starrt und ihre natürliche Abwehrreaktion überwindet. Die Klasse 2M umfasst denselben Wellenlängenbereich wie Klasse 2, und ist ebenfalls bei versehentlicher Betrachtung mit bloßem Auge sicher. Eine Gefahr für das Auge kann aber möglicherweise, analog zu Klasse 1M, durch die Verwendung optischer Instrumente entstehen.

Tabelle 2.1: Laserklassen nach DIN EN 60825-1/11.01

Laser- klasse	Grundkonzept	Wellenlänge [nm]	Zeitbasis [s]	Grenzwert (GZS) [mW]
1	Augensicher. Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich oder der Laser ist in einem geschlossenen Gehäuse	alle	100 oder 30000 (kontinuierlich)	wellenlängenabhängig
1M	Augensicher ohne Verwendung optischer Instrumente; unsicher bei Verwendung optischer Instrumente (Lupen, Ferngläser)	302,5 - 4000	100 oder 30000 (kontinuierlich)	wellenlängenabhängig
2	Augensicher durch Abwendungsreaktion plus Lidschlussreflex	400 - 700	0,25	1
2M	Augensicher durch Abwendungsreaktion plus Lidschlussreflex (wie Klasse 2) ohne Verwendung optischer Instrumente	400 - 700	0,25	1
3R	Potenziell gefährlich, das Risiko ist etwas geringer als in der Klasse 3B Die Strahlung ist max. fünfmal höher als die GZS-Werte von Klasse 1 (bzw. Klasse 2)	400 - 700 302,5 - 400 und > 700	0,25 100	5 × GZS Klasse 2 5 × GZS Klasse 1
3B	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen auch für die Haut. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich.	alle	10	500
4	Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Beim Einsatz dieser Laserstrahlung besteht Brand- oder Explosionsgefahr.	alle	100 oder 30000 (kontinuierlich)	> 500

Strahlung der Klasse 3R wird als potentiell gefährlich eingestuft, es gilt aber ein geringeres Risiko als für die Klasse 3B, da das Risiko eines Augenschadens durch die Einführung von Grenzwerten der zugänglichen Strahlung verringert wird: im sichtbaren Wellenlängenbereich auf das Fünffache des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Klasse 2 (also 5 mW); in den übrigen (unsichtbaren) Wellenlängenbereichen auf das Fünffache des (wellenlängenabhängigen) Grenzwertes der zugänglichen Strahlung für Klasse 1. Sichtbare Laser im Dauerstrichbetrieb leisten zwischen 1 und 5 mW und sind daher üblicherweise der Klasse 3R zugeordnet. Die Klasse 3B umfasst alle Wellenlängenbereiche und ist für das Auge gefährlich, häufig auch für die Haut. Die direkte Betrachtung eines Strahlenbündels kann über einen diffusen Reflektor (ohne auf das Auge gerichtete Strahlanteile) sichergestellt werden, wenn zudem ein Sicherheitsabstand von 13 cm und eine maximale Beobachtungsdauer von zehn Sekunden eingehalten werden. Für eine kontinuierliche Laserquelle darf die maximale zugängliche Strahlung einen Grenzwert von 500 mW nicht überschreiten.

Lasereinrichtungen der höchsten Klasse 4 sind Hochleistungslaser mit einer Leistung von über 500 mW, die als sehr gefährlich für Auge und Haut einzustufen sind. Auch die Betrachtung durch diffus reflektierendes Material kann gefährlich sein. Eine typische Anwendung ist die Materialbearbeitung und es besteht Brand- und Explosionsgefahr.

2.2.5 Anwendungen in der Messtechnik

Aus den besonderen Eigenschaften der Laserstrahlung ergeben sich verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten, die in ihrem vollen Umfang nicht aufzuführen sind, unseren Alltag aber in den Bereichen Unterhaltung/Medien, Datenkommunikation und Medizin wesentlich mitbestimmen. Auch die Fertigungstechnik nutzt beim Bearbeiten verschiedener Materialien vor allem die hohe Leistungsdichte – eingesetzt werden dafür Laser mit Leistungen bis in den Kilowattbereich – und die sehr starke Bündelung des Laserstrahls. Dadurch ist ein punktgenaues Schweißen, Schneiden oder Bohren von Werkstücken möglich.

In der Mess- und Prüftechnik werden hingegen meist Laser geringer Leistung für hochpräzises, berührungsfreies und – im Gegensatz zur Materialbearbeitung – zerstörungsfreies Messen eingesetzt (Donges u. Noll, 1993). Die meisten modernen Produktionsprozesse haben einen hohen Automatisierungsgrad erreicht, in dem für eine sichere Prozessführung sowohl der Ablauf einzelner Prozessschritte als auch die Qualität der hergestellten Produkte laufend überwacht werden müssen. Berührungsfreie Messverfahren mit Lasern erlauben binnen kürzest möglicher Reaktionszeit eine effiziente Prozessregelung. Sie sind außerdem unabhängig vom Umgebungslicht sowie der Temperatur und können somit an unterschiedliche Oberflächeneigenschaften während der Prüfung angepasst werden (Noll, 2003). Die Anwendungsgebiete sind demnach auch hier äußerst vielfältig: die Messung von geometrischen Größen (Entfernungen, Materialdicken) und deren Änderung, Geschwindigkeiten, Schwingungen aber auch Teilchendichten und Temperaturen zählen hierbei zu den wesentlichen Gesichtspunkten.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Dissertation sind insbesondere Laseranwendungen aus dem Bereich der Geodäsie von Interesse. Auch hier hat sich die Technologie in zahlreichen Messverfahren und Anwendungen durchgesetzt, wie die nachfolgende Auflistung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Beschreibung der Funktionsweise) verdeutlicht:

- Im Bauwesen werden Richt- und Rotationslaser installiert mit deren Hilfe Leitlinien oder -ebenen generiert werden um z. B. den Einbau von Kanalrohren oder die Erstellung eines Erdplanums korrekt auszuführen.
- Die Maschinensteuerung – als Teil der Ingenieurnavigation – nutzt ebenfalls Laserleitlinien in Verbindung mit Lateraleffektdioden oder auch Positions-Sensitiven-Dioden (PSD), womit etwaige Abweichung zur Leitlinie z. B. im Tunnelvortrieb frühzeitig erkannt und korrigiert werden können.
- Eine besondere Rolle nehmen Laser bei direkten und indirekten Laufzeitverfahren (s. Abschnitt 2.3) der absoluten Abstandsmessung ein: sowohl in der Tachymetrie (und zwar sowohl auf Retroreflektoren als auch im berührungslos messenden Modus) als auch in den meisten terrestrischen und luftgetragenen Laserscannern. Letztere werden inzwischen oftmals unter der Bezeichnung LIDAR aufgeführt, was als direkte Ableitung des Akronyms Laser für *Light Detection and Ranging* steht.
- Die Lasertriangulation nutzt eine Laserdiode zur Erzeugung eines Messpunktes oder einer Messlinie, welche/r anhand einer CCD-Aufnahme zur Bestimmung von Abständen oder Profilen herangezogen wird. Eine klassische Umsetzung hierfür sind Laserscanner für den Nahbereich (vgl. auch Abschnitt 2.3.7).
- In der Navigation und Erdbeobachtung werden Laserkreisel in Gyroskopen eingesetzt, um die Orientierung von Flugzeugen u. v. m. festzustellen. Übertragen auf die Erdbeobachtung werden Ringlaser (z. B. am Geodätischen Observatorium in Wettzell) eingesetzt, um Tageslängenschwankungen und Polbewegungen hochpräzise zu erfassen.
- Die Interferometrie als weit genutzte Messmethode in der Physik basiert auf der Überlagerung von ausgesandten und wieder empfangener Wellen. In der Geodäsie wird die Laserinterferometrie zur Messung relativer Distanzunterschiede mit hoher Präzision verwendet. Kombiniert mit Komparatorbahnen werden Laserinterferometer für die Kalibrierung von Längenmaßen (z. B. Invarbandlatten für Präzisionsnivelements) genutzt.
- Lasertracker nutzen zur Distanzmessung ebenfalls ein Laserinterferometer, dessen Laserstrahl automatisch einem Reflektor folgen kann. Damit stellen sie als Pendant zur Tachymetrie eine mobile Lösung zur hochgenauen Bestimmung von 3D-Koordinaten im Nahbereich dar. Da Lasertracker nur bedingt feldtauglich sind, werden Sie vornehmlich zur Digitalisierung von Objekten, zur Messung großer Bauteile in der Qualitätssicherung, zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen und in der Industrievermessung verwendet.
- In der Geodäsie weit weniger verbreitet, aber für die Materialprüfung, insbesondere im Bauwesen, relevant, sind Laser-Doppler-Vibrometer. Mit einem Vibrometer lassen sich mechanische Schwingungen in ihrer Frequenz und Amplitude quantifizieren. Hierzu wird ein Laser auf die zu messende Oberfläche fokussiert. Aufgrund des Doppler-Effekts verschiebt sich bei einer Bewegung der Oberfläche die Frequenz des zurückgestreuten Laserlichts. Diese Frequenzverschiebung wird im Vibrometer wiederum interfe-

rometrisch ausgewertet. Analog zu Laserscannern kann ein Scanning-Vibrometer mit entsprechender Strahlablenkung (s. Abschnitt 2.4) auch eine flächenhafte Messung von Schwingungen ermöglichen.

2.3 Messprinzipien der berührungslosen Distanzmessung

Als gemeinsame Grundlage für alle relevanten Verfahren der elektronischen Distanzmessung, welche sich für eine berührungslose Distanzmessung eignen, sind elektromagnetische Wellen anzusehen. Sie dienen entweder zur reinen Punktsignalisierung (vgl. Abschnitt 2.3.7), direkt als Messsignal, oder aber wie bei den meisten Messverfahren als Trägerwelle (vgl. Abschnitt 2.3.1), welche durch unterschiedliche Modulationsverfahren mit einem pulsformigen oder periodischen Signal versehen wird.

Die Wahl der genutzten Trägerwellenlänge λ ist dabei von der Schichtung der Messatmosphäre abhängig, da die Durchdringbarkeit der Atmosphäre für elektromagnetische Wellen von deren wellenlängenabhängiger Ausbreitungsgeschwindigkeit (Dispersion) und Streuung an und Absorption durch Aerosolpartikel wie Staub und Wassertröpfchen beeinflusst wird (Extinktion). So werden in der Fernerkundung für radargestützte Anwendungen Mikrowellen mit einer Wellenlänge von 8 mm bis 1 m eingesetzt, da diese nicht nur die Atmosphäre ungehindert durchdringen, sondern auch – je nach Frequenzband – in der Lage sind, Vegetationsoberflächen zu durchdringen und somit zur Unterscheidung von Vegetationstypen verwendet werden können (Albertz u. Wiggenhagen, 2009). Für terrestrische Anwendungen werden aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften in der erdnahen Troposphäre bevorzugt Wellenlängen mit einer Wellenlänge von 400 bis 1300 nm (Joeckel u. a., 2008), also aus dem Bereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots eingesetzt. Im Falle der Verwendung dieses spektralen Messfensters ist in diesem Zusammenhang auch der Begriff elektrooptische Distanzmessung gebräuchlich.

Die Verwendung von Lasern als Strahlungsquelle elektromagnetischer Wellen spielt insbesondere für die berührungslose Distanzmessung und somit für scannende Messverfahren eine übergeordnete Rolle. Zum einen eignen sich die in Kapitel 2.2 beschriebenen Eigenschaften der zeitlichen und räumlichen Kohärenz für die Übertragung von Informationen über weite Entfernungen; zum anderen bietet die äußerst schmale und definierbare spektrale Bandbreite (monochromatisches Licht) und die geringe Divergenz der Messkeule die Möglichkeit, eine hohe Energiedichte zu realisieren und zu transportieren. Somit lassen sich auch bei Messungen auf nicht signalisierte Oberflächen, bei der nur ein Bruchteil der auftreffenden Energie wieder zurück zur Empfangseinheit gelangen wird, Reichweiten bis zu mehreren hundert Metern umsetzen. Forderungen an die gewünschte Augensicherheit und der damit verbundenen Sicherheitsklasse des verwendeten Lasers (siehe Tabelle 2.1) schränken hierbei jedoch die Maximierung der Reichweite durch Verwendung leistungsstärkerer und gebündelter Laser ein.

Die daraus entstandenen und gängigsten Messprinzipien der elektronischen Distanzmessung für den berührungslosen Einsatz waren bisher nach (Rüeger, 1996) in die drei Grundprinzipien

- direkte Laufzeitverfahren
- indirekte Laufzeitverfahren und
- Triangulationsverfahren

untergliedert. Diese bzw. deren Kombinationen und aktuelle Technologien werden im Folgenden näher beschrieben. Eine kritische Betrachtung hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Grenzen sind zudem (Amann u. a., 2001) zu entnehmen.

2.3.1 Grundlagen der direkten und indirekten Laufzeitverfahren

Für optische Laufzeitverfahren gilt das Prinzip des doppelten Weges, da ein Signal zwischen der Aussendung, der Reflexion an einem kooperativen oder nicht-kooperativen Ziel und dem Empfang einen Hin- und Rückweg absolviert. In diesem Zusammenhang kann also von einer gemeinsamen Anordnung von Sende- und Empfangsoptik gesprochen werden (s. Abb. 2.8). Bei Laufzeitverfahren (engl. *Time-Of-Flight*, TOF) werden an dem

erwünschten Reflexionspunkt vornehmlich Tripelprismen eingesetzt; für die berührungslose Distanzmessung muss die Oberfläche des Messobjektes selbst als Reflektor wirken, wobei eine diffuse Reflexion starke Verluste der Signalstärke mit sich führt und die Reichweite deutlich einschränkt.

Daraus folgt für die zu messende Distanz D und die direkt zu messenden Signallaufzeit Δt die einfache Beziehung

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0}{n} \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

mit der im Vakuum gültigen Lichtgeschwindigkeit c_0 unter Berücksichtigung der atmosphärischen Bedingungen resp. des integralen Brechungsindex n .

Harmonische Wellen aus dem Spektralbereich des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots können nur bei interferometrischen Verfahren unmittelbar für eine (relative) Distanzmessung einsetzen lassen. Wird auf eine solche Welle jedoch ein zusätzliches Signal in Form einer weiteren Welle oder einer Wellengruppe aufgeprägt, kann dieses als identifizierbares Merkmal auf der Trägerwelle angesehen werden, was wiederum Distanzmessungen auch über große Reichweiten ermöglicht. Ein solches Vorgehen wird als Modulation bezeichnet, welche aufgrund unterschiedlicher Modulationstechniken eine weitere Untergliederung der Laufzeitverfahren erfordert.

Aus diesen Modulationstechniken resultieren für die Laufzeitmessung eine direkte Zeitmessung über gepulste Signale (Pulsmessverfahren, vgl. Abschnitt 2.3.2 bzw. Abbildung 2.8) oder eine indirekte Zeitmessungen durch Amplitudenmodulation (Phasenvergleichsverfahren, vgl. Abschnitt 2.3.3) oder Frequenzmodulation (2.3.6).

Die in terrestrischen Laserscannern für den mittleren und fernen Distanzmessbereich oder in Tachymeter eingebauten EDM-Einheiten mit einer Laufzeitmessung nutzen zumeist das Pulsmessverfahren oder das Phasenvergleichsverfahren.

2.3.2 Pulsmessverfahren

Für das Pulsmessverfahren wird ein Modulationsverfahren eingesetzt, das die Amplitude einer hochfrequenten Trägerwelle mit einem niederfrequenten Nutzsignal vereinigt. Abbildung 2.7 illustriert eine solche Amplitudenmodulation für einen einzelnen Puls.

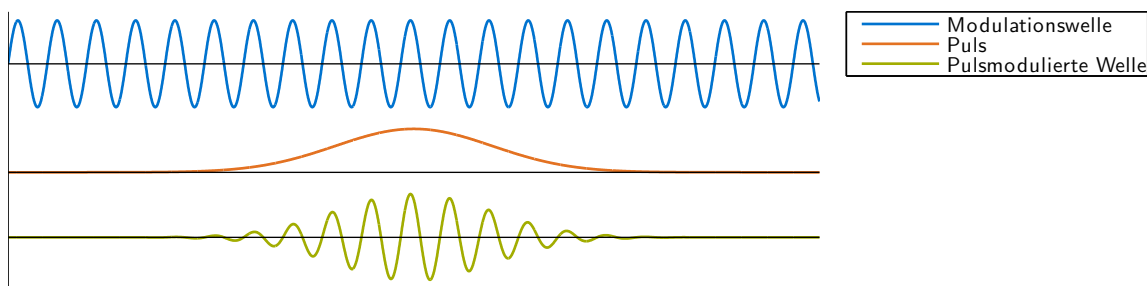


Abbildung 2.7: Signale der Amplitudenmodulation für das Pulsmessverfahren

Beim Pulsmessverfahren sendet das Instrument demnach kurze (typischerweise im Bereich von wenigen Nanosekunden; eine Pulslänge von 10 ns entspricht dabei einem Lichtbalken von 3 m Länge) Laserpulse aus und bestimmt die Laufzeit Δt über eine direkte Zeitmessung, womit sich Formel (2.2) eindeutig bestimmen lässt. Berücksichtigt man die hohe Geschwindigkeit des Lichts, ergeben sich für eine gewünschte Distanzauflösung von 1 mm eine Anforderung an die Auflösung der Uhr von $6,7 \cdot 10^{-12}$ Sekunden oder 6,7 Pikosekunden (ps). Mit heutigen Zeitmessbausteinen, die sich in Pulslaufzeitgeräten für größere Distanzen realisieren lassen, erzielt man eine zeitliche Auflösung von etwa 50 ps, was einer Abstandsauflösung von ca. 7 mm entspricht (Wölfleschneider, 2009). Die Streckengenauigkeit ist beim Pulsmessverfahren demnach in erster Linie von der Qualität der Uhr, resp. deren Linearität und Auflösung, und nicht von der Entfernung abhängig.

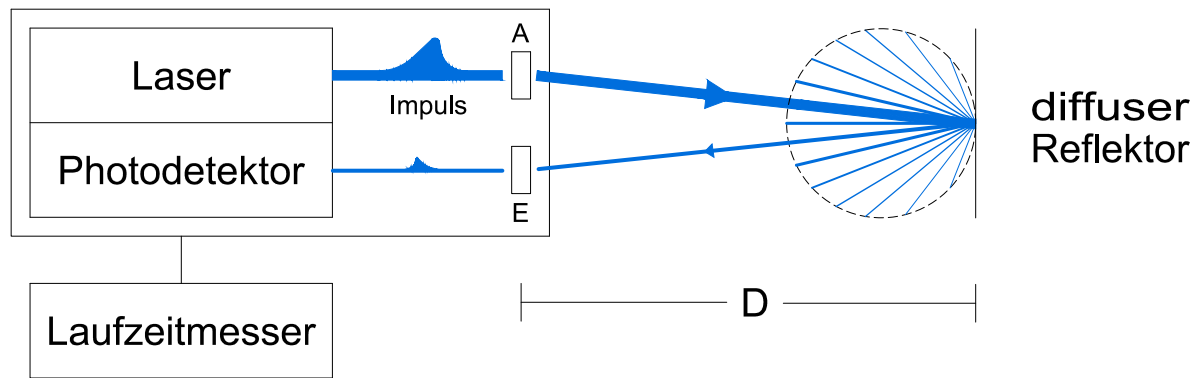


Abbildung 2.8: Anordnung von Sende- und Empfangsoptik beim Pulsmessverfahren. Zeichnung nach (Joeckel u. a., 2008)

Da zudem Laserpulse mit einer hohen Intensität versehen werden können, bietet sich dieses Verfahren auch zur Messung sehr großer Entfernungen an – z. B. im Rahmen des *Lunar Laser Ranging* (LLR), bei dem durch Pulsmessung auf Reflektoren der Abstand zwischen Erde und Mond bestimmt wird. Jedoch beeinträchtigen bei großen Distanzen atmosphärische Einflüsse die Stabilität der Pulsform und bei berührungslosen Distanzmessungen werden die Pulsformen zudem durch die Oberflächenbeschaffenheit stark deformiert, was die Detektion eines exakten Zeitpunktes des wieder eintreffenden Pulses erschwert. Angewandte Detektionsmethoden werden z. B. in (Stilla u. a., 2009) vorgestellt.

Um eine höhere Auflösung und Präzision zu erhalten, werden daher häufig mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt, ausgewertet und gemittelt, wobei vor dem Aussenden des nächsten Pulses so lange gewartet wird, bis kein Echosignal mehr unterwegs sein kann. Dies führt zu einer Beschränkung der Messgeschwindigkeit, insbesondere im Vergleich zum anschließend vorgestellten indirekten Laufzeitverfahren.

Befinden sich innerhalb der Messkeule mehrere kleine oder halbtransparente Objekte, so erzeugen diese unter Umständen mehrere Echos des Laserpulses. Einfache Geräte werten an dieser Stelle nur das erste und/oder das letzte Echo aus (*First-Pulse/Last-Pulse*) – manche Instrumente erlauben hingegen die Speicherung des vollständigen Echsignals, woraus sich in einem weiteren Auswerteprozess die Entfernungen zu diesen zusätzlichen Objekten extrahieren lassen. Diese Mehrzielfähigkeit (*Full Waveform Analysis*) fand aufgrund des großen Beleuchtungskegels bzw. Spotgröße (*Footprints*) im Dezimeter- bis Meterbereich in luftgestützten Laserscannern (*Airborne Laserscanning*, kurz ALS) eine Anwendung, um unterschiedliche Vegetationsschichten von der Geländeoberfläche trennen zu können. So lässt sich beispielsweise aus der Verwendung des ersten und des letzten Echsignals bei der Befliegung von Waldgebieten die Baumhöhe oder gar die Biomasse bestimmen. Die Übertragung auf kleinere Beleuchtungskegel – also Laserstrahlen mit geringerer Strahldivergenz – für terrestrischen Anwendungen wurde erstmals von der Firma Riegl im System VZ-400 mit einer Spotgröße von 10,5 cm in 600 m Entfernung vollzogen.

2.3.3 Phasenvergleichsverfahren

Beim Phasenvergleichsverfahren wird die Energie des Lasers nicht in wenige Pulse hoher Leistung investiert, vielmehr basiert das Verfahren auf einer Amplitudenmodulation, wobei z. B. ein sinusförmiges Signal mit der Modulationswellenlänge λ_{mod} auf die kontinuierliche Trägerwelle des Laserlichts aufgebracht wird (S. Abbildung 2.9) – aus dieser Beschreibung ergibt sich das häufig verwendete Akronym AMCW (*Amplitude-Modulated Continuous Wave*).

Für harmonische Schwingungen gilt eine direkte Proportionalität zwischen der Laufzeit t und der Phasenlage φ . Die für Formel (2.2) benötigte Laufzeit kann somit auch indirekt über die Differenz der Phasenlagen, der Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen ausgesendeter und empfangenen Modulationswelle berechnet werden. Die Distanz D ist hierbei gegeben durch

$$D = \frac{1}{2} \cdot \left(N\lambda_{mod} + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \lambda_{mod} \right). \quad (2.3)$$

Da die Phase nur in einem Intervall von $[0, 2\pi[$ bestimmbar ist, ist eine solche Abstandsmessung nur für Entfernungen kleiner als die halbe Wellenlänge des modulierten Signals eindeutig bestimmbar. Wird dieser als Eindeutigkeitsbereich bezeichnete Wert überschritten, so ist zudem eine unbekannte Anzahl N ganzer Wellenlängen zu berücksichtigen.

Die traditionelle Lösung von Mehrdeutigkeiten erfolgt bei den meisten tachymetrischen Systemen durch die Verwendung mehrerer Modulationen mit unterschiedlichen Wellenlängen. In diesem Vorgang lässt sich die Gesamtstrecke aus Teilmessungen zusammenführen: zuerst eindeutig durch eine Grobmessung und anschließend durch Feinmessungen mit hoher Auflösung. Die größte Wellenlänge (Grobmaßstab) bestimmt dabei die maximale Reichweite und die kleinste Wellenlänge (Feinmaßstab) beeinflusst die Auflösung des Systems, gleichwohl letztere schlussendlich durch die Feinmessung der Phasenlagen definiert wird. Diese beträgt in modernen Instrumenten etwa $1 \text{ bis } 2 \cdot 10^{-4}$ der verwendeten Modulationswellenlänge. Um demzufolge eine Auflösung von 1 mm zu erzielen, sind für die Feinmessung Modulationswellen mit $\lambda_{mod} < 10 \text{ m}$ zu verwenden.

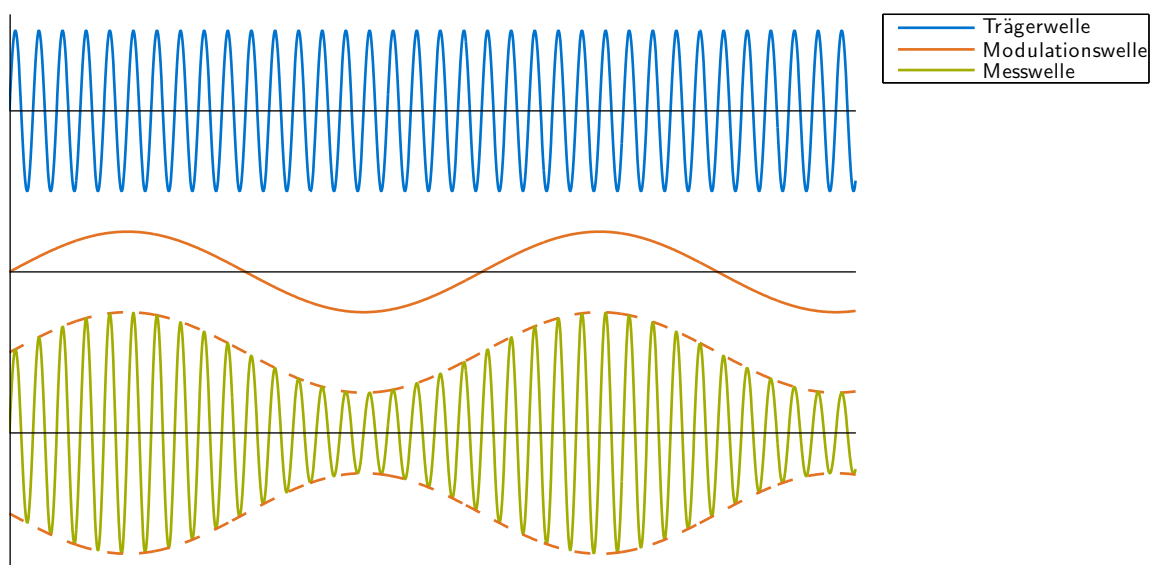


Abbildung 2.9: Signale der Amplitudenmodulation für das Phasenvergleichsverfahren

Es ist offensichtlich, dass dieses sequentielle Auswerten unterschiedlicher Modulationswellen auf Kosten der Messrate geht. Daher wird bei den meisten terrestrischen Laserscannern auf diese Vorgehensweise verzichtet und eine limitierte Reichweite akzeptiert. Im Allgemeinen wird das Phasenvergleichsverfahren in Verbindung mit terrestrischen Laserscannern für Abstandsmessungen nur bis zu einer Entfernung von etwa 100 m eingesetzt.

Eine weitere, zeitsparende Lösung der Mehrdeutigkeiten ist von Köhler (2012) für die Distanzeinheit moderner Tachymeter der Firma Trimble beschrieben. Auch hier wird auf eine sequentielle Aussendung von Grob- und Feinmaßstäben verzichtet, um stattdessen sieben Modulationswellen simultan auszusenden und beim Empfang deren Reststücke auszumessen. Diese sind aufgrund ihrer kurzen Wellenlänge (etwa 40 cm) den Feinmaßstäben zuzuordnen und tragen daher allesamt zur Steigerung der Präzision bei ohne direkt eine Mehrdeutigkeit zu lösen (vgl. Abbildung 2.10).

Die geringe Frequenzverschiebung der einzelnen Modulationswellen führt zu einem Eindeutigkeitsbereich der überlagerten Welle von 7,4 km. Um eine erste eindeutige Näherung der Distanzmessung zu erhalten und die Mehrdeutigkeit zu lösen, werden künstliche Grobmaßstäbe rechnerisch über Differenzbildungen unterschiedlicher Feinmaßstäbe erzeugt. Diese Überlagerungen führen zu Schwebungen, deren Restphasen laut Hersteller nicht gemessen werden müssen, sondern sich ebenfalls aus den Reststücken der Feinmaßstäbe berechnen lassen.

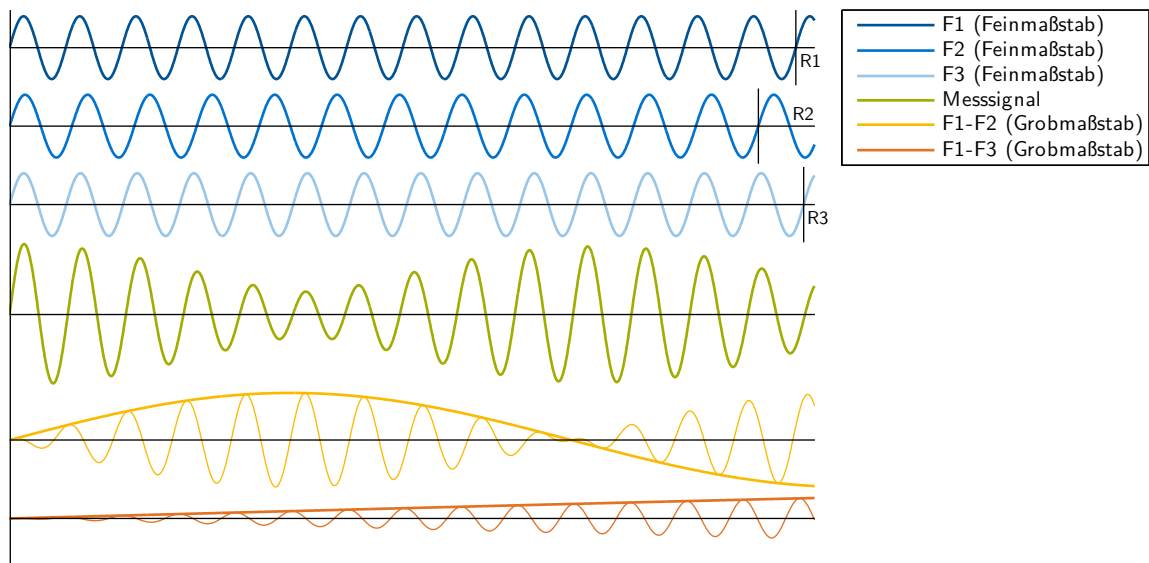


Abbildung 2.10: Phasenvergleichsverfahren und Mehrdeutigkeitslösung über Differenzbildung nach Trimble (hier mit drei generierten Feinmaßstäben und zwei künstlichen Schwebungen, die als Grobmaßstäbe verwendet werden).

2.3.4 Kombiniertes Pulsmess- und Phasenvergleichsverfahren

Sowohl das Pulsmess- als auch das Phasenvergleichsverfahren haben jeweils Vor- und Nachteile. Vereinfacht kann gesagt werden, dass das Pulsmessverfahren für höhere Reichweiten, das Phasenvergleichsverfahren für eine höhere Erfassungsrate ausgelegt ist – eine Verfeinerung der Unterschiede wie z. B. in (Wölfleschneider, 2009) und (Joeckel u. a., 2008) beschrieben, ist in Tabelle 2.2 dargestellt.

Es liegt nahe, die Stärken der jeweiligen Technologien in einem kombinierten Messverfahren zu vereinen und die Nachteile der einzelnen Verfahren zu vermeiden. Illmann u. Linke (2006) beschreiben eine so genannte Pulsed-Wave-Technologie, die im Laserscanner CPW 8000 der Firma Callidus Precision Systems zum Einsatz kam. Seit 2009 ist das Unternehmen Trimble Navigation zugehörig; die aktuelle Version dieses Scanners wird unter der Bezeichnung Trimble CX vertrieben.

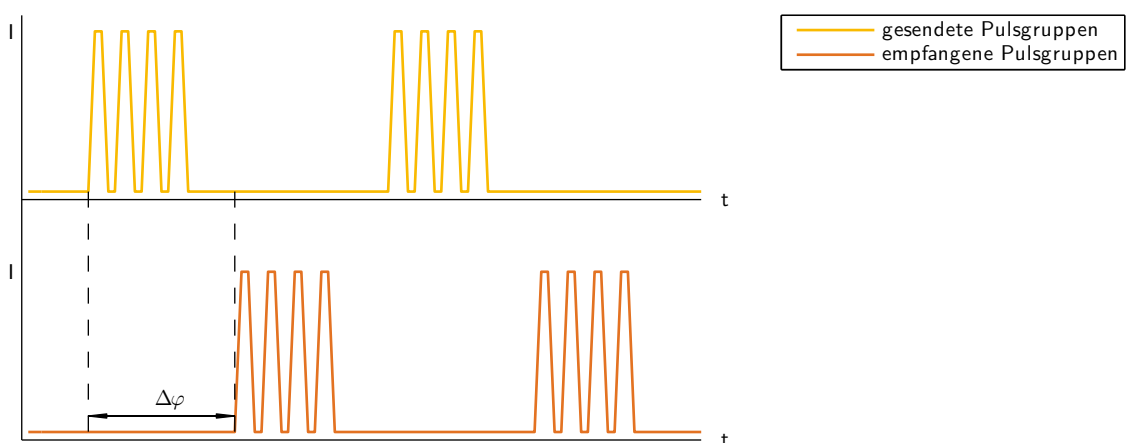


Abbildung 2.11: Das Pulsed-Wave-Verfahren verwendet Pulsgruppen für Grobmessung bzw. zur Mehrdeutigkeitslösung und den Phasenversatz der Gruppen für die Feinmessung.

Hierbei werden Laserimpulse erzeugt, die für eine Grobmessung der Distanz nach dem Pulsmessverfahren verwendet werden. Jeder Impuls wird zusätzlich mit hoher Frequenz moduliert, sodass die in Abbildung 2.11 dargestellten Pulsgruppen erzeugt werden. Die empfangene Gruppe weist eine Phasendifferenz zur gesendeten Impulsgruppe auf, die für eine Feinmessung nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens herangezogen wird. Die Lösung der Mehrdeutigkeit ist durch die vorangegangene Grobmessung nicht mehr erforderlich.

Der Hersteller verspricht für dieses Verfahren eine Distanzmessgenauigkeit von ± 2 mm in einer Entfernung von 30 m und eine maximale Reichweite von 80 m (Petrie u. Toth, 2009).

Tabelle 2.2: Pulsmess- und Phasenvergleichsverfahren im Vergleich hinsichtlich Vor- ($\oplus$) und Nachteile ($\ominus$)

Merkmal	Pulsmessverfahren	Phasenvergleichsverfahren
Reichweite	$\oplus$ Die ausgesendeten Impulse sind kurz aber energiereich – daher kann bei vergleichsweise geringer Sendeleistung eine hohe Reichweite erzielt werden $\oplus$ Die direkte Laufzeitmessung des Pulses liefert ein eindeutiges Streckenmessergebnis	$\ominus$ Die kontinuierliche Laserstrahlung erfordert wegen der Augensicherheit eine Beschränkung der Sendeleistung und führt zu geringeren Reichweiten $\ominus$ Beim Einsatz von nur einer Maßstabswellenlänge treten Mehrdeutigkeiten auf. Wird die Mehrdeutigkeitslösung aus Zeitgründen nicht umgesetzt, ist die Reichweite auf die Maßstabswellenlänge limitiert
Geschwindigkeit	$\ominus$ Um ein stabiles Messergebnis zu erzeugen, werden für eine Distanzmessung mehrere Pulse ausgesendet und deren Laufzeit gemittelt. Die Messgeschwindigkeit ist daher als gering einzustufen	$\oplus$ Eine Phasenmessung kann innerhalb einer Welle mehrfach bestimmt werden – die Messgeschwindigkeit ist daher sehr hoch
Distanzauflösung	$\ominus$ Die Detektion der zeitlichen Bezugspunkte von ausgesendetem und nach der Reflektion stark deformiertem Lichtpuls erschwert eine hochauflösende Distanzmessung	$\oplus$ Eine Phasenmessung wird mit einem Bruchteil der Maßstabswellenlänge beobachtet und liefert daher eine hohe Auflösung in der Streckenmessung
Mehrzielfähigkeit	$\oplus$ Die zeitliche Unterscheidung innerhalb des Signalechos (First-Pulse/Last Pulse) ermöglicht grundsätzlich die Detektion mehrerer Ziele im Strahlengang, sofern diese räumlich weit genug voneinander getrennt sind	$\ominus$ Die auszuwertende Phasenlage besteht bei mehreren Zielen aus einer Überlagerung von Einzelwellen – eine zeitliche oder gar räumliche Auflösung der Phase ist nicht möglich
Sonstiges	$\ominus$ Es ist ein erhöhter technischer Aufwand, z. B. um atmosphärisch bedingte Pulsdeformationen zu erfassen, zu betreiben $\oplus$ Eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber Streu- und Fremdlicht ermöglicht Distanzmessungen auch unter erschwerten Messbedingungen $\ominus$ Impulslaser mit guter Strahlqualität sind teuer, aufwändig in der Steuerung und haben einen hohen Stromverbrauch	$\ominus$ spezifische Fehlerquellen (z. B. zyklischer Phasenfehler) führen zu systematischen Messabweichungen $\oplus$ Da jede Phasenmessung ein schnelles Resultat liefert, ist sie unempfindlich gegenüber kurzzeitigen Messstrahlunterbrechungen $\ominus$ Einsatz von preiswerten Halbleiterlasern. Einbußen hinsichtlich Strahlqualität werden in Kauf genommen – wegen der größeren Ausdehnung des Laserspots können z. B. Distanzen zu Kanten nicht genau vermessen werden

2.3.5 Neue Mess- und Auswerteprinzipien auf Basis der Signalanalyse

Die Durchführung von (absoluten) Entfernungsmessungen stellt eine technische Standardaufgabe dar, für die eine Vielzahl von Lösungen unter Verwendung von optischen Systemen realisiert wurde – im Bereich der Geodäsie zählen hierzu die polar messenden Tachymeter sowie terrestrische Laserscanner mit berührungslos arbeitenden Distanzmessern. Die traditionellen Systeme basieren dabei vornehmlich auf dem Prinzip des Pulsmess- oder des Phasenvergleichsverfahrens, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten 2.3.2 und 2.3.3 erläutert wurden. Reichweiten von über 500 m sind für das Laufzeitverfahren ohne weiteres erreichbar – eine absolute Distanzmessgenauigkeit von einem Millimeter ist jedoch kaum erreichbar. Aufgrund der hohen geforderten Messgenauigkeit waren daher die meisten Instrumente mit einem EDM-System ausgerüstet, welches nach dem Phasenvergleichsverfahren arbeitet. Wegen der geringen optischen Laserleistung aufgrund sinnvollerweise einzuhaltenden Laserklassen weisen diese Phasenscanner allerdings auch eine geringe Reichweite auf, so dass berührungslose Messungen über Distanzen von mehr als 300 m mit einem Phasenscanner kaum zu bewältigen sind.

Die Vor- und Nachteile beider Technologien, wie sie bereits in Abschnitt 2.3.4 bzw. Tabelle 2.2 diskutiert wurden, führte bei den Herstellern zu einer unvermeidlichen Weiterentwicklung der Messmethoden. Ein weiterer Innovationsantrieb ist dem Umstand geschuldet, dass der Anwender insbesondere bei größeren Messdistanzen und der damit einhergehenden Aufweitung des Laserquerschnitts bei speziellen Ziel- bzw. Hintergrundgeometrien, mit der Problematik konfrontiert werden kann, dass der vom Entfernungsmesser ausgesandte Messstrahl unbeabsichtigt zwei Objekte gleichzeitig beleuchtet. In der Praxis stellen Messungen zu Kanten, durch Vegetation oder Maschendrahtzäune typische Fälle hierfür dar. Ein weiterer Aspekt sind künstliche oder natürliche Retroreflektoren (z. B. Verkehrsschilder), die sich neben einem schwach reflektierenden Zielobjekt befinden – hierbei besteht die Gefahr, dass unerwünschtes Streulicht über den Retroreflektor in den Empfänger der Distanzmesseinheit gelangen kann.

Bei herkömmlichen Messverfahren können demnach Störobjekte und Streulichtanteile so genannte Mischsignale (s. auch Abschnitt 5.1.3) erzeugen, die zu gravierenden Fehlmessungen führen. Um auch in solchen Situationen zuverlässige Messergebnisse zu generieren, entstanden innovative Mess- und Auswerteprinzipien, die sich auf die Erhöhung von Reichweite, Messgeschwindigkeit, der Mehrzielfähigkeit und damit der Zuverlässigkeit konzentrieren. Tabelle 2.3 gibt einen Einblick in derzeit eingesetzte EDM-Technologien in Hinblick auf deren Marktpositionierung terrestrischer Laserscanner und Totalstationen für den mittleren bis weiten Entfernungsbereich (vgl. Ohlmann-Lauber u. Wehner (2014)).

Allerdings, wie bereits Fuhrland (2008) bemängelt, bleiben dem Nutzer aufgrund der Informationspolitik der Gerätehersteller deren detaillierte Funktionsweise weitestgehend verborgen – ein modernes Distanzmessgerät ist mehr denn je eine „Black Box“. Als Folge verkommen die in der Fachliteratur beschriebenen Standardverfahren zunehmend zu anschaulichen Erklärungen, die mit den tatsächlichen Vorgängen in den modernen Systemen nur noch bedingt übereinstimmen. Um dennoch einen Einblick zu erhalten, ist das Studium von Patentschriften erforderlich, die zumindest erahnen lassen, welche Ansätze die Hersteller verfolgen – auch wenn eine konkrete Zuordnung von Patent und Produkt nicht immer eindeutig möglich ist.

Gemein ist den neuen Verfahren, dass sie auf einer ganzheitlichen Analyse der empfangenen Signalstruktur basieren. Die Verwandtschaft zu Pulsmessverfahren und Phasenvergleichsverfahren ist teilweise noch erkennbar, weshalb im Weiteren folgende Unterscheidung gelten soll:

- Die Weiterentwicklung des Phasenvergleichsverfahrens nutzt zahlreiche Modulationsformen inkl. Pulsformen und analysiert die Signalform im Zeit- und Frequenzbereich. Aufgrund der systemtheoretischen Signalverarbeitung ist hier der Begriff Systemanalyse oder *Signal Analyser* zutreffend.
- Als Weiterentwicklung des Pulsmessverfahrens wird die Erfassung und Analyse im Zeitbereich der gesamten Signalform bei gepulsten Lasersystemen angesehen. Als etablierte Bezeichnungen hierfür haben sich die Begriffe *First-Pulse/Last-Pulse* und *Full Waveform* etabliert.

Beide Bezeichnungen werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 2.3: Messprinzipien und Spezifikationen der berührungslosen, laserbasierten Distanzmessung – Markteinblick (kein Anspruch auf Vollständigkeit; Angaben laut Hersteller (i d. R. auf neutrale Prüfkarte von Kodak) sowie (Ohlmann-Lauber u. Wehner, 2014))

Messprinzip	Hersteller	Modell	Typ ¹ TS/LS/HF	Reichweite [m]	Messrate [P/s]	Distanzgenauigkeit [Idealfall]
Phasenvergleichsverfahren						
	FARO	Focus 3D	LS	120	976.000	2,0 mm @ 25 m
	Trimble	FX 3D	LS	80	216.000	2,4 mm @ 50 m
	Trimble	VX (Spatial Station)	TS	250	15	3,0 mm @ 150 m
	Z+F	IMAGER 5010	LS	187	1.016.000	2,0 mm @ 100 m
	Leica	HDS7000	LS	187	1.016.000	2,0 mm @ 100 m
Pulsmessverfahren						
	Leica	C10	LS	300	50.000	4 mm @ 50 m
	Maptek	I-Site 8800	LS	2000	8.800	10 mm @ 2000 m
	Optech	ILRIS-HD	LS	1200	10.000	10 mm @ 100 m
	Riegl	LMS-Z620	LS	2000	11.000	10 mm @ 50 m
	Topcon	GLS-1500	LS	330	30.000	4 mm @ 150 m
	Trimble	GX 3D	LS	350	5.000	7 mm @ 100 m
Pulsed-Wave						
	Callidus	CPW 8000	LS	80	50.000	2,0 mm @ 30 m
	Trimble	CX	LS	80	54.000	1,8 mm @ 80 m
Signal Analyser						
	Leica	TPS1200	TS	1000	0.1	4 mm + 2 ppm
Full Waveform Analysis						
	Leica	Nova MS60	TS	300	1000	1,0 mm @ 50 m
	Leica	P20	LS	120	1.000.000	1,5 mm @ 100 m
	Riegl	VZ-400	LS	500	42.000	5,0 mm @ 100 m
	Riegl	VZ-6000	LS	6000	222.000	15,0 mm @ 6000 m
	Trimble	TX8	LS	120	1.000.000	2,0 mm @ 100 m
Frequenzmodulation						
	Nikon	MV350	LS	50	4.000	0,3 mm @ 30 m
Lasertriangulation						
	Mensi	Soisic	LS	25	100	< 1 mm @ 25 m
	Konica Minolta	Vivid 910	LS	2,5	k. A.	0,2 mm @ 0,6 m
	Creaform	HandySCAN 700	HF	0,3	480.000	0,03 mm @ 0,3 m

2.3.5.1 Systemanalyse bzw. Signal Analyser

Ein Beispiel für die eben genannte Systemanalyse stellt die von Leica Geosystems als *PinPoint* und *Waveform Digitizing* bezeichneten Technologien dar, die mit dem Tachymeter TPS1200 resp. MS50 eingeführt wurden. Eine kurze Beschreibung der Signalmodellierung und einen Vergleich mit Phasenvergleichs- und Pulsmessungen findet man bei Bayoud (2006); Ramseier (2004) und Maar u. Zogg (2014).

Im Zuge der Entfernungsmessung werden bei diesen Verfahren zahlreiche Modulationen – teilweise gleichzeitig, teilweise als Abfolge – auf die Trägerwelle mit einer Wellenlänge von 670 nm moduliert. Die Kombination der verschiedenen Modulationstechniken wird durch einen schnell umschaltbaren Frequenzsynthesizer ermöglicht und umfasst mindestens zwei hochfrequente Frequenzen (Sinusschwingungen) im MHz-bis GHz-Bereich sowie kurze Pulse mit verschiedenen Pulsformen (rechteckig, dreieckig, Diracstoß). Die Auswahl der Modulationsformen (insbesondere Anzahl und Frequenzabstände) erfolgt dabei auf Grundlage der aktuellen Messbedingungen und kann – auf Kosten der Messgeschwindigkeit – für die Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnisses variiert werden: So werden bei hohen Signalstärken vier Frequenzen ausreichend sein und bei geringeren Empfangssignalstärken bis zu zehn Frequenzen eingesetzt werden – eine konkrete Aussage über das generierte Messsignal ist daher im Vorfeld nicht mehr möglich (Fuhrland, 2008).

¹TS = Totalstation, LS = terrestrischer Laserscanner, HF = handgeführter Laserscanner

Die Auswertung erfolgt nur in geringem Ausmaß im Zeitbereich, zum Beispiel durch Kreuzkorrelation der Pulsfolgen. Da Sende- und Empfangseinheit zusammen mit Messstrecke und den Zielobjekten inklusive Störeinflüssen im Sinne der Nachrichtentechnik als Übertragungssystem verstanden werden, erfolgt die Auswertung überwiegend im Frequenzbereich. Das messbare Empfangssignal $y(t)$ ergibt sich theoretisch aus der Faltung des bekannten Anregungssignals $s(t)$ mit dem unbekannten Übertragungssignal $h(t)$ zu

$$y(t) = s(t) * h(t). \quad (2.4)$$

$h(t)$ beschreibt dabei den Einfluss der Messtrecke sowie der Ziele im Strahlengang und bewirkt eine Abschwächung und Phasenverschiebung des Anregungssignals. Die Auflösung nach der Übertragungsfunktion erfolgt zunächst durch den Übergang in den Frequenzbereich mittels Fouriertransformationen

$$y(t) \rightarrow FFT \rightarrow Y(\omega) \quad \text{und} \quad s(t) \rightarrow FFT \rightarrow S(\omega) \quad (2.5)$$

und anschließender Quotientenbildung aus empfangenem und ausgesendetem Signal zu

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{S(\omega)} \quad (2.6)$$

Der Europäischen Patentanmeldung EP1450128A1 (Benz u. a., 2004) ist zu entnehmen, dass der komplexwertige Frequenzgang des Systemanalysators auch in folgender Form dargestellt werden kann:

$$H(\omega) = \frac{a_n(i\omega)^n + a_{n-1}(i\omega)^{n-1} + \dots + a_0(i\omega)^0}{b_m(i\omega)^m + b_{m-1}(i\omega)^{m-1} + \dots + b_0(i\omega)^0} \cdot \left(\sum_{k=1}^K \rho_k \cdot e^{-i\omega t_k} \right) \quad (2.7)$$

Die Übertragungsfunktion (2.7) besteht aus zwei Termen: einem rationalen Quotienten und einer Summe aus Exponentialfunktionen, die die Laufzeiten t_k zu den K Einzelzielen mit unterschiedlichen Reflexionsgraden ρ_k enthält.

Der Quotient beschreibt die sogenannten dispersiven Einflüsse, die durch die elektronischen Bauteile wie Laserdiode, Empfangsdiode und Filter hervorgerufen werden. Für eine genaue Messung der Laufzeiten muss der erste Term eliminiert werden. Hierfür sind die Parameter a und b über eine werkseitige Kalibrierung durch den Hersteller zu bestimmen. Da das Verfahren mehrzielfähig ist, kann eine solche Kalibrierung jedoch auch im Zuge der eigentlichen Entfernungsmessung durchgeführt werden, indem ein optomechanisches Revolverrad im Strahlengang des Tachymeters den Laserstrahl auf eine interne Referenzstrecke umlenkt.

Nach Eliminierung der dispersiven Einflüsse steht eine kalibrierte Übertragungsfunktion zur Verfügung, deren Auswertung im Frequenzbereich sehr aufwendig ist. Der Patentinhaber nutzt daher die Analyse über eine Anpassungsfunktion auf Basis der *Maximum-Likelihood*-Schätzertheorie, die alle gemessenen Systemantworten in eine einzige Kostenfunktion zusammenfasst, um daraus kalibrierte Distanzmessdaten zu den Zielobjekten auszuwerten.

2.3.5.2 First-Pulse/Last-Pulse bzw. Full Waveform

Deutlich überschaubarer gestaltet sich die Weiterentwicklung der direkten Laufzeitmessung von Laserpulsen – die Analyse der *Full Waveform* im Zeitbereich, wie sie zunächst im luftgestützten und schließlich im terrestrischen Laserscanning Anwendung fand (Vosselmann u. Maas, 2010).

Die Mehrzielfähigkeit terrestrischer Entfernungsmessgeräte dient vornehmlich der Unterscheidung zwischen dem eigentlichen Messpunkt und einer versehentlichen Beobachtung zu einem Zwischenziel, das (hervorgerufen durch die Aufweitung des Laserstrahlquerschnittes) ebenfalls innerhalb des Messstrahls liegt. Anders verhält es sich bei luftgestützten Anwendungen des ALS, bei dem aufgrund der Flughöhe und Ausgestaltung

der eingesetzten Laser mit deutlich größeren *Footprints* mit Durchmessern im Bereich von mehreren Dezimetern bis Metern zu rechnen ist.

Daher ist es unumgänglich, dass insbesondere in Vegetationsbereichen ein Teil des Signals vor dem Erreichen des Bodens z. B. an der Krone eines Baumes zurück reflektiert wird. Betrachtet man beide Echos, ergibt sich daraus die Möglichkeit der simultanen Bestimmung von Oberflächenmodell und Geländemodell. Des Weiteren eröffnet eine Differenzbildung beider Modelle die Bestimmung von Baumhöhen, was wiederum für Waldkartierungen und die Berechnung von Biomassen sinnvoll verwendet werden kann.

Seit 2004 werden neben solchen *First/Last-Pulse*-Systemen auch Systeme mit geringerem Strahldurchmesser eingesetzt, die nicht nur zwei Echos, sondern das gesamte Signal aufzeichnen und in einem *Post-Processing* analysieren. Mögliche Ansätze zur Erkennung der Pulsspitzen sind in (Stilla u. a., 2009; Stilla u. Jutzi, 2009) beschrieben; vergleichende Untersuchungen zu diesen sind in (Wagner u. a., 2004) zu finden. Da die Echoprofile als Funktion von Bauparametern (Art, Höhe, Kronendurchmesser) angesehen werden können, ist zum einen ein Vergleich mit theoretischen Modellen denkbar und zum anderen wegen der erhöhten Punktdichte die Ableitung deutlich aussagekräftigerer Punktwolken von Forstgebieten möglich (Reitberger, 2010).

Es war abzusehen, dass diese Methoden auch auf terrestrische Laserscanner übertragen würden. Die Firma Riegl, als etablierter Hersteller sowohl von luftgestützten als auch terrestrischen Laserscannern, brachte 2008 die V-Serie auf den Markt, die eine Analyse des Echoprofils in Echtzeit (allerdings mit Einschränkungen was die Anzahl der detektierbaren Ziele anbelangt) ermöglicht. Die V-Serie umfasst dabei auch ein Modell (VZ-400) für den terrestrischen Bereich mit einer Reichweite von 300 m. Dabei werden Messraten von 125 kHz erreicht, womit weit entfernte Objekte um bis zu fünfmal schneller als bisher erfasst werden können. In den darauffolgenden Jahren wurden weitere Instrumente mit ähnlichen oder noch höheren Datenraten entwickelt. Weitere Hersteller zogen nach und entwickelten dabei ihre eigenen Auswertekonzepte für pulsbasierte Laserscanner (z. B. die Laserscanner Trimble TX8 und Leica P20, beide 2012).

2.3.6 Frequenzmodulation

Mit Hilfe einer Frequenzmodulation (engl. *Frequency Modulated Continous Wave*, kurz FMCW) ist ein weiteres Verfahren, welches seinen Ursprung in der Radartechnik hat, für die berührungslose Streckenmessung umsetzbar. Hierfür wird die Frequenz eines langgestreckten Pulses um einen bekannten Frequenzbetrag in der Regel linear verändert. Geschieht dies wiederholt, entsteht eine Sägezahn- oder Dreiecksform der Modulationswelle. Das Frequenzmuster mag in Anlehnung an die Akustik an Vogelgezwitscher erinnern, was dem Verfahren auch die Bezeichnung *Chirp* (engl. f. zwitschern) verlieh.

Da, wie generell bei frequenzmessenden Verfahren, zusätzlich zu der Distanz auch die Geschwindigkeit über den Dopplereffekt gemessen werden kann, wurde FMCW zunächst vor allem mit Mikro- und Millimeterwellen in der Radartechnik angewendet. Bei elektrooptischen Systemen mit dem Ziel des Laserscannings ist die Technik nicht weit verbreitet (Cioci u. a., 2005), wurde aber unter dem Begriff *Coherent Laser Radar* (CLR) in einigen Systemen umgesetzt. Als Beispiel seien die Systeme MV224, MV260 des US-Herstellers Metric Vision Inc. genannt, deren Weiterentwicklungen zunächst von Leica Geosystems (Metric Vision, 2002) und derzeit von Nikon Metrology mit der Bezeichnung Laser Radar MV330/350 (Metrology, 2010) vertrieben werden.

Das Streckenmessprinzip ist z. B. in (Zheng, 2005) und (Naab u. Hennes, 2012) ausführlich beschrieben. Für eine kurze Beschreibung der Technologie sei zunächst auf Abbildung 2.12 verwiesen. Darin ist die grundlegende Signalgenerierung der Messwelle durch die Überlagerung des frequenzmodulierten Signals mit der Trägerwelle illustriert. Für die Frequenzmodulation wird die Frequenz eines langgestreckten Pulses über eine Zeitdauer von ΔT um den Frequenzbetrag $\pm \Delta F$ verändert.

Wie bei allen berührungslosen Laufzeitverfahren wird auch diese Messwelle am Zielpunkt diffus zurück zum Instrument reflektiert. Sofern die Pulslänge und der Messbereich so gewählt sind, dass sich beim Empfangen das ausgesendete und reflektierte Chirp-Signal überlagern, ist bei einer statischen Anordnung in der Empfangseinheit demzufolge eine Frequenzdifferenz $\Delta f = |f_s - f_r|$ zu registrieren.

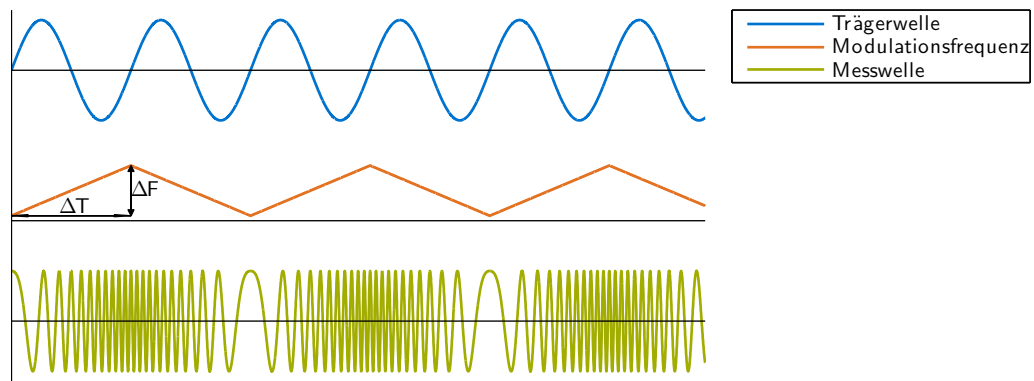


Abbildung 2.12: Signalgenerierung durch Frequenzmodulation. Die Trägerwelle (oben) wird mit einem frequenzmodulierten Signal (Mitte) überlagert und führt zu einer Messwelle (Chirp-Signal).

Dieser Betrag ermöglicht gemeinsam mit den bekannten Kenngrößen ΔT und ΔF eine Bestimmung der Laufzeit Δt . Bei einer kontinuierlichen Beobachtung der Frequenzdifferenz ergibt sich das in Abbildung 2.13 dargestellte Frequenzdifferenzbild, bei dem über große Zeiträume eine konstante, maximale Frequenzdifferenz Δf_b ergibt. Diese als *Beat Frequency* bezeichnete Größe stellt bei CLR-Systemen die Messgröße dar.

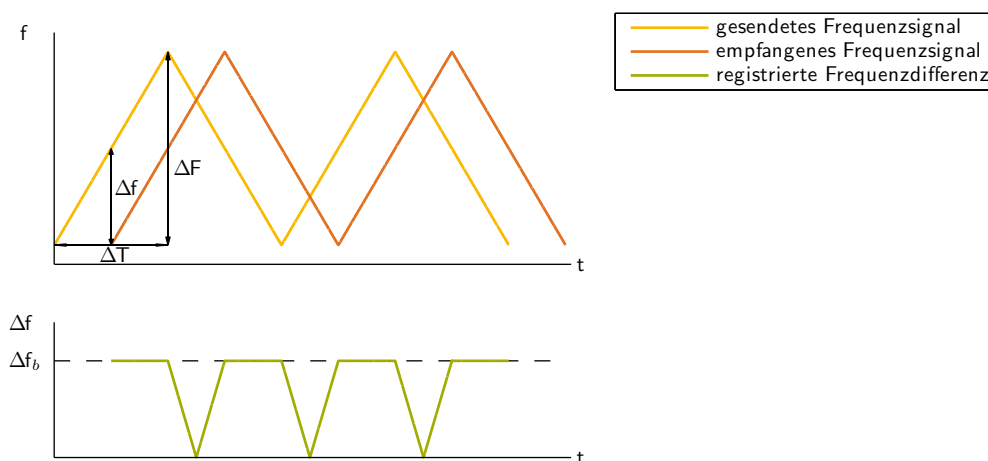


Abbildung 2.13: Signale bei der Frequenzmodulation. Als Frequenzdifferenz ist die sog. *Beat Frequency* als Messgröße zu beobachten

Analog zu Formel (2.2) ergibt sich unter Berücksichtigung des doppelten Laufweges für die zu ermittelnde Distanz

$$D = \frac{1}{2} \cdot \frac{c_0 \cdot \Delta T}{n \cdot \Delta F} \cdot \Delta f_b. \quad (2.8)$$

Bei einer Reichweite von ca. 60 m können mit diesem Verfahren Genauigkeiten im Submillimeterbereich erreicht werden (Schwarz, 2012), womit es wesentlich genauer als andere berührungslose Streckenmessverfahren ist. Eine Voraussetzung für eine solch präzise Streckenmessung ist jedoch die Fokussierung des Laserstrahls auf die Oberfläche (Dold, 2002), was über eine Grobmessung mit einem zweiten Laser realisiert wird. Als weiteren Vorteil kann der geringere Einfluss des Auftreffwinkels auf das Streckenmessergebnis gesehen werden, der in Abschnitt 5.1.5 weiter thematisiert wird.

2.3.7 Lasertriangulation

Die berührungslose Abstandsmessung nach dem Triangulationsprinzip beruht nicht auf einer Laufzeitmessung, sondern auf rein trigonometrischen Beziehungen. Dabei ist zwischen aktiven und passiven Triangulationsverfahren zu unterscheiden:

Die passive Triangulation ist aus der Landes- sowie Industrievermessung (hier auch unter dem Begriff des räumlichen Vorwärtsschnittes bekannt) mit Theodoliten bekannt, wobei ein Zielpunkt von zwei Beobachtungspunkten beobachtet wird. Alle drei Punkte bilden somit ein Dreieck und – sofern die Basis zwischen den beiden Standpunkten bekannt ist oder auf eine andere Art und Weise das Dreieck mit einem Maßstab versehen wird – lassen sich die Koordinaten des Zielpunktes trigonometrisch bestimmen.

Im Gegensatz hierzu stellt bei der aktiven Triangulation einer der beteiligten Sensoren eine aktive Lichtquelle, z. B. eine Laserdiode dar. Der verbleibende CCD-Sensor empfängt den auf die Szene projizierten und reflektierten Laserspot und wertet die Position der Abbildung auf dem CCD-Sensor aus. Abbildung 2.14 zeigt eine schematische Ansicht eines aktiven Triangulationsystems und verdeutlicht die Relationen zwischen Triangulationswinkel γ und den unterschiedlichen Distanzen.

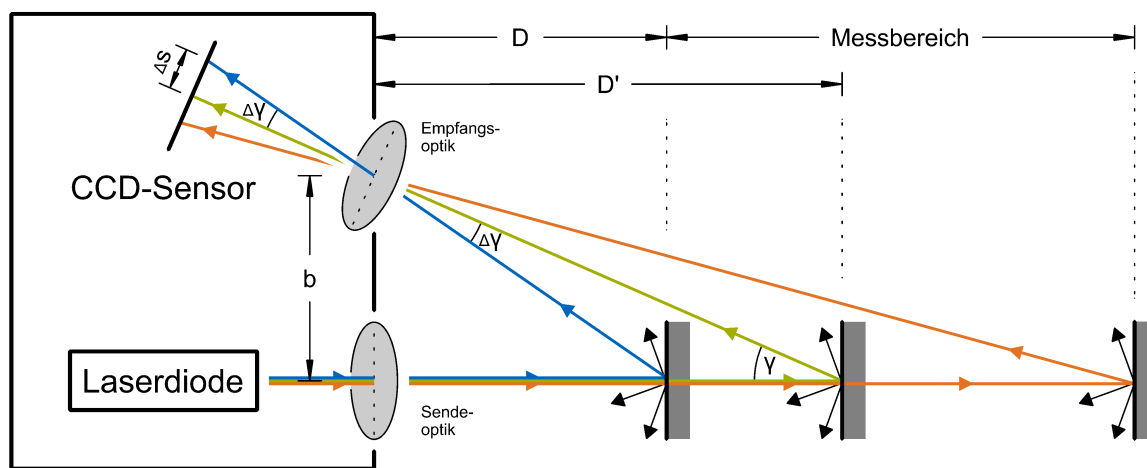


Abbildung 2.14: Aktive Triangulation mit einem Laserspot und einem CCD-Chip als Empfänger.

Im Grundzustand, in dem der Messpunkt in einem Abstand D' von der Basis entfernt ist, herrscht bei vorgegebener Basis b der definierte Triangulationswinkel γ . Dieser wird im Zentrum des CCD-Sensors abgebildet – befindet sich der Laserpunkt jedoch vor oder hinter diesem Grundabstand, so wird er auf dem CCD-Sensor in einem messbaren Abstand Δs vom Sensorzentrum abgebildet. Der dabei veränderte Triangulationswinkel beträgt nun $\gamma + \Delta\gamma$, woraus sich auf die Entfernung durch

$$D = \frac{b}{\tan(\gamma + \Delta\gamma)} \quad (2.9)$$

schließen lässt.

Dieses Prinzip wurde von Katowski (1989) auf ohnehin auf dem räumlichen Vorwärtsschnitt basierende Theodolitmesssysteme für industrielle Anwendungen adaptiert. Dabei wurden mit einem Laserpointer versehene Theodolite zusätzlich mit einer CCD-Kamera ausgerüstet. Eine durch Bildauswertung automatisierte Anzielung des jeweiligen Laserpunktes ermöglichte somit ein Abscannen von Betonoberflächen und wurde für Deformationsmessungen an Kühltürmen großer Energieversorgungsanlagen eingesetzt. Aufgrund der Verwendung zweier Theodolite lässt sich hierbei eine nahezu beliebige Basislinie generieren und somit auch große Reichweiten etablieren. Im Zuge der Entwicklung von *Image Assisted Total Stations* (IATS) wurde diese grundsätzliche Anordnung zur bildgebenden Überwachung von geologischen Strukturen ausgebaut (Reiterer u. a., 2009; Wagner u. a., 2014; Wagner, 2017).

Trotz dieses Ansatzes liegt die vorrangige Umsetzung des Triangulationsverfahren bei industriellen Nahbereichsscannern, bei denen Laserdiode und Empfangsoptik in einem System zusammengefasst sind. Als Beispiele hierfür seien die Laserscanner der Serie Soisic des französischen Herstellers Mensi (seit 2003 Trimble zugehörig) aus dem Jahre 1992 genannt (Cheves, 2007). Mit einer Reichweite von 25 m und einer Messrate von ca. 100 Punkten pro Sekunde bei einer 3D-Genauigkeit im Submillimeterbereich bildete dieser Scanner eine wichtige Brücke zwischen Scannern für den mittleren und nahen Entfernungsbereich (Boehler u. a., 2001). Als Anwendungsbeispiel dieses Scanners sind die in (Hesse u. Stramm, 2004) und (Stramm, 2004) beschriebenen Konvergenzmessungen im Tunnel zu nennen. Laserscanner der Firma Konica Minolta, wie der Vivid 910, mit einer Reichweite von nur 2,5 m, aber Genauigkeiten im Mikrometerbereich, erweitern den zuvor beschriebenen Einzelpunktmessmodus zu einem Lichtschnittverfahren. Das Laserlichtschnittverfahren unterscheidet sich grundsätzlich dadurch, dass der Laserstrahl wie in Abbildung 2.15 dargestellt durch eine Zylinderlinse zu einer Strahlebene aufgefächert wird. Anstelle eines Lichtpunktes wird nun eine Lichtlinie auf das Objekt projiziert und analysiert.

Im Gegensatz zu den auf Laserstrahlen basierten Triangulationsverfahren, soll auch die Streifenprojektion kurz Erwähnung finden: hierzu werden anstelle von einzelnen Laserschnittebenen Streifenmuster in unterschiedlichen Sequenzen, sog. *Gray-Code*-Sequenzen auf das zu erfassende Objekt projiziert und von einem Flächensensor registriert. Ein solches System wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Erfassung eines hochauflösenden Oberflächenmodells eingesetzt, vgl. hierzu Kapitel 5.3.1, Abbildung 5.26.

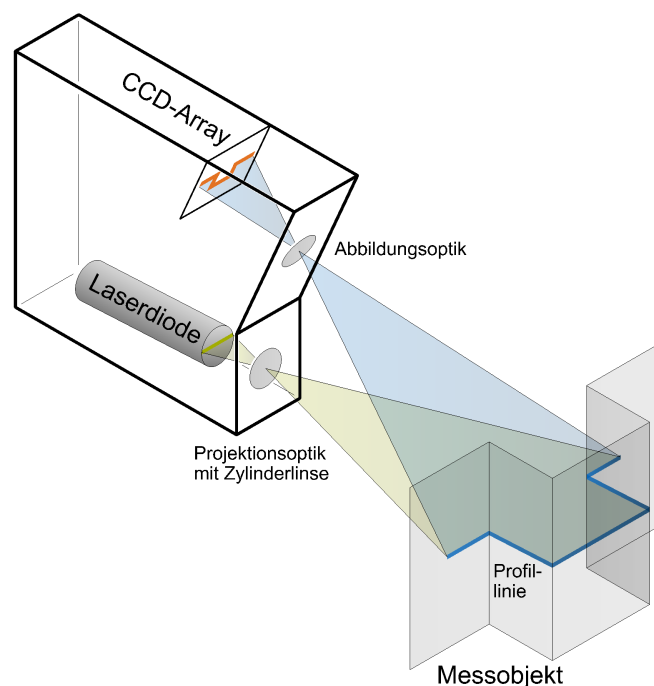


Abbildung 2.15: Darstellung der Lasertiangulation beim Lichtschnittverfahren.

Häufig wird das Lichtschnittverfahren auch in Verbindung mit externen Trackingverfahren (z. B. durch eine direkte Montage auf einem Messarm oder räumliche Ortung durch Lasertracker und Kamerasysteme) eingesetzt, um ein handgeführtes Scannen mit einer simultanen Einbindung des Sensors in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu ermöglichen (Schlüter, 2002). Es existieren aber auch selbsttortende Triangulationscanner, bei denen das Positionierungssystem auf zwei im Scanner integrierten Infrarotkameras beruht. Von diesen werden reflektierende Referenzpunkte am Messobjekt beobachtet und die relative Ausrichtung zwischen Scanner und Messobjekt während des Scannens ermittelt. Mehrere namhafte Hersteller, wie z. B. FARO, Nikon, Zeiss u. v. m. treten hier als Hersteller im Markt auf.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass das rein geometrische Triangulationsverfahren für kontinuierliche Messungen von Vorteil ist, was auch Abstandsmessungen an bewegten Objekten erlaubt. Da jedoch der Messpunkt resp. die Messlinie möglichst klein resp. schmal sein sollte und zugleich einen hohen Kontrast

gegenüber der Messoberfläche aufweisen soll, sind Triangulationsverfahren meist nur für den Nahbereich geeignet. Dennoch beschränken sich die Einsatzmöglichkeiten des handgeführten Scannings nicht auf rein industrielle Anwendungen, sondern kommen auch unter Baustellenbedingungen im Zuge der Rauheitsanalyse von Betonoberflächen zum Einsatz (Lenz, 2012).

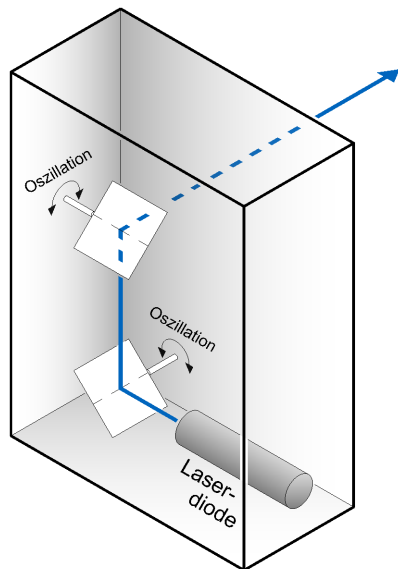
2.4 Prinzipien der Strahlablenkung und Begriffsdefinitionen

2.4.1 Grundlagen polar messender Systeme

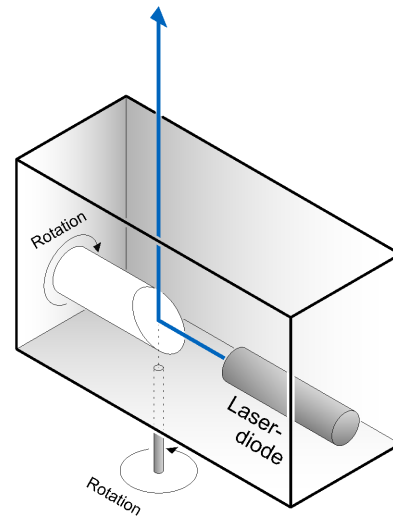
Für polar messende Systeme, bei denen die dreidimensionale Punktbestimmung durch einen Messstrahl erfolgt, ist die mechanische Auslenkung des Messstrahls zu unterschiedlichen, im Raum verteilten, Zielpunkten erforderlich. Bei tachymetrischen Systemen erfolgt diese Ablenkung durch Drehung der Alhidade (Messgehäuse) um eine vertikale Stehachse (VV) und eine Kippung des Fernrohrs um eine horizontale Kippachse (KK). Die Verbindungslinie zwischen Fadenkreuzmitte und Zielpunkt repräsentiert schließlich die Zielachse (ZZ), die zum Zeitpunkt der Streckenmessung durch den Laserstrahl realisiert wird.

Die Ausrichtung von terrestrischen Laserscannern zur Lotrichtung ist im Gegensatz zur tachymetrischen Vorgehensweise nicht unbedingt erforderlich, jedoch wünschenswert (Wunderlich, 2001). Die Bestimmung der beiden räumlichen Richtungen bzw. bei Festlegung entsprechender Nullrichtungen die Ermittlung von räumlichen Winkeln, erfolgt dann in einem Koordinatensystem, welches beliebig im Raum orientiert sein kann und erst unter Zuhilfenahme von Passpunkten in das i. d. R. horizontierte Zielsystem überführt werden. Bei terrestrischen Laserscannern wird die räumliche Ausrichtung des Laserstrahls durch drei unterschiedliche mechanische Ablenkensysteme umgesetzt (vgl. Abbildung 2.16). Reshetyuk (2006) gibt einen detaillierten Überblick über Möglichkeiten zur Laserstrahlablenkung für terrestrische Laserscanner, dennoch sollen die relevantesten technischen Umsetzungen nachfolgend Erwähnung finden. Dabei ist die zugrunde liegende Auslenkungstechnologie an den Arbeitsbereich der Winkelgeber gekoppelt und legt eine Kategorisierung von Laserscannern in Fachkamera- (engl. *camera-view*), Profil- und Panoramascanner nahe:

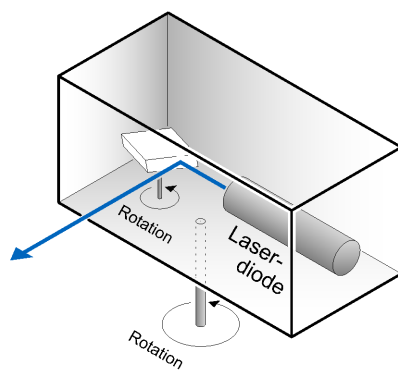
- Eine Möglichkeit der Strahlablenkung kann durch oszillierende Bewegungen von zwei Planspiegeln im Strahlengang des Laserstrahls durchgeführt werden. Der erste, sich langsam bewegende Spiegel, bewirkt eine Abtastung von Messprofilen in Spaltenrichtung. Der zweite Spiegel, dessen Bewegung mit höherer Drehrate erfolgt, führt den Messstrahl zeilenweise über das abzutastende Objekt. Dieses Strahlablenkungsprinzip wurde vornehmlich in Laserscannern der ersten Generation eingesetzt, die eine Abtastung nur in einem begrenzten horizontalen und vertikalen Ausschnitt vornehmen. In diesem Fall handelt es sich um so genannten Fachkamerascanner.
- In zahlreichen auf dem Markt befindlichen Laserscannern ist die Strahlablenkung durch einen rotierenden, um 45° zur Horizontalen schräg gestellten, Spiegel realisiert. Der Laserstrahl wird idealerweise in der Rotationsachse auf den Schrägspiegel projiziert. Dabei wird der Strahl im Auftreffpunkt auf dem Spiegel um einen Winkel von 90° abgelenkt. Bei einer vollständigen Umdrehung um die Rotationsachse liegen somit alle fächerförmig ausgesendeten Laserstrahlen in einer Ebene (Profilscanner); in Kombination mit einer Rotation um die Stehachse ist die Erfassung des nahezu gesamten Umfeldes (Panoramascanner) möglich. Bei höheren Drehzahlen erfordert die Anordnung Aufmerksamkeit bezüglich der Kompensation der dynamischen Unwucht, aber auch der Verbiegung des Spiegels durch die auftretenden Zentrifugalkräfte Wölfleschneider (2011).
- Eine weitere Möglichkeit ist die Strahlablenkung in vertikaler Richtung durch einen horizontal gelagerten, sich schnell drehenden oder oszillierenden, Polygonspiegel im Strahlengang des Laserstrahls in Verbindung mit einer langsamen Drehung um die vertikale Stehachse. In der Vertikalkomponente sind nur Auslenkungen in einem bestimmten Winkelbereich (z. B. $\pm 20^\circ$) möglich, da der Ablenkwinkel des Laserstrahls doppelt so groß ist wie die mechanischen Winkelauslenkung. Der Einsatz eines schnell rotierenden Spiegelpolygons ermöglicht sehr hohe Abtastgeschwindigkeiten bei gleichmäßigen Drehbewegungen. Die maximalen Drehbewegungen des Spiegelpolygons erreichen je nach Hersteller 2000 und mehr Umdrehungen pro Minute – die Anzahl der in dieser Zeit messbaren Profile kann dann zusätzlich durch die Anzahl der Polygonseiten gesteigert werden.



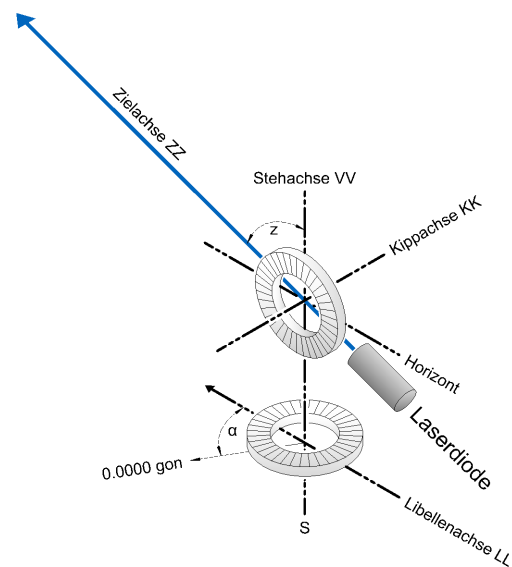
Oszillierender Spiegel



Rotierender Spiegel



Polygonspiegel



Tachymeter

Abbildung 2.16: Möglichkeiten zur Strahlablenkung bei terrestrischen Laserscannern und Tachymetern.

Bei allen Systemen wird die Raumrichtung durch hochauflösende Winkelgeber erfasst, die an den drehbaren Achsen angebracht sind (Ingensand, 2006). Bei Laserscannern genügt es im Gegensatz zu Tachymetern aber nicht, nur den ausgehenden Laserstrahl abzulenken – vielmehr muss auch das vom Messobjekt reflektierte Signal wieder über den gleichen Weg empfangen werden, bevor sich die Spiegelstellung(en) für die Messung des Folgepunktes weiter verstellt haben. Um genügend Licht einzusammeln sind aber deutlich größere Flächen als zur reinen Laserstrahlablenkung notwendig: Typischerweise beträgt der Spiegeldurchmesser ca. 50 mm Wölfeschneider (2011). Dies hat erhebliche Auswirkungen auf Größe, Gewicht und auf die maximale Scangeschwindigkeit des Systems. Daher sind Laserscanner fast immer so konzipiert, dass eine Achse schnell gescannt wird (Zeilen- bzw. Profils Scanner) und die Bewegung um die andere Achse sehr langsam, meistens durch Bewegung des gesamten Scanners (Panoramascanner), erfolgt.

Darüber hinaus beschreiben Wehr u. Lohr (1999) eine taumelnde Laserstrahlablenkung, die als *Palmer-Scan* bekannt ist. Diese Laserstrahlen tasten die Umgebung in einer Helixspirale ab und werden insbesondere für luftgestütztes Laserscanning (ALS) verwendet. Bei sog. Glasfaserscannern werden einzelne Laserimpulse mit Hilfe eines Spiegels in ein Glasfaserbündel geleitet. Der Vorteil dieses Scanmechanismus ist, dass er wegen der festen Anordnung der Glasfaserkabel äußerst stabil ist. Für weitere Betrachtungen sind die zuletzt genannten Mechanismen aber nur von geringer Bedeutung, weshalb sich die Arbeit im Weiteren auf die (klassischen) Sensoren des terrestrischen Laserscannings sowie der modernen Tachymetrie mit Scanningfunktionalität konzentriert.

2.4.2 Terrestrisches Laserscanning

Laserscanning bezeichnet das hochfrequente zeilen- oder rasterartige Überstreichen von Oberflächen mit einem Laserstrahl, um diese dreidimensional zu vermessen oder zu dokumentieren. Hierfür erforderliche Messsensoren, die den Laserstrahl zur Distanzmessung nutzen und diesen i. d. R. durch bewegliche Spiegel entsprechend ablenken (Messung von Horizontalrichtungen und Vertikalwinkeln), werden als Laserscanner bezeichnet. Werden diese bodengebunden (nicht zwangsläufig stationär) eingesetzt, spricht man von terrestrischen Laserscannern (TLS) in Abgrenzung zu luftgetragenen Systemen (airborne Laserscanning, kurz ALS). Ein Laserscanner, der neben der Objektgeometrie zusätzlich die Intensität des reflektierten Signals erfasst, wird abbildender Laserscanner genannt. Die Aufnahme der Intensitätswerte des von den Oberflächen reflektierten Laserlichtes erfolgt bei heutigen Lasermesssystemen in Graustufen oder Falschfarben. Im Ergebnis erhält man ein Abbild der Oberflächen ähnlich dem eines Schwarzweißfotos mit dem Mehrwert, dass die Bildpixel über geometrische – nämlich einem Distanzmesswert – Zusatzinformationen verfügen. Insbesondere für Zwecke der Dokumentation können die Intensitätswerte in Verbindung mit einem kalibrierten Kamerasystem durch RGB-Werte ersetzt werden.

Das terrestrische Laserscanning hat sich in den letzten Jahren als vielseitig einsetzbares und praxistaugliches Messverfahren erwiesen und in erstaunlich vielen Applikationen etabliert. Diese rasante Entwicklung wird u. a. gestützt von dem stetigen Fortschritt neuer Scannergenerationen (Sternberg, 2007), deren Vielfalt in aktuellen Marktübersichten (vgl. hierzu auch Tab. 2.3) zu finden ist. Die technischen Neuerungen sind nach (Staiger u. Wunderlich, 2008) in der zunehmenden Robustheit der Hardwarekomponenten zu finden, welche den zuverlässigen Einsatz in schwierigen Einsatzgebieten ermöglicht. Insbesondere die Verbesserung der Leistungsmerkmale (Datenerfassungsrate und Reichweite) sowie der Qualitätsparameter (Punktdichte und geometrische Richtigkeit der Messpunkte) treiben diese positiven Entwicklungen voran. Als wesentlicher Aspekt der geforderten Effizienz resp. deren Steigerung ist oftmals jedoch weniger die hardwaregestützte Datenerfassung, als vielmehr der direkt anschließende Prozess der Datenauswertung zu nennen (Schäfer, 2008b).

2.4.3 Tachymetrisches Scanning

Analog zu terrestrischen Laserscannern ist ein Tachymeter selbstverständlich ebenfalls ein Messinstrument, mit dem Horizontalrichtungen, Vertikalwinkel und Schrägstrecke – auch berührungslos – zu einem Zielpunkt ermittelt werden können. Aus der Historie heraus – dies belegen die bis zur Einführung motorisierter Tachymeter noch vorhandenen Klemmen und manuellen Feintriebe an beiden Drehachsen – waren Theodolite und

Tachymeter zur präzisen Einstellung eines einzelnen Messpunktes per Fadenkreuz konzipiert. Erst seit der Einführung sehr genau steuerbaren Schritt- und Servomotoren und der Miniaturisierung elektronischer Bauteile (z. B. CCD-Chips oder lichtempfindlichen Quadrantenfotodioden) verfügen moderne Tachymeter (Totalstationen) über eine automatische Zielerfassung und über die Möglichkeit der Zielverfolgung. Diesem Umstand ist im Übrigen geschuldet, dass der herkömmliche, aus zwei Personen bestehende Messtrupp in der Praxis heute oftmals durch eine Person ersetzt wird.

Für die topographische Aufnahme eröffnete sich aufgrund nun vermeidbarer Signalabrisse vermutlich das erste Anwendungsfeld. Aber auch Arbeitsabläufe wie die Grob- und Feinabsteckung und gar die Maschinensteuerung profitierten von den neuen Technologien. Für die Kombination mit der berührungslosen Distanzmessung im Sinne einer Scanningfunktionalität waren bis ca. 2006 sowohl die Motorisierung als auch die Distanzmessung noch zu langsam. Eine typische Messdauer lag hier im Bereich von 0,1 bis 10 Sekunden pro Messpunkt (vgl. Tabelle 2.3). Dafür lagen die Distanzmessgenauigkeit und das Messrauschen deutlich unterhalb der von TLS-Systemen.

Trotz der geringen Messrate und gerade wegen der hohen Messgenauigkeit wurde bereits vor der Integration der heutigen Scanningfunktionalität ebendiese bereits von Forschungseinrichtungen vereinzelt implementiert. Als Voraussetzung zur direkten Ansteuerung der Sensoren sind jedoch die herstellereitige Offenlegung der Schnittstelle und die Verfügbarkeit von Entwicklungsumgebungen zu nennen. Beide Voraussetzungen wurden von Leica stets erfüllt und so konnten Anwendungen programmiert werden, die entweder durch *on-board*-Applikationen (vgl. Kapitel 6) oder via PC mit einer seriellen Schnittstelle (z. B. in Striegl (2008)) die Tachymetersteuerung übernehmen konnten.

Der Hersteller Trimble führte bei den Totalstationen S8 und VX (Spatial Station) 2007 eine Oberflächenscannfunktion in seine Feldsoftware ein. Auch die Imaging Station der Firma Topcon verfügt seither über eine solche Funktion. Huep (2010) berichtet von ersten Erfahrungen der Scanfunktion mit der Trimble VX Spatial Station – auch in Verbindung mit dem Bildmesssystem. Dadurch wurden neue Mess- und Auswertestrategien, aber auch neue Anwendungen erschlossen. So wird z. B. über ein berührungsloses Verfahren zur Rissdokumentation bei Bauwerksschäden berichtet. Das Scannen des Objekts erfolgt dabei vorwiegend im Messbild, während das Tachymeter der Georeferenzierung bzw. Bildrektifizierung dient.

Mittlerweile haben sich Drehraten und Messgeschwindigkeit drastisch erhöht. So bietet die Leica Nova MS60 eine Scanningfunktionalität in einem 1000-Hz-Modus und einer Reichweite von 300 m bei einem Messrauschen von 1,0 mm in 50 m Entfernung. Für hohe Genauigkeitsanforderungen kann in einem 1-Hz-Modus mit einem Messrauschen von 0,6 mm in 50 m Entfernung gerechnet werden. Als Motorisierung wird hier ein Direktantrieb basierend auf der Piezo-Technologie verwendet – dabei sind Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 200 gon/s möglich.

Daraus ergeben sich im Vergleich zum terrestrischen Laserscanning zahlreiche Vorteile – darunter die mögliche Einbindung der Punktwolkenerfassung in den klassisch-tachymetrischen Messablauf, also z. B. die kombinierte Messung zu signalisierten Objekt- oder Festpunkten sowie das Arbeiten im Absteckmodus. Insbesondere die Option der Absteckung und berührungslosen Einmessung von Massepunkten wird in Kapitel 6 näher vorgestellt. Scherer (2004) führte hierzu die Bezeichnung des *Intelligenten Scannens mit Tachymetern* ein, welches als alternatives Messverfahren zum Terrestrischen Laserscanning angesehen werden kann (Scherer, 2007; Neitzel u. Johannes, 2009).

Aktuelle Tachymeter setzen zudem auf die Nutzung von Bildinformation während der Messung. Das Messbild wird dabei einerseits zur Dokumentation verwendet, andererseits kann es aktiv in den Messprozess integriert werden. Die Anzielung der Punkte muss beispielsweise nicht mehr über das Okular erfolgen, sondern kann direkt im Live-Bild vorgenommen werden. Optische Vergrößerungsfunktionen ermöglichen auch die exakte Detailanzielung, sofern eine koaxial angeordnete Kamera und nicht eine Übersichtskamera verwendet wird. Darüber hinaus erarbeitete Wasmeier (2009) die Grundlagen der Deformationsbestimmung anhand der Messdaten des bildgebenden Tachymeterprototyps IATS (*Image Assisted Total Station*). Mit der seriellen Integration der Messbilderfassung setzte sich dieser Forschungsschwerpunkt kontinuierlich fort: die zusätzlichen Bildinformationen werden künftig aktiv in den automatisierten Messprozess zu integrieren sein – Wasmeier u. Wagner (2016) stellen hierfür erste Ansätze vor und verdeutlichen diese anhand von Beispielen aus dem Bereich des Bauwerkmonitorings.

Kapitel 3

Laserscanning in der geodätischen Deformations- und Überwachungsmessung

Die berührungslose und flächenhafte Messwertgewinnung macht das Laserscanning zu einem interessanten Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken. Dieses Potenzial wurde für die reflektorlose Tachymetrie und des Terrestrische Laserscanning frühzeitig erkannt und in ersten Anwendungen erfolgreich erprobt (Wunderlich, 2004). Seither wurden zahlreiche Praxisbeispiele mit ganz unterschiedlichen Auswertansätzen vorgestellt. In diesem Kapitel wird zunächst der Versuch unternommen, diese Ansätze zu kategorisieren und anschließend durch Praxisbeispiele aus den gängigsten Anwendungsfeldern zu belegen. Dabei ist anzumerken, dass die Datenquelle der Punktwolke respektive das Messverfahren grundsätzlich keine Rolle spielt. Allerdings werden von der nachfolgenden Betrachtung bildgebende Verfahren ausgeschlossen – somit konzentriert sich dieses Kapitel auf rein geometrische Punktwolken ohne Intensitäts- oder RGB-Werte – und zudem im Wesentlichen auf Ingenieurbauwerke mit Betonoberflächen.

3.1 Auswertestrategien

Die Ingenieurgeodäsie bedient sich zur Überwachung von künstlichen und natürlichen Objekten zahlreicher Messtechnologien, aus denen sich zumeist Koordinaten eindeutig identifizierbarer Messpunkte ableiten lassen. Herkömmliche Methoden zur Deformationsanalyse bauen daher auf der Zuordnung homologer Objekt- bzw. Stützpunkte zweier Beobachtungsepochen auf. Diese Ansätze lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf hochauflösende und flächenhafte TLS-Daten übertragen, da aus registrierten Punktwolken mehrerer Messperioden keine identischen Objektpunkte direkt reproduzierbar sind. Gleichwohl existieren hier zahlreiche Strategien für vielfältige Anwendungsfelder aus Forschung und Praxis, welche diese Problemstellung behandeln und daher im Folgenden kurz erläutert werden sollen. Entsprechende Überblicke sowie anschauliche Beispiele geben auch Girardeau-Montaut u. a. (2005), Monserrat u. Crosetto (2008) sowie Holst u. a. (2014). Die zur Modellierung von Deformationen aus TLS-Daten möglichen Ansätze sind an dieser Stelle jedoch, nach (Ohlmann-Lauber u. Schäfer, 2011) und wie von (Wunderlich u. a., 2016) fortgeführt, in fünf Gruppen gemäß Abbildung 3.1 zusammengefasst.

3.1.1 Punktbasierte Ansätze

Punktbasierte Modelle stellen die einfachste Modellierungsform in diesem Zusammenhang dar. Dabei werden Koordinaten oder Distanzen wiederholter TLS-Messungen bei festem Scannerstandpunkt und konstantem Horizontal- und Vertikalwinkelraster direkt miteinander verglichen. Bei Little (2006) findet diese Herangehensweise Anwendung zur Langzeitüberwachung einer Tagebauböschung. Die ableitbaren Deformationsinformationen sind Differenzvektoren in Messrichtung. Das Ergebnis ist somit ein zum Scannerstandpunkt konzentrisches Vektorfeld welches in Form eines farbcodierten Differenzbildes visualisiert werden kann. Auch das in Kapitel 6 vorgestellte Messkonzept ist dieser Gruppe zuzuordnen, wobei hier das Horizontal- und Vertikalwinkelraster aufgrund globaler Translationen des Überwachungsobjektes im Zuge einer Absteckung an die aktuellen Verhältnisse der Messepoche angepasst wird und die Datenerfassung grundsätzlich von unterschiedlichen

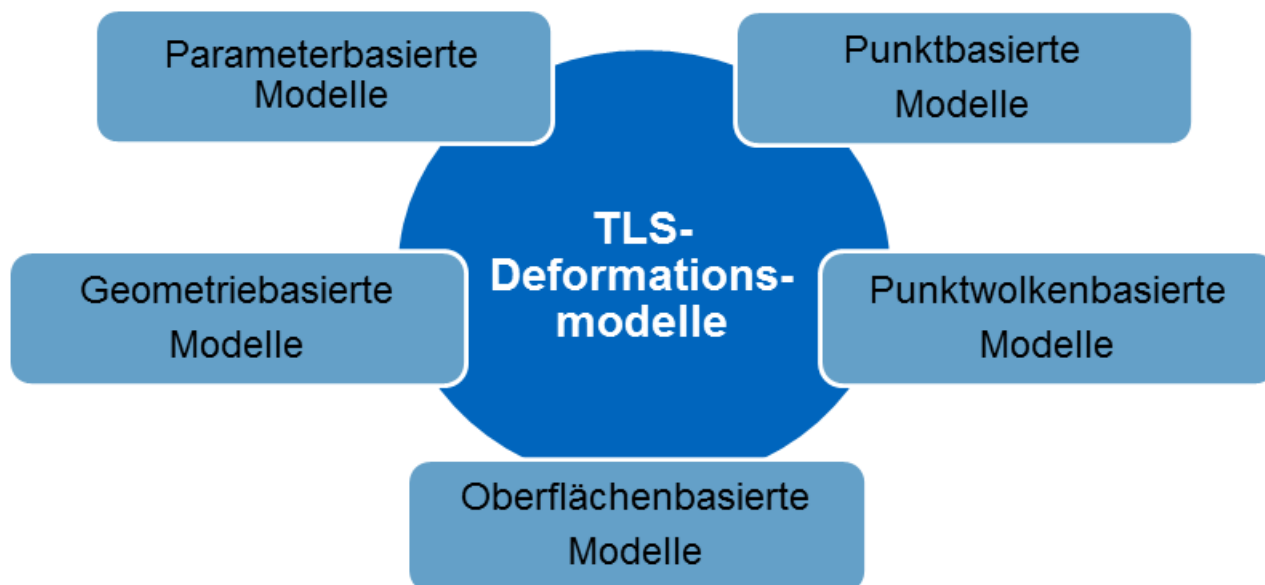


Abbildung 3.1: Auswertestrategien und Deformationsmodelle für Punktwolken

Standpunkten aus erfolgen kann. Sonderformen dieses Ansatzes können profil- oder punktartige Messungen mit einem Laserscanner sein, wobei hier die hohe Messfrequenz eines Laserscanners für Analysen im Frequenzraum verwendet werden kann – so geschehen bei Schwingungsmessungen an einer Windkraftanlage (Kutterer u. a., 2009).

Die Anwendung punktbasierter Modelle eignet sich prinzipiell nur bei einem günstigen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Vosselmann u. Maas, 2010), erfüllt aber aufgrund der Beobachtung homologer Punkte in unterschiedlichen Epochen am ehesten die Kriterien für eine strenge Deformationsanalyse.

3.1.2 Punktwolkenbasierte Ansätze

Oftmals wünschenswert ist ein direkter Vergleich zweier Punktwolken insbesondere dann, wenn es sich um die Detektion grundlegender (grober) Veränderungen in der erfassten Szenerie handelt. (Girardeau-Montaut u. a., 2005) beschreiben hierfür ein Verfahren, das sich auf die Anwendung innerhalb einer Baugrube, aber auch innerhalb von Gebäuden konzentriert. Zur schnellen Analyse großer Datenmengen einer komplexer Umgebung bedienen sie sich zunächst einer effizienten Octree-Strukturierung, gekoppelt mit verschiedenen *cloud-to-cloud* Vergleichsalgorithmen, wie der Hausdorff-Metrik. Hierbei werden innerhalb zweier homologer Punktwürfel die Distanzen zwischen allen Punkten des ersten Würfels zu ihren nächsten Nachbarn des zweiten Würfels berechnet. Wesentliche Einschränkung dieses Ansatzes ist die begrenzte Genauigkeit der abgeleiteten Deformationskarte.

Auch wenn dieser Ansatz von zwei erfolgreich registrierten Punktwolken ausgeht, kann er zudem als Näherungslösung für zwei zu registrierende Punktwolken angesehen werden. Darauf aufbauend können der viel zitierte *iterative Closest Point*-Algorithmus, kurz ICP von Besl u. McKay (1992) oder alternative Verfahren mit der Bezeichnung LS3D (Akca u. Gruen, 2005) und ICPprox (Wujanz u. a., 2014) eingesetzt werden – Weitere *Feature Matching* Methoden werden in (Wang, 2013) vorgestellt. Ursprünglich konzipiert zur Feinregistrierung ohne Zuhilfenahme von Passpunkten, liefern beide Verfahren ein zuverlässiges *Matching* zweier Punktwolken, da sie die Gesamtinformation beider Punktwolken verwenden und diese für eine sukzessive Optimierung der Transformationsparameter einsetzen können. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist, dass beide Teilmengen unverändert bleiben. Liegen Deformationen vor, ist mit einem verfälschten Ergebnis zu rechnen. Ist man jedoch in der Lage, stabile von instabilen Bereichen zu trennen, können diese Algorithmen zur Ableitung von in diesen Bereichen gültigen Transformationsparametern herangezogen werden.

Monserat u. Crosetto (2008) weisen die Tauglichkeit einer solchen Herangehensweise experimentell nach, indem sie eine Topographie simulierten Deformationen unterziehen. Nach einer manuellen Segmentierung der einzelnen Deformationsbereiche werden diese mit Hilfe des LS3D der Referenzpunktswolke angeglichen. Als Ergebnis kann für alle Testbereiche je eine Starrkörperbewegung durch drei Rotationen und drei Translationen nachgewiesen werden. Von Striegl (2008) wurde ein ICP-Ansatz in Verbindung mit der Automatisierung des tachymetrischen Scanprozesses implementiert. Von einer automatischen Segmentierung der Punktwolken in stabile und instabile Teilbereiche auf Basis von Octree-Zellen wird in (Friedli u. Wieser, 2016) berichtet. Hier werden zudem Datensätze einer alpinen Gletschervermessung analysiert und somit die Praxistauglichkeit unter realen Bedingungen nachgewiesen.

Diese Methode scheint demnach insbesondere zur Überwachung natürlicher Objekte geeignet zu sein, wobei anzumerken ist, dass die Qualität der detektierbaren Deformationen nicht zuletzt abhängig von der Größe der Teilbereiche bzw. der Anzahl der darin enthaltenen Laserscanpunkte ist.

3.1.3 Oberflächenbasierte Ansätze

Unter oberflächenbasierten Modellen sollen an dieser Stelle jene Ansätze verstanden werden, bei denen mindestens eine der beiden zu vergleichenden Punktwolken als Oberflächenmodell dargestellt wird – bei Laserscanningdaten erfolgt dies oftmals durch eine Dreiecksvermaschung.

Studien von Bitelli u. a. (2004) und Hesse u. Stramm (2004), sowie Schäfer u. a. (2004) vergleichen derartige Oberflächenmodelle verschiedener TLS-Kampagnen, um daraus Objektdeformationen abzuleiten; in letzterem Beispiel die Verformung eines Schleusentores in Bezug zu einer vertikalen Ebene. Grundlegend basieren diese Ansätze auf einem Interpolationsansatz, bei dem die vorhandenen Oberflächen an reproduzierbaren Stützstellen (z. B. an regelmäßigen Gitterpunkten) neu berechnet werden. Anschließend werden die interpolierten Koordinaten (z. B. eine z-Komponente) einem punktbasierten Differenzmodell (vgl. Abschnitt 3.1.1) unterzogen. Schlussfolgernd handelt es sich hierbei um eine eindimensionale Deformationsmessung, die im Vorfeld auf das zu überwachende Objekt abzustimmen ist. Angesichts des 3D-Charakters einer Punktwolke, stellt dies zunächst eine empfindliche Einschränkung dar.

Zudem weist das Modell eine verringerte Empfindlichkeit für kleine Deformationen auf, da die Messunsicherheiten zweier Messpunkte direkt über das Varianzfortpflanzungsgesetz in das Deformationsmodell eingehen – das Potenzial einer Punktwolke wird also nicht vollständig ausgeschöpft. Ohlmann-Bartusel (2008) und Ohlmann-Bartusel u. a. (2009a) beschreiben zur Lösung dieser Problematik einen adaptiven Filteralgorithmus und wenden diesen exemplarisch an einer mit Spritzbeton gesicherten Tunnellaibung sowie einer Ortsbrust an. Besagter Algorithmus erkennt und eliminiert zum einen Störpunkte, berücksichtigt zum anderen aber auch die lokalen Nachbarschaften von Messpunkten, um die Präzision im Deformationsbild zu erhöhen.

Um den Mehrwert der dreidimensionalen Punktwolke auch auf das Deformationsmodell zu übertragen, kann auch nur eine der beiden Punktwolken als Dreiecksvermaschung dargestellt werden. Der räumliche Vergleich basiert in diesem Fall auf dem kürzesten Abstand jedes Punktes der Punktwolke zu einem korrespondierenden Dreieck der Bezugspunktswolke resp. -dreiecksvermaschung. Da auch hier der Lotfußpunkt innerhalb des korrespondierenden Dreiecks als Interpolationspunkt, also nicht als Originalpunkt der Punktwolke, anzusehen ist, beschränkt sich auch dieser räumliche Ansatz auf eine Näherungslösung. (Wiedemann, 2010) berichtet in diesem Zusammenhang unter Verwendung der kommerzieller Software GEOMAGIC und dem darin enthaltenen Werkzeug *3D-Compare* von einer Deformationsauswertung einer Felswand.

3.1.4 Geometriebasierte Ansätze

Unter der Annahme, dass Deformationen für Objektregionen als Starrkörperbewegungen auftreten, können diese Bereiche mittels geometrischer Formen für eine Deformationsanalyse beschrieben werden. In der Regel lassen sich alle Ingenieurbauwerke konstruktionsbedingt durch einfache geometrische Formen (z. B. Ebenen) oder durch Flächen zweiter Ordnung (z. B. Zylinder, Kegel, Ellipsoide, Hyper- oder Paraboloiden) beschreiben.

Mit einem Ausgleichungsansatz lässt sich diese bestangepasste Geometrie schätzen, wobei die Verteilung und Standardabweichung der Residuen die Güte der Approximation zeigen.

Objektdeformationen lassen sich schließlich durch die Änderung der Lage und Orientierung der geometrischen Objekte ableiten. Hierfür können beispielsweise für Ebenen der Normalenvektor oder für Zylinder die Rotationsachse betrachtet werden. Ebenso können leicht interpretierbare Parameter wie der Radius eines Zylinders oder der Winkel zweier Ebenen für die Bestimmung der Objektdeformation herangezogen werden. Bajtala u. a. (2011) nutzen in diesem Sinne einen geometriebasierten Ansatz bei einem 120 m hohen Industrieschlot, indem alle fünf Höhenmeter Querschnitte durch die Punktwolke gelegt werden. Die Beurteilung der Kreismittelpunkte führt schließlich zu einer Überprüfung der Lotrechtstellung.

Aber auch die Analyse der Residuen zur modellierten Oberfläche können Rückschlüsse auf Deformationen, beispielsweise in Bezug zu einer Sollgeometrie, liefern. Zur Dokumentation und Schadenskartierung eines architektonischen Baukörpers in Gestalt eines Ellipsoids wird eine solche Analyse in (Ratke, 2006) beschrieben. Eine Untersuchung lastbedingter bzw. elevationsabhängiger Verformungen an einem Radioteleskop hinterlegt ein Paraboloid als Referenzfläche – neben den Residuen zur Darstellung lokaler Deformationen werden in (Holst u. Kuhlmann, 2011) aber auch Parameter zur Bestimmung der Brennweitenvariationen vorgestellt.

Ein hierzu abweichender, aber trotzdem auf einer geometrischen Modellierung basierender Ansatz ist in (Eling, 2009) beschrieben: Die Arbeit beschreibt die Gewinnung von reproduzierbaren und repräsentativen Objektpunkten mittels einer Oberflächenmodellierung durch bestangepasste regionale Geometrien und einem für das Bauwerk im Vorfeld definierten Blockgittermodell, welches das Bauwerk in Regionen gliedert. Vorhandene Stützpunkte und die aus der Modellierung abgeleiteten, repräsentativen Objektpunkte inklusive deren Varianz-/Kovarianz-Informationen bilden die Grundlage für die Anwendung einer klassischen Deformationsanalyse mit Signifikanztest auf die TLS-Datensätze.

Der Hauptvorteil geometriebasierter Ansätze liegt in der Ausnutzung der hohen Redundanz zur Schätzung der geometrischen Flächen. Die Herausforderung besteht jedoch darin, jene Bereiche aus der Punktwolke zu extrahieren, die die Modellgeometrien auch tatsächlich repräsentieren und zudem das Deformationsverhalten auch plausibel charakterisieren. Aufbauend auf der Approximation von geometrischen Flächen, lässt sich ein Signifikanztest zur Aufdeckung von Objektdeformationen unmittelbar auf Basis der aus einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung hoch redundant geschätzten Parameter durchführen.

3.1.5 Parameterbasierte Ansätze

Parameterbasierte Modelle können als Weiterentwicklung der geometriebasierten Modellierung verstanden werden – wurden im vorherigen Ansatz bereits leicht interpretierbare geometrische Größen wie Kreisradien oder Brennweiten angesprochen, beziehen sich parameterbasierte Ansätze auf schwer(er) interpretierbare Kenngrößen. Die für eine Deformationsanalyse geeigneten Parameter lassen sich demnach in geometrisch deutbare und nicht (unmittelbar) deutbare Parameter unterteilen. Beispiele für transparente Größen sind die Parameter von Flächen 2. Ordnung. Als komplexe Parameter können z. B. die Polynomkoeffizienten von Flächen höherer Ordnung (vgl. Formel 6.2) oder Polynome bzw. Kontrollpunkte von Freiformflächen angesehen werden.

Friedel (2011) entwickelt für einen Profils Scanner eine Echtzeitanwendung zur Auswertung von Deformationen an einem ebenen Testkörper, der um definierte Winkelbeträge gegenüber der Messrichtung verdreht werden kann. Zwar ist der zu beurteilende Parameter geometrisch leicht interpretierbar (und daher noch den geometriebasierten Ansätzen zuzuordnen), aber die Arbeit beinhaltet auch einen automatisierten Tests der Geradengleichung auf signifikante Änderungen gegenüber der Referenz- und Vorepoche und ist zudem problemlos erweiterbar auf Polynomkurven und Flächen höheren Grades.

Bereits in (Rudig, 2005) wird durch Approximation von B-Spline-Flächen das Messrauschen der Laserscannerdaten an einer Bogenstaumauer reduziert und für eine Analyse flächenhafter Deformationen herangezogen. Braun (2011) untersucht die Eignung der Freiformflächenmodellierung in Hinblick auf eine hochgenaue Ableitung von flächenhaften Deformationen an einem Testkörper. Für eine Visualisierung der Deformationen

wird aus zwei B-Spline-Flächen durch bilineare Interpolation ein Differenzmodell gebildet, aus welchem die Deformationen abgeleitet werden. Schlussendlich sind diese beiden Beispiele trotz des Einsatzes von Freiformflächen doch den oberflächenbasierten Ansätzen zuzuordnen. Zur Berechnung der Freiformflächen wird ein geordnetes Kontrollpunktnetz benötigt. Aus Gründen der Rechenkapazität kann zudem nicht jeder Laserscanpunkt als Kontrollpunkt herangezogen werden. Daher ist eine Sortierung der Punktwolke sowie eine Ausdünnung erforderlich. Harmening u. Neuner (2016) arbeiten daher an der Bestimmung der optimalen Anzahl von B-Spline-Kontrollpunkten mit der Absicht, diese Erkenntnis für die flächenhafte Deformationsbestimmung zu verwenden.

Denkbar sind aber auch Parametrisierungen mit Methoden der Zeitreihenanalyse. Ein Beispiel zur Ableitung von baumesstechnischen Größen aus Laserscanprofildaten ist in (Neuner u. a., 2015) gegeben. Die relevanten Parameter sind, z. B. bei einer FFT-Analyse, das Frequenz- und Amplitudenspektrum. Diese ermöglichen ebenfalls eine Beurteilung von Auffälligkeiten in den unterschiedlichen Wellenlängen.

Der Vorteil von parameterbasierten Modellen ist, dass nahezu beliebig geformte Oberflächen dargestellt werden können. Auch wenn an dieser Stelle noch großer Forschungsbedarf vorliegt, so könnte eine Anwendung in der automatisierten Analyse der Koeffizienten, Kontrollpunkte oder Frequenzen liegen. Auch wenn diese nicht interpretierbar sind, können sie Hinweise auf signifikante Änderungen im Sinne einer Alarmierung liefern – erst in einem darauf folgenden Prozessierungsschritt wäre dann die Lokalisierung und Ermittlung der Größenordnung von möglichen Deformationen durchzuführen.

3.2 Anwendungsfelder und Praxisbeispiele

Trotz der inzwischen äußerst vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und der Vielzahl veröffentlichter Praxisbeispiele sollen im Folgenden einige herausgegriffen und kurz vorgestellt werden. Dabei sollen zunächst Anwendungen aus dem Bereich der Oberflächeninspektion, die zumeist auf einem Vergleich mit Regelgeometrien als Bezugsflächen beruhen, aber auch im Tunnelbau bei der Dokumentation von Über-/Unterprofilen von Bedeutung sind, Erwähnung finden. Insbesondere im Tunnelbau spielen zudem Überwachungsmessungen, insbesondere Konvergenzmessungen, eine herausragende Rolle. Hierbei hat sich das Laserscanning für zahlreiche Messaufgaben bereits heute etabliert. Für obertägige Ingenieurbauwerke – ebenfalls vornehmlich bestehend aus Betonoberflächen – werden Beispiele für Bestands- und Überwachungsmessungen an Staumauern und schließlich an Brückenbauwerke aufgezeigt

3.2.1 Oberflächeninspektion

Bei der Oberflächeninspektion wird die sichtbare Hülle eines Objekts geprüft, um Eigenschaften zu dokumentieren und Defekte – oftmals im Zuge des Fertigungsprozesses – erkennen zu können. Demzufolge spielt die Oberflächeninspektion bei der Fertigungskontrolle und Qualitätssicherung eine entscheidende Rolle. Ein einfaches Beispiel für eine laserscanbasierte Oberflächeninspektion gibt (Ratke, 2006) bei der Dokumentation und Schadenskartierung der Oberfläche eines architektonischen Baukörpers – hierbei wurden Gestaltabweichungen von einem Rotationsellipsoid aufgedeckt und visualisiert. Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich Maschinenbau ist (Özkul, 2009) zu entnehmen. Hierin wird ein industrietaugliches optisches Messsystem zur automatisierten und objektiven Detektion von Imperfektionen auf unlackierten Automobilkarosserien beschrieben.

Die Bearbeitung und Prüfung von Betonoberflächen ist im Bauwesen in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Zum einen werden Verfahren zur Oberflächenbearbeitung gezielt als Gestaltungselement eingesetzt (z. B. bei Sichtbeton) und zum anderen müssen im Rahmen von Instandsetzungsmaßnahmen Oberflächen aufgearbeitet werden, um sie für eine optimal haftende Beschichtung vorzubereiten. Hierzu sind Prüfungsmethoden und Beurteilungskriterien erforderlich, die für die Qualitätsbeurteilung des Betonuntergrundes ausschlaggebend sind (Momber u. Schulz, 2005). Im DBV/BDZ-Merkblatt „Sichtbeton“ wird von Planern eine detaillierte Festlegung in eine Klasseneinteilung gefordert, die die Aspekte Textur der Schalhaut, Farbton(gleichheit), Arbeitsfugen, Porigkeit und Ebenheit berücksichtigt (DBV, 2015). Anhand von Musterflächen und Hinweisen zu

zielführenden Ausführungsmaßnahmen soll eine mängelfreie Bauausführung ermöglicht werden. Lässt man zunächst die farbliche Gestaltung außer Betracht, beschreiben alle anderen Punkte geometrische Eigenschaften. Daraus ist abzuleiten, dass die Rauheit als ein zentrales Objektivierungsmerkmal anzusehen ist, das durch geeignete Mess- und Auswerteverfahren zu ermitteln ist. Die Rauheitsmessung wird dabei durch zahlreiche Normen definiert, z. B. in der DIN EN ISO 25178 aus dem Bereich der Geometrischen Produktspezifikation (GPS). Demgegenüber stehen auch Normen zur Gestaltabweichungen nach DIN 4760 (Volk, 2005). Aktuelle und sinnvolle Rauheitskenngrößen werden in (Preis, 2016) aus geodätischer Sicht vorgestellt und diskutiert.

Ein grundlegender Bestandteil der ISO 25178 ist die Berücksichtigung von berührungslosen und flächenbasierten Messmethoden – somit ist die Oberflächenmesstechnik nicht auf mechanisch abtastende (taktile) Verfahren beschränkt, sondern behandelt auch moderne Methoden, unter anderem die Konfokalmikroskopie und Weißlichtinterferometrie. Für Anwendungen aus den Bereichen Architektur und Bauwesen kommen dabei vermehrt Nahbereichsscanner, aber auch terrestrische Systeme für den mittleren Entfernungsbereich zum Einsatz. Die Anwendungsbeispiele reichen dabei entsprechend von mikroskopischen Untersuchungen, z. B. zur Beurteilung der Haftuntergründe in Zusammenhang mit chemischen Prozessen bis zu grobwelligen Gestaltsabweichungen, z. B. bei Fassadenunebenheiten.

El-Tornachi (2003) und Lenz (2012) bestimmen die Rauheit von Betonoberflächen auf Basis von flächenhaften Laserscans, um die Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton im Zuge von Sanierungsmaßnahmen zu überwachen. (Xiangyang u. a., 2015) nutzen terrestrische Laserscanner, allerdings unter Verwendung bildgebender Informationen (Intensitätswerte der Punktwolke), zur Risserkennung und -dokumentation. Daten zur Beschaffenheit von Fahrbahnoberflächen bilden die Grundlage zur Planung von Instandhaltungsarbeiten am Straßennetz. Gemeinsam mit Industriepartnern hat das Fraunhofer IPM einen mobilen Laserscanner entwickelt, der Unebenheiten im Fahrbahnbelag erkennt. Dabei werden nach Angaben der Hersteller Flächenelemente von typischerweise $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ gemittelt und eine Höhenauflösung von wenigen Zehntel-Millimetern erreicht. Sowohl Juretzko (2005) als auch Rauch (2009) beschreiben Ansätze auf Basis des tachymetrischen bzw. terrestrischen Laserscannings zur Dokumentation von Fassadenunebenheiten. Hintergrund sind energieegerechte Außenwandsanierungen mit industriellen Vorfertigungstechniken, z. B. mittels Vakuumdämmelementen oder Holzbausystemen. Die exakte Kenntnis der Fassadengeometrie und -beschaffenheit ist hierzu bereits im Vorfeld der Planung unerlässlich, da eine Nachbearbeitung der vorgefertigten Elemente vor Ort nur schwierig möglich bzw. auf Grund ihrer Größe unmöglich ist.

3.2.2 Tunnelbauwerke

Das Laserscanning ist im heutigen Tunnelbau ein Messverfahren mit einem immer größer werdenden Anwendungsspektrum. Dieses umfasst sämtliche Lebenszyklusphasen von der Planungsphase (Entscheidungsgrundlage für Sanierungsmaßnahmen, Qualitätsmanagement, Beweissicherung), dem Entwurf und der Konstruktion (vortriebsbegleitende Bauunterstützung, 3D Deformationsmessungen) sowie schließlich der Nutzungsphase (Abrechnungsgrundlage, Wartungsaufgaben, Bestandsdokumentation) (Ohlmann-Bartusel u. a., 2009b). Die momentan oft konkurrenzlose Stellung verdankt das 3D-Tunnelscanning seiner flächigen Objekterfassung, der Objektivität der Messergebnisse, der gestiegenen Genauigkeit der Messinstrumente, sowie ökonomischen Gesichtspunkten wie Schnelligkeit, Effizienz und eine zunehmende Anpassung der Laserscanning-Technologie an die Messumgebung unterirdischer Bauwerke (Staiger u. Wunderlich, 2008).

In Fortsetzung der zuvor aufgeführten Oberflächeninspektion werden im Tunnelbau heute standardmäßig zeitversetzt Punktwolken erfasst, da bei Spreng- oder Baggervortrieben Profilabweichungen zwischen dem tatsächlichen und dem theoretischen Ausbruchprofil entstehen und diese möglichst lückenlos zu dokumentieren sind. Eine Einhaltung des Regelprofils ist zu beachten, um den Innenausbau zu optimieren und letztendlich die Einhaltung von Lichtraumprofilen zu gewährleisten. Visualisierungsgrundlage solcher Profilabweichungen ist eine Abwicklung der 3D-Laserscanningdaten in eine Abwicklungsebene, mit Bezug zum Projektkoordinatensystem (Stationierung und radialer Abstand). Demzufolge werden hier radiale Deformationen ermittelt.

Bereits Hesse u. Stramm (2004) und Stramm (2004) untersuchen die Operabilität von Laserscannern bei der Konvergenzmessung in Tunnelbauwerken und nutzen hierfür den hochpräzisen Triangulationsscanner Men-

si S25. Hierzu wurden signalisierte Messpunkte an die Tunnelwand angebracht und das Messverfahren ist demnach weder als flächenhaftes noch berührungsloses Messverfahren einzustufen. In (Nuttens u. a., 2010) wird über Kontrollmessungen von Tübbingem binnen zwei Stunden nach Platzierung der Fertigbetonelemente durch die Tunnelbohrmaschine sowie in weiteren Messepochen berichtet. Die Erfassung erfolgt hier von zwei gegenüberliegenden Standpunktconsolen aus; für die Verknüpfung der beiden Punktwolken werden Passmarken genutzt. Die Gesamtpunktwolke einer Sektion wird durch einen bestangepassten Zylinder modelliert. Die Residuen der Einzelpunktwolke zum Zylinder werden als radiale Abweichungen dargestellt und liefern aussagekräftige Ergebnisse zur Abweichung von der Kreisförmigkeit einzelner Stationierungsprofile bzw. Stabilisierungsinformationen im Vergleich zu Vorepochen.

Chmelina u. a. (2012) stellen ein mobiles Multisensor-System für die Überwachung und Kartierung von Tunnelwänden vor. Das Messsystem besteht aus einem 3D-Laserscanner, einem motorisierten Tachymeter und einer Digitalkamera, die gemeinsam auf einem Leichtmetallrahmen als mobile Plattform ähnlich einer Schubkarre angeordnet sind. Die Auswertung der räumlichen Verschiebungen basiert auf einem punktwolkenbasierten Ansatz, der den besonderen Bedingungen der Tunneloberfläche aus Spritzbeton Rechnung trägt. Im Zuge der Datenfusion wird für die Bewertung von Punktverschiebungen eine *Virtual-Reality*-Umgebung eingesetzt. Das Werkzeug ermöglicht die Anzeige und Animation der Daten, und soll eine optimale Unterstützung bei der Interpretation der Daten liefern. Darüber hinaus ist eine Auswertung von multitemporalen 3D-Laserscanning-Daten der Ortsbrust (Ohlmann-Bartusel u. a., 2009a) im unmittelbaren Tunnelvortriebsbereich auf flächenhafte Deformationen Gegenstand der Forschung.

Für die Geotechnik bilden prompte flächenhafte Nachweise von Deformationen eine wichtige Entscheidungsgrundlage. Neben der Validierung von geotechnischen Modellen können flächenhafte Deformationen Eingang in Tunnelinformationssystemen finden und somit den Bauprozess unterstützen. Zudem bildet das 3D-Tunnel-scanning eine unabhängige Messmethode zur Überprüfung von konventionellen Messverfahren.

3.2.3 Staumauern

Bogenstaumauern aus Beton unterliegen unter anderem in Folge schwankender Stauhöhen verschiedenen Belastungszuständen, die zu periodischen Deformationen des Bauwerks führen. Diese Verformungen werden bei Staumauern regelmäßig geodätisch überwacht, wobei zahlreiche und an das individuelle Bauwerk angepasste Messverfahren zum Einsatz kommen. Als gängigste Methoden seien terrestrische oder satellitengestützte Netzmessungen genannt, die über ergänzende Polygonzüge auch eine Verknüpfung in das Bauwerksinnere schaffen und dort mit Lotungsmessungen eine messtechnische Verbindung zur Gründungssohle ermöglichen. Mit Hilfe von Laserscans ist neben der punktuellen Erfassung auch eine flächenhafte Erfassung der luftseitigen Oberfläche möglich.

In (Rudig, 2005) wird der Einsatz von TLS für die Überwachung einer 25 m hohen Talsperre vorgestellt. Die Bogenstaumauer wurde nach Fertigstellung und einem Vollstau von einem Messpfeiler aus als Punktwolke abgebildet. Mittels Approximation durch B-Spline-Flächen wird eine Reduktion des Messrauschens erzielt. Dazu werden Kontrollpunkte berechnet, deren Abstandsqüadrate zur modellierten Fläche im Sinne einer Ausgleichung minimiert werden. Da keine Einbindung in ein übergeordnetes Festpunktfeld besteht, werden in dieser Arbeit nur Aussagen über relative Verformungen getroffen, aber durch tachymetrische Messungen punktuell bestätigt. Der Vergleich der beiden Punktwolken erfolgt nach einer bestmöglichen Referenzierung der beiden Punktwolken zueinander.

In (Eling, 2009) wird ebenfalls eine Bogenstaumauer mit einer Kronenlänge von 260 m und einer Höhe von 74 m mittels terrestrischem Laserscan mehrfach beobachtet. Zur Ableitung flächenhafter Deformationen wird hier auf einen methodischen Ansatz gesetzt, der die Definition des geodätischen Datums in Verbindung mit dem bestehenden Überwachungsnetz berücksichtigt. Für die Auswertung der registrierten Punktwolken wird ein Blockgittermodell generiert, wobei die gemessenen Punkte jeweils einem Block zugeordnet werden. Innerhalb dieser Blöcke wird jeweils eine Datenfilterung durchgeführt und schließlich die Ableitung eines repräsentativen Punktes vollzogen. Im Zuge dieser Prozessierungsschritte wird eine Varianz-Kovarianzmatrix mitgeführt, um eine Abschätzung der Genauigkeit der repräsentativen Punkte einerseits, aber auch eine Aussage über die Signifikanz der Deformationsgrößen andererseits treffen zu können.

Diese beiden Beispiele lassen vermuten, dass sich das terrestrische Laserscanning auch auf diesem Gebiet künftig stärker etablieren wird. Dennoch findet das Messverfahren in der Empfehlung des Schweizerischen Talsperrenkomitees kaum Erwähnung für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei Stauanlagen (Talsperrenkomitee, 2013). Des Weiteren weisen aktuelle Publikationen darauf hin, dass flächenhafte Deformationsmessungen an Talsperren und in deren alpiner Umgebung künftig eher mittels Radarinterferometrie erfolgen könnten (Jacquemart u. Meier, 2014).

3.2.4 Brückenbauwerke

Für die Inspektion und schließlich für die Beurteilung der Standsicherheit von Brückenbauwerken sind neben verformungsbasierten und schwingungsbasierten Überwachungsmessungen auch zuverlässigen Bestandsunterlagen (As-Built-Dokumentationen) unerlässlich. Sind diese z. B. bei historischen Brückenbauwerken nicht vorhanden, ermöglicht bereits hier ein hochauflösender Laserscan und eine anschließende Modellierung eine detaillierte Erfassung der Geometrien (Retze, 2007). Die gewonnenen Daten sind zudem mit einem gewissen Mehraufwand auch als Grundlage für ein *Building Information Modelling* (kurz: BIM; deutsch: Gebäudedatenmodellierung) verwendbar und mit aktuellen und zukünftigen Brückeninspektionen und -bewertungen zu verknüpfen (Borrmann u. a., 2015). Chen (2012) listet das Potenzial von Laserscanningmessungen zur Brückenüberwachung auf und bringt die Anwendungsmöglichkeiten mit erforderlicher Auflösung und Messgenauigkeit in Verbindung. Dabei werden einfache geometrische Analysen wie die Bestimmung von lichten Durchfahrts Höhen bis hin zur komplexeren Überwachungsmessungen wie Durchbiegungsmessungen und Rissdokumentationen diskutiert.

Mit dem Hintergrund der Deformationsmessung wurden im Zusammenhang mit anstehenden Instandsetzungsarbeiten an einer Autobahnbrücke Belastungsversuche zur Untersuchung von Ermüdungsproblemen und zur Verbesserung der Berechnungsmodelle durchgeführt. Zogg u. Ingensand (2008) beschreiben ihre Herangehensweise und stellen die gewonnenen Ergebnisse einem Präzisionsnivellement gegenüber. Aufbauend auf der tachymetergestützten Projektarbeit zur Bauwerksüberwachung der Hochbrücke Freimann, wurden von Ohlmann-Bartusel u. Mayr (2007) zwei Panoramascanner unterschiedlicher Fabrikate eingesetzt, um eine etwaige Höhenänderung der Brückendecke aus Punktwolken abzuleiten. Dabei wurde das Erfordernis erkannt, das Messrauschen zum Nachweis geringer Deformationen zu reduzieren. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag daher auf der Entwicklung geeigneter Filtermethoden mit dem Ziel, repräsentative Punkte für eine Deformationsanalyse zu extrahieren.

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhaben des Institutes für Massivbau und des Geodätischen Institutes der Universität Hannover wurden von 2010 bis 2013 Strategien und Methoden des *Life-Cycle-Engineerings* für Ingenieurbauwerke und Gebäude entwickelt. Ziel der Kooperation war die Erfassung statischer und dynamischer Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf Spannbetonbrücken. Parallel zu Beobachtungen mit Mitteln der Baumesstechnik (Dehnungsmessstreifen und optische Sensoren) wurden auch Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt (Schmitt u. a., 2013b). Grundsätzlich ist es gelungen, die Dehnung der Brücke über die gemessene Durchbiegung zu modellieren (Schmitt u. a., 2013a; Neuner u. a., 2015). Aufgrund der Verwendung der hochfrequent erfassten Profildaten und deren anschließender Approximation und Zeitreihenanalyse, spricht die Forschungsgruppe in diesem Zusammenhang auch von kinematischem Laserscanning, kurz k-TLS – dabei resultiert die Kinematik allerdings aus der Objektbewegung, und nicht aus der Bewegung der Messplattform wie beispielsweise bei *Mobile-Mapping*-Systemen, dem die Bezeichnung k-TLS vermutlich entspringt. Letztgenanntes Beispiel gibt daher bereits einen Ausblick auf zukunftsweisende Messverfahren, wie sie abschließend in Kapitel 7 diskutiert werden.

3.3 Grenzen des Laserscannings in der Deformationsmessung

Die klassische geodätische Vorgangsweise zur Überwachungsmessungen von natürlichen und künstlichen Strukturen diskretisiert ein Untersuchungsobjekt durch wenige, repräsentative Objektpunkte. Diese werden mit geeigneten Zieleinrichtungen (z. B. mit Reflektoren oder Passmarken) bestückt und epochenweise vermessen. Verglichen werden dann die Koordinatendifferenzen der Punkte zwischen den vorliegenden Epo-

chen. In Relation zu den Messgenauigkeiten werden die Differenzen statistisch geprüft, um so signifikante geometrische Veränderungen bestimmen zu können. Diese statistischen Tests im Sinne einer strengen Deformationsanalyse können nur auf Punkte angewendet werden, die in jeder Epoche als identische Punkte vorliegen.

Werden sehr große Flächen mittels Laserscanning in Punktwolken abgebildet und diese nach lokalen Deformationen abgesucht, kann die oben beschriebene Strategie nicht 1:1 angewendet werden. Bisherige Auswertverfahren wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, basieren zumeist auf der Ermittlung von Differenzen zwischen Punktwolken. Dabei werden bei scannenden Verfahren in zwei Epochen naturgemäß eben nicht exakt die identischen Rasterpunkte wiederholt gemessen – wenngleich dies aufgrund der inzwischen hohen Punktdichte immerhin näherungsweise zutrifft. Hinzu kommt, dass bei Deformationen nicht nur von Verformungen, sondern auch von globalen Verschiebungen ausgegangen werden muss: Verschiebt sich ein zu beobachtender, nicht signalisierter Objektpunkt, kann dieser ebenfalls nicht mit reinen Laserscanmethoden wiederholt angezielt und gemessen werden. Ein Ansatz hierzu liefert die Kombination aus Messungen zu signalisierten und nicht signalisierten Punkten, wie er in Kapitel 6 ausführlich vorgestellt wird.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zur klassischen Deformationsanalyse besteht in den Redundanzanteilen der Beobachtungen. Betrachtet man ein geodätisches (z. B. ein tachymetrisches, satellitengestütztes oder hybrides) Netz, besteht dieses aus einer Vielzahl von unabhängigen Beobachtungselementen von unterschiedlichen Netzknoten zu den Objektpunkten. Die daraus resultierende Redundanz des Netzes entspricht der Anzahl der überschüssigen und unabhängigen Beobachtungen abzüglich der für die eindeutige Lagerung erforderlichen Parameter und den unbekannten, zu schätzenden Punktkoordinaten und ist für die Beurteilung der inneren und äußeren Zuverlässigkeit des Netzes erforderlich. Nur mit einer hohen Redundanz können zuverlässige Aussagen über erzielte Punktgenauigkeiten getroffen und schließlich zwischen signifikanten und nicht signifikanten Punktveränderungen zwischen zwei Messepochen unterschieden werden.

Bei TLS-Netzen findet sich diese Redundanz oftmals in der Einpassung in das übergeordnete Festpunktfeld mit Hilfe von Passmarken. Die Punktwolke an sich besteht de facto aber lediglich aus Polarpunkten. Lediglich in den vom Scanner erfassten Überlappungsbereichen besteht das Potenzial einer Redundanz zu den Objektpunkten. Diese Überlappungsbereiche können und werden zwar in die Feinregistrierung mit einbezogen, die statistischen Maße hierfür werden aber nicht in der Deformationsauswertung berücksichtigt. Dafür bietet die hohe Punktdichte die Möglichkeit durch geeignete Filtermethoden das Messrauschen in einer lokalen Umgebung zu reduzieren – die Ableitung etwa eines mittleren Punktes liefert dabei ein stochastisches Maß für die Präzision des Messpunktes. Kombiniert mit weiteren Genauigkeitsmodellen zu den in Kapitel 4 erläuterten Fehlereinflüssen kann so ebenfalls eine Abschätzung der 3D-Punktgenauigkeit getroffen werden. Diese sind allerdings nicht mit der Redundanz im Sinne einer äußeren Genauigkeit gleich zu setzen und dienen somit eher als Netzprognosen.

Ein direkter Nachweis von Veränderungen der Punktwolke gelingt beim Laserscanning durch Punktvergleiche. Bei einem solchen Epochenvergleich können Punktbewegungen durchaus aufgedeckt werden und man kann von einer Bewegungsanalyse sprechen. Die Deformationsanalyse hingegen vergleicht nicht Punktwolken sondern Netze miteinander, da nur aus der Kenntnis aller Beobachtungen die Genauigkeit der Koordinaten abgeleitet und somit eine gesicherte Aussage über die Signifikanz der Veränderungen getroffen werden kann. Aussagekräftige und belastbare Resultate auch aus laserscanbasierten Überwachungsmessungen zu gewinnen, stellt demnach weiterhin einen Gegenstand der Forschung dar (Wunderlich u. a., 2016). Die Kombination von tachymetrischen und scannenden Verfahren (vgl. Abschnitt 2.4.3) zur hochpräzisen Messung von signalisierten Einzelpunkten einerseits und der schnellen, flächenhaften Erfassung von Punktwolken andererseits eröffnen dabei neue Möglichkeiten für die geodätische Deformationsmessung. Aktuelle Entwicklungen der hybriden Messtechnik kommen dieser Entwicklung stark entgegen (Wagner, 2017).

Kapitel 4

Instrumentelle Einflussfaktoren auf das Messergebnis

Nach einem einführenden Abschnitt über die Terminologie von Prüf-, Kalibrier- und Justierverfahren behandelt der Inhalt dieses Kapitels die grundlegenden instrumentellen Einflussfaktoren auf die Winkel- und Streckenmessung. Insbesondere die Fehlergrößen der reflektorlosen Distanzmesseinheit dienen hierbei als Entscheidungsgrundlage für die grundsätzliche Eignung des tachymetrischen Scannings für geodätische Überwachungsmessungen. Die Prüfergebnisse des eingesetzten Instrumentariums werden abschließend herangezogen, um die systematischen Auswirkungen von unberücksichtigten Korrekturen durch eine Simulation zu veranschaulichen. Diese visuellen Abschätzungen können bei der Analyse von vorliegenden Deformationen herangezogen werden, um Effekte etwaiger unerkannter Resteinflüsse von realen Deformationen zu trennen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

4.1 Terminologie

Das *Prüfen* der Messmittel bedeutet, festzustellen, ob ein Prüfgegenstand/Instrument die festgelegten Kriterien oder die im Datenblatt des Instrumentenherstellers beschriebenen Spezifikationen erfüllt. Regelmäßige Prüfroutinen sind daher ein wesentlicher Indikator, um Funktionsstörungen frühzeitig zu erkennen.

Eine *Kalibrierung* erfolgt in der Regel durch einen Vergleich der Messwerte mit Sollwerten, die von Messgeräten übergeordneter Genauigkeit und unter Laborbedingungen stammen. Dabei wird neben der Feststellung und Dokumentation der Abweichung des angezeigten Messwertes vom wahren Wert auch der Zusammenhang zwischen Eingangsgröße (der zu messenden physikalische Größe – z. B. eines Drehwinkels) und Ausgangsgröße (dem elektrischen Ausgangssignal des Messgeräts bzw. dessen angezeigtem Wert) ermittelt. Die Kenntnis über den funktionalen Zusammenhang dieser beiden Größen lässt eine mathematische Beschreibung zu, in der auch systematische Störeinflüsse modelliert werden können. So deutet eine mit der Entfernung linear zunehmende Abweichung von der Sollstrecke auf einen Maßstabsfehler hin, dessen Ursache in den Resteinflüssen der meteorologischen Korrektur liegen mag.

Das *Justieren* beschreibt schließlich alle Maßnahmen, mit denen erreicht wird, dass die Abweichungen der Messwertanzeige vom wahren Wert minimal werden. Im Idealfall sind nach der Justierung die verbleibenden Abweichungen vernachlässigbar klein und vom zufälligen Messrauschen nicht mehr zu trennen. Prinzipiell können solche Maßnahmen mit einem mechanischen Eingriff, z. B. durch eine Verstellung des Fadenkreuzes, verbunden sein. Insbesondere bei elektronischen Messinstrumenten werden heute jedoch zunehmend rechnerische Korrekturen mit Hilfe von geräteintern abgespeicherten Korrekturwerten oder Korrekturfunktionen zur Justierung herangezogen.

Eine weitere Möglichkeit zur Korrektur systematischer Gerätefehler kann auch durch geeignete, in der Regel symmetrische Messanordnungen erfolgen. Als Beispiel hierfür sei die Winkelmessung in zwei Fernrohlagern genannt. Allerdings existieren heute in der kinematischen Geodäsie durch das Aufkommen motorisierter und zielverfolgender Tachymeter zahlreiche Anwendungen, die auf eine Messung in zwei Fernrohlagern grundsätzlich verzichten müssen. Eine rechnerische Berücksichtigung der entsprechenden Korrekturen ist in diesen Fällen zwingend erforderlich.

4.2 Instrumentelle Einflussfaktoren auf die Winkelmessung

Auch bei sorgfältiger Anzielung durch den Beobachter oder eine automatische Zielerkennung sind zufällige und systematische Einflüsse auf die Winkelmessung nicht auszuschließen:

Subjektive Einstellfehler des Zieles, nicht vollständig erfassbare physikalische Zustände der Atmosphäre zwischen Instrument und Zielpunkt oder Vibrationen im Untergrund resultieren unter Umständen in zufälligen Messabweichungen vom wahren Messwert. Dieses Messrauschen ist grundsätzlich nicht vollständig eliminierbar, kann aber durch Mehrfachmessungen deutlich abgeschwächt werden (Deumlich u. Staiger, 2002).

Im Gegensatz hierzu sind systematische Abweichungen zu nennen, deren Vorkommen einer einseitigen Anhäufung von Messabweichungen entspricht. Auch hier können externe Einflüsse, wie beispielsweise die Refraktion oder vorhandene Lotabweichungen genannt werden. Als instrumentelle Einflussfaktoren sind aber konstruktionsbedingte Instrumentenfehler, wie der Indexfehler des Zweiachskompensators, sämtliche Achsenfehler, aber auch Exzentrizitäts- und Teilungsfehler, anzusehen.

4.2.1 Grundlegende Justierbedingungen eines Theodolits

An die Lage der Achsen, Fertigung der Teilkreise und Präzision des Einbaus werden bei Theodoliten hohe Anforderungen gestellt. Sind diese nicht ideal erfüllt, wird der Theodolit bestimmte Achsfehler aufweisen, die unter Umständen durch geeignete Messstrategien oder gerätebauliche Maßnahmen minimiert werden können. Tabelle 4.1 stellt die für Theodolite relevanten klassischen Achsfehler dar. Ein wichtiges Konzept für die Bestimmung und teilweise Behebung der Achsfehler ist hier die Winkelmessung in zwei Lagen. Dabei wird das Ziel nicht nur in normaler Fernrohrlage (Zenitwinkel 0-200 gon), sondern auch in 2. Lage mit Zenitwinkel zwischen 200 und 400 gon angezielt. Die meisten instrumentellen Fehler haben symmetrische Auswirkungen, so dass sie in den beiden Lagen mit unterschiedlichem Vorzeichen erscheinen und sich deren Auswirkung im Mittel selbst eliminiert.

Ein Stehachsfehler hingegen ist grundsätzlich nicht durch eine solche Messanordnung zu beheben. Bei instrumentellen Stehachsfehlern müssen die Geräte zur Reparatur ins Werk; operative Stehachsfehler (z. B. verursacht durch das schiefe Aufstellen des Instruments) können nur durch Sorgfalt und Kompensatoren gemindert werden. Ein Zweiachskompensator ist ein bauliches Hilfsmittel, womit die Schiefstellungen der Stehachse bestimmt und rechnerisch ausgeglichen werden kann. Dabei ist zu beachten, dass (analog zu Röhrenlibellen) Kompensatoren ebenfalls über einen Spielpunkt verfügen. Dieser als Einspiel- oder Kompensatorindexfehler bezeichnete Wert kann im Zuge einer Geräteprüfung ebenfalls durch Messung in zwei Lagen bestimmt werden. Heute sind anstelle von Kompensatoren üblicherweise biaxiale Neigungssensoren verbaut, deren Messwerte zur rechnerischen Korrektur der Sensorwerte genutzt werden.

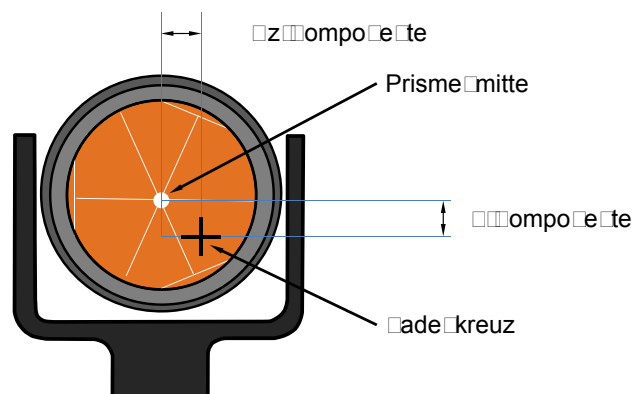
Des Weiteren sind für moderne Tachymeter noch weitere Achsfehler relevant, die sich wie Zielachs- und Indexfehler auf das Messergebnis auswirken können. Die Feinanzielung von unbewegten Reflektoren, aber auch die Verfolgung beweglicher Reflektoren erfolgt heute oftmals automatisiert. Bei einer solchen automatischen Zielerkennung entsteht neben der klassischen Zielachse eine weitere Zielachse. Die von Leica als ATR (engl. für *automatic target recognition*) bezeichneten Herangehensweise beruht zum Beispiel auf einer kamerabasierten Bildverarbeitungstechnik im Infrarotbereich. Dabei erfasst ein CCD-Chip innerhalb des Fernrohrkörpers, aber außerhalb des klassischen Strahlengangs den Infrarotanteil des reflektierten Messsignals. Die Position des Lichtpunktes bzw. der Schwerpunkt des Lichtflecks auf dem CCD-Sensor wird von einem Bildverarbeitungssystem im Sensorkoordinatensystem bestimmt.

Für die Umwandlung der gewonnenen Pixelkoordinaten in Ablagewerte bezüglich der horizontalen und vertikalen Richtung zur Zielachse ist die Kenntnis der inneren und äußeren Orientierung erforderlich. Abweichungen in der Bestimmung der Position des Lichtpunktes führen zu Fehlern in der Richtungsbestimmung und haben unterschiedliche Ursachen, die nicht kontrollierbar sind. Für den Anwender überprüfbar ist aber der ATR-Nullpunktfehler (Abb. 4.1) mit horizontalen und vertikalen Ablagefehlern zwischen der Ziellinie und der Mitte des CCD-Sensors. Auch für die Ausrichtung der berührungslos messenden Distanzmessachse entsteht durch einen weiteren Strahlengang eine neue Zielachse. Da dieser Achsfehler für die berührungslo-

Tabelle 4.1: Klassische Justierbedingungen eines Theodolits

Forderung	Fehler	Abhilfe
Achsen schneiden sich in einem Punkt	Achsexzentrizitäten	Messung in zwei Lagen
Teilkreise weisen eine gleichmäßige Unterteilung auf	Kreisteilungsfehler	Messung des gleichen Winkels an verschiedenen Stellen des Teilkreises (Verstellung des Teilkreises zwischen den Sätzen)
Kippachs- und Stehachslagerung konstant im Raum und entspricht der idealen Drehachse	(sekundäre Exzentrizitäten) Tummelfehler	Wiederholungsmessungen, Instrument bei 0 und um 200 gon verstellt aufbauen
$VV \perp$ Limbusebene (Hz-Kreis)	instrumenteller Stehachsfehler	nicht behebbar
$VV \perp$ LL bei rektifizierter Libelle	operativer Stehachsfehler v	sorgfältige Aufstellung, Kompensator
VV geht durch den Mittelpunkt des Hz-Kreises, KK geht durch den Mittelpunkt des V-Kreises	Exzentrizitäten	Ablesung an zwei gegenüberliegenden Teilkreisstellen, Messung in 2 Lagen
Achsen stehen paarweise aufeinander senkrecht, $ZZ \perp KK$, $KK \perp VV$	Zielachsfehler c , Kippachsfehler i ,	Messung in 2 Lagen oder rechnerische Korrektur nach Bestimmung von Kalibrierwerten
Verbindung 100 gon - 300 gon am V-Kreis $\parallel$ zu ZZ, Ableseindex $\perp$ VV Geometrische Beziehung zwischen Sensorsystem und Zielachse sind bekannt	Höhenindexfehler ζ ATR-Nullpunktfehler mit Hz- und V-Komponente	Einspielen der Höhenindexlibelle, Messung in 2 Lagen, Kompensatoren Kalibrierung durch Vergleich mit manueller Anzielung
Weitere Strahlengänge verlaufen koaxial zu ZZ	Divergenzen	Bestimmung an Zieltafel

se Messung von besonderer Bedeutung ist, wird hierauf im folgenden Abschnitt 4.2.2 detailliert eingegangen.

**Abbildung 4.1:** Schematische Darstellung des ATR-Nullpunktfehlers

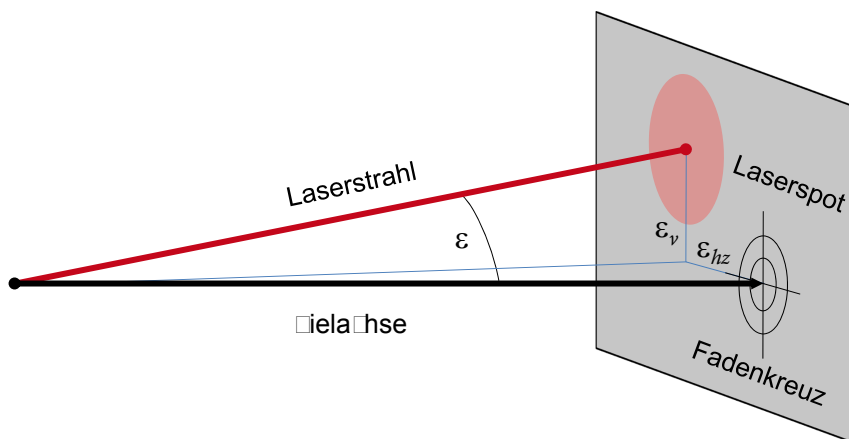
Ansätze zur Bestimmung von Ziel-, Kipp- und Indexfehler aus einer Minimalkonfiguration oder aus einer überbestimmten Konfiguration liefert (Neitzel, 2006). Gängige Feldprüfverfahren sind aber vornehmlich im dritten Teil der ISO 17123 (ISO, 2001a) geregelt. Für die Bestimmung von Korrekturwerten für die Achsfehler – und seit Einführung der automatischen Zielerkennung auch für deren Nullpunktfehler – stehen für Tachymeter mit Servomotoren menügesteuerte Messroutinen zur Verfügung. Die Instrumentenfehler können sich mit der Zeit und mit der Temperatur ändern. Deshalb wird empfohlen, vor dem Ersteinsatz, vor Präzisionsmessungen, nach längeren Transporten, nach längeren Arbeitsperioden, nach längerer Lagerungszeit und bei Temperaturunterschieden von mehr als 20°C die Bestimmung der Instrumentenfehler durchzuführen. Tabelle 4.2 fasst exemplarisch die mehrfach ermittelten Achsfehler von zwei Tachymetern der Baureihe TCRA 1101+ von Leica zusammen.

Tabelle 4.2: Zusammenstellung ermittelter Achsfehler (alle Angaben in mgon, auf Basis von 15 Wiederholungsmessungen)

Achsfehler	TCRA1101+ (Nr. 56)	TCRA1101+ (Nr. 59)
Zielachsfehler c	0.9 ($\sigma = 0.12$)	0.8 ($\sigma = 0.24$)
Kippachsfehler i	0.5 ($\sigma = 0.18$)	-3.2 ($\sigma = 0.10$)
Höhenindexfehler ζ	-3.8 ($\sigma = 0.26$)	-10.6 ($\sigma = 0.19$)
Kompensatorindexfehler l	0.3 ($\sigma = 0.05$)	-0.6 ($\sigma = 0.04$)
Kompensatorindexfehler q	0.0 ($\sigma = 0.04$)	-1.2 ($\sigma = 0.06$)
ATR-Nullpunktfehler (Hz-Komponente)	22.1 ($\sigma = 0.09$)	0.6 ($\sigma = 0.17$)
ATR-Nullpunktfehler (V-Komponente)	0.6 ($\sigma = 0.12$)	1.1 ($\sigma = 0.10$)
Diskrepanzwinkel ε_{hz}	0.8 ($\sigma = 0.01$)	0.4 ($\sigma = 0.02$)
Diskrepanzwinkel ε_v	1.7 ($\sigma = 0.01$)	0.6 ($\sigma = 0.01$)

4.2.2 Ausrichtungsfehler der berührungslos messenden Distanzmessachse

Bestandteil moderner Tachymeter und Totalstationen ist eine reflektorlos messende EDM-Einheit, deren Laserstrahl koaxial zur Fernrohrziellinie angeordnet ist und ebenfalls aus der Objektivöffnung austritt. Eine Bedingung für diese Distanzmessachse ist die identische Ausrichtung mit der optischen Zielachse. Äußere Einflüsse wie Schock oder starke Temperaturunterschiede können jedoch zu Verstellungen der Ausrichtung des (meist) roten Messstrahls gegenüber der Zielachse führen (Leica Geosystems, 2003). In diesem Fall lässt sich die Fehlausrichtung, wie aus Abbildung 4.2 ersichtlich, durch einen räumlichen Diskrepanzwinkel ε ausdrücken, der sich sinnvollerweise in eine horizontale ε_{hz} und vertikale ε_v Komponente aufschlüsseln lässt.

**Abbildung 4.2:** Schematische Darstellung des Diskrepanzwinkels

Dabei wirkt die Horizontalkomponente ε_{hz} wie ein Zielachs- und die Vertikalkomponente ε_v wie ein Indexfehler. Sind diese Ausrichtungsfehler vorhanden, werden den Winkelwerten trotz sorgfältiger Anzielung mit dem Fadenkreuz nicht zutreffende Streckenmesswerte zugeordnet und dies führt daher zu einer von der Objektgeometrie abhängigen systematischen Messabweichung der Zielpunktcoordinate. Abbildung 4.3 stellt eine solche Systematik am Beispiel der in Kapitel 6 vorgestellten Brückenüberwachung dar: Bei der Betrachtung der Höhenkomponente der Brückenunterseite wird deutlich, dass bei größer werdenden Einfallswinkeln die Zuordnung der Distanzmessung zu der für die Winkelmessung herangezogenen Ausrichtung der optischen Zielachse (Fadenkreuz) in einem erhöhten Fehleranteil der Höhenbestimmung mündet.

Die Ausrichtung der Distanzmessachse ist daher für hochgenaue Messungen regelmäßig zu prüfen oder, falls möglich, durch einen mechanischen Eingriff zu justieren. Der Hersteller sieht zur Überprüfung die Nutzung einer Zieltafel (vgl. Abbildung 4.4, links) vor. Bestrahlt der Messfleck das Strichkreuz, so ist die erreichbare Justiergenauigkeit vorhanden. Liegt dagegen der Lichtfleck außerhalb des Strichkreuzes der Tafel, so ist die Strahlrichtung zu justieren. Eine solche Umsetzung hat den Vorteil, dass die Überprüfung schnell durchgeführt werden kann und somit auch als Feldprüfverfahren geeignet ist. Allerdings beinhaltet sie eine subjektive

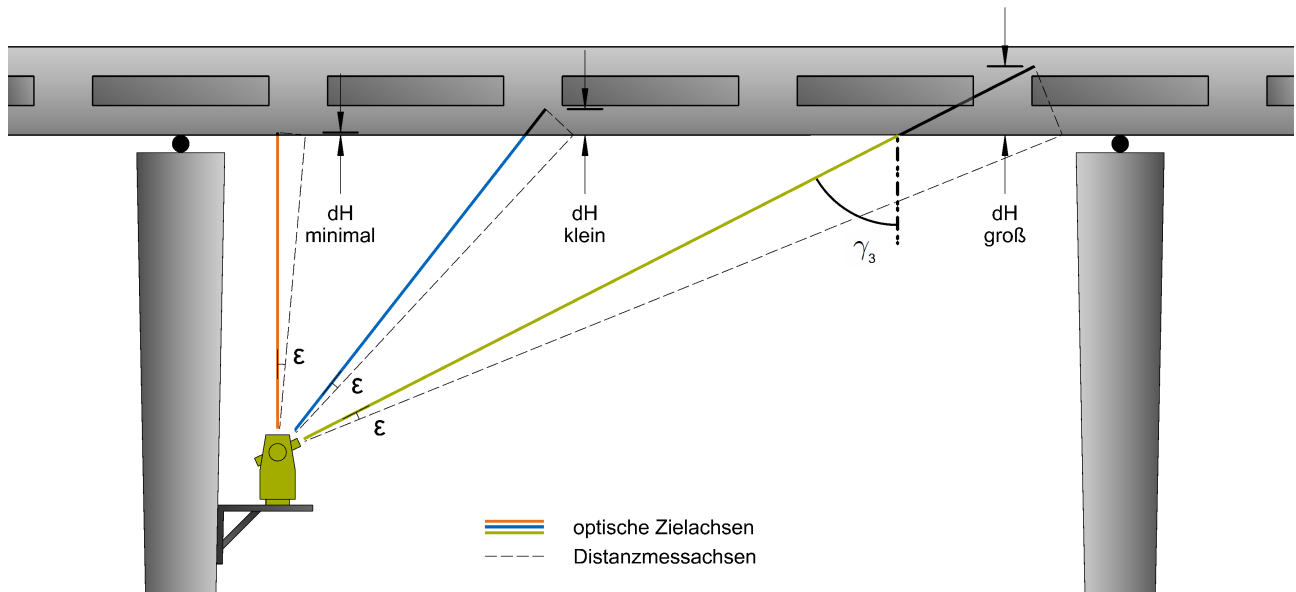


Abbildung 4.3: Auswirkungen des vertikalen Diskrepanzwinkels auf die Höhenbestimmung einer Deckenunterseite

Komponente zur Beurteilung der Laserfleckposition und ist daher für eine exakte Justierung nur bedingt geeignet.

Als einfaches, aber objektives Verfahren zur Überprüfung der Achsidentität bieten sich Messungen auf eine vierseitige Pyramide an. Die Pyramidenspitze muss möglichst genau auf das Prüfinstrument weisen (Joeckel u. a., 2008). Zielt man mit der optischen Achse die Pyramidenspitze an, sollte sich für die Distanzmessung ein Minimalwert ergeben. Liegt jedoch eine Diskrepanz zwischen den beiden Achsen vor, so ist der Distanzmesstrahl so lange horizontal und vertikal zu verschwenken, bis dieses Minimum gefunden ist. Eine effiziente technische Umsetzung wäre durch einen automatisierten Scanvorgang, bei dem die Pyramide mit höchster Auflösung im Umfeld der Pyramidenspitze erfasst würde, zu realisieren. Wenn auch in dieser Punktwolke die Pyramidenspitze nicht enthalten sein dürfte, so könnte der gesuchte Punkt im Zuge einer Ausgleichsrechnung über einen bestangepassten Körper ermittelt werden. Da jedoch die Genauigkeit dieser Methode vom Divergenzwinkel der Messkeule sowie der Steilheit der Pyramide abhängt, schlägt (Joeckel u. a., 2008) alternativ Messungen auf eine horizontal und vertikal drehbar gelagerte Zieltafel vor. Fallen beide Achsen zusammen, so werden trotz Drehung und Verkippung der Zieltafel (bis auf das Messrauschen) weitestgehend konstante Messwerte registriert. Ist dies nicht der Fall, weichen die Distanzwerte mit zunehmenden Verstellwinkeln vom Originalwert ab. Aus dieser Abweichung und den Verdrehungswinkeln lässt sich schließlich ein Betrag für die Fehlausrichtung ermitteln. In Praxisversuchen hat sich diese Methodik jedoch als nicht zuverlässig erwiesen.

Die Herausforderung beider Verfahren liegt in der Notwendigkeit, zahlreiche Einzelmessungen durchzuführen. Um diesen Prüfaufwand auch zeitlich zu minimieren, wurde im Rahmen einer Studienarbeit (Marstatt, 2007) ein bildmesstechnisches Verfahren entwickelt, welches die simultane Bestimmung der horizontalen und vertikalen Komponente des Diskrepanzwinkels in einem entzerrten Digitalbild ermöglicht. Unter Laborbedingungen durchgeführte Kalibriermessungen mit kurzen Distanzen, um Refraktionseinflüsse zu minimieren, ergaben für dieses Verfahren eine Präzision im Bereich von $1/100$ mgon (siehe Tabelle 4.2).

Auch Neitzel u. Johannes (2009) empfehlen für die Korrektur aus praktischen Gründen eine mechanische Justierung des Laserstrahls. Allerdings ist anzumerken, dass sich eine manuelle Korrektur über Stellschrauben aufgrund der limitierten Sensitivität als schwierig erweist und eine rekursive Überprüfung und Nachjustierung erfordert. Zudem sind derartige Justierschrauben nicht bei allen Tachymetern integriert und somit ist die Justierung nur für einzelne Baureihen sinnvoll umsetzbar. Für eine hochpräzise Zuordnung von Winkelmesswerten und reflektorloser Streckenmessung ist daher eine rechnerische Berücksichtigung anzustreben (vgl. Kapitel 6.2.2).

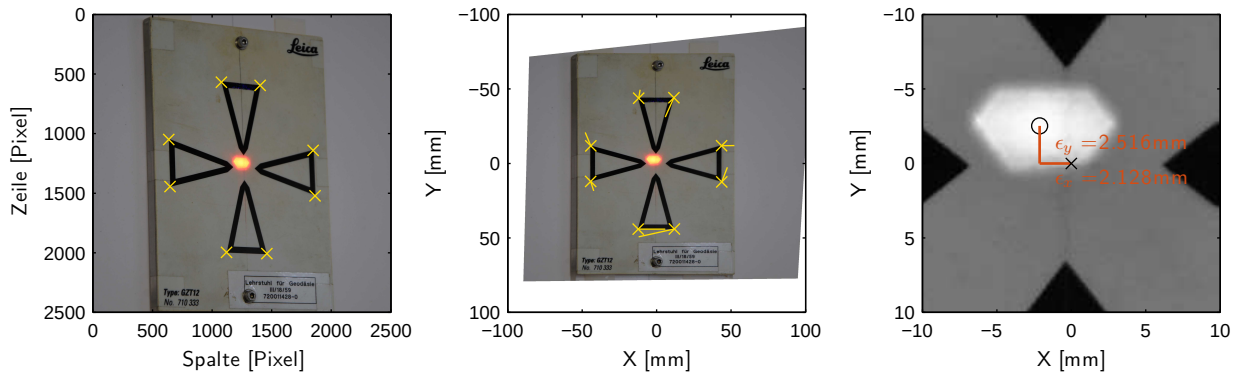


Abbildung 4.4: Bildmesstechnische Bestimmung des Diskrepanzwinkels. Bildaufnahme mit Passpunkten (links), entzerrtes Foto (Mitte), Bestimmung der metrischen Ablagewerte (rechts). Anmerkung: der große Offset in dieser Abbildung dient der Visualisierung und entspricht nicht dem tatsächlichen Diskrepanzwinkel.

4.2.3 Vektorielle Darstellung der Winkelabweichungen

Durch Einführung orthonormaler Dreieine mit Ursprung im Achsenschnittpunkt und Anwendung von Rotationstransformationen kann der Zusammenhang zwischen Achsfehlern eines polar messenden Systems und deren Einfluss auf die Richtungsmessung dargestellt werden. Eine vektorielle Darstellung der Einflüsse von Ziel- und Kippachsfehlern auf die Winkelmessung wird in (Stahlberg, 1997) beschrieben. Zur Veranschaulichung der Achsfehler gelten, wie aus Abbildung 4.5 ersichtlich, zunächst für die Ziel-, Kipp- und die vertikale Stehachse im lokalen, topozentrischen Koordinatensystem folgende Einheitsvektoren

$$\vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} \cos a \sin z \\ \sin a \sin z \\ \cos z \end{pmatrix}; \quad \vec{r}_{KK} = \begin{pmatrix} \sin a \\ -\cos a \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{r}_{VV} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

zu einem Zielpunkt, welcher unter der zugehörigen Horizontalrichtung a und dem Zenitwinkel z zu beobachten ist. Analog zu $\vec{r}_{ZZ}$ ergibt sich zudem für die Horizontalrichtung des operativen Stehachsfehlers a_ν die zugehörige vektorielle Schreibweise

$$\vec{r}_{a_\nu} = \begin{pmatrix} \cos a_\nu \\ \sin a_\nu \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Die Beträge des Kippachsfehlers i , des Zielachsfehlers c sowie des Höhenindexfehlers ζ sind als Fehlergrößen an der Einheitskugel eingezeichnet (aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Eintragung des Stehachsfehlers ν verzichtet).

Die Vektoren $\vec{d}_i$, $\vec{d}_c$, $\vec{d}_\zeta$ und $\vec{d}_\nu$ entsprechen für kleine Drehwinkel den Richtungseinheitsvektoren der Drehachsen, um die, bedingt durch die entsprechenden Fehlergrößen, die korrekte Zielrichtung $\vec{r}_{ZZ}$ verfälscht wird. Die den Höhenindexfehler beschreibende Drehachse $\vec{d}_\zeta$ entspricht der Kippachse, die übrigen Drehachsen ergeben sich aus den in Tabelle 4.1 aufgeführten Orthogonalitätsbedingungen durch Kreuzprodukte der Theodolitachsen aus (4.1) bzw. der Richtungsachse des operativen Stahachsfehlers aus (4.2) mit der Zielachse zu

$$\begin{aligned}\vec{d}_c &= \vec{r}_{KK} \times \vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} -\cos a \cos z \\ -\sin a \cos z \\ \sin z \end{pmatrix}; \\ \vec{d}_i &= \vec{r}_{KK} \times \vec{r}_{VV} = \begin{pmatrix} -\cos a \\ -\sin a \\ 0 \end{pmatrix}; \\ \vec{d}_\nu &= \vec{r}_{VV} \times \vec{r}_{a_\nu} = \begin{pmatrix} -\sin a_\nu \\ \cos a_\nu \\ 0 \end{pmatrix}.\end{aligned}\tag{4.3}$$

Die Gesamtabweichung $\vec{dr}$ der Raumrichtung lässt sich aus den Einzeldrehungen um die Drehachsen aufbauen

$$\vec{dr} = c(\vec{d}_c \times \vec{r}_{ZZ}) + i(\vec{d}_i \times \vec{r}_{ZZ}) + \zeta(\vec{d}_\zeta \times \vec{r}_{ZZ}) + \nu(\vec{d}_\nu \times \vec{r}_{ZZ})\tag{4.4}$$

Dabei stellen die in (4.4) dargestellten Kreuzprodukte mit der Zielachse die Wirkungsrichtungen der einzelnen Achsfehler dar. Diese lauten

$$\vec{d}_c \times \vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} -\sin a \\ \cos a \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{d}_i \times \vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} -\sin a \cos z \\ \cos a \cos z \\ 0 \end{pmatrix};\tag{4.5}$$

$$\vec{d}_\zeta \times \vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} -\cos a \cos z \\ -\sin a \cos z \\ \sin z \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{d}_\nu \times \vec{r}_{ZZ} = \begin{pmatrix} \cos a_\nu \cos z \\ \sin a_\nu \cos z \\ -\cos(a_\nu - a) \sin z \end{pmatrix}$$

und führen eingesetzt in (4.4) zu

$$\vec{dr} = (c + i \cos z) \begin{pmatrix} -\sin a \\ \cos a \\ 0 \end{pmatrix} + \zeta \begin{pmatrix} -\cos a \cos z \\ -\sin a \cos z \\ \sin z \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} \cos a_\nu \cos z \\ \sin a_\nu \cos z \\ -\cos(a_\nu - a) \sin z \end{pmatrix}.\tag{4.6}$$

Für die endgültige Ausrichtung der optischen Zielachse gilt schließlich der Einheitsvektor

$$\vec{d}_{opt} = \frac{\vec{d}_{ZZ} + \vec{dr}}{|\vec{d}_{ZZ} + \vec{dr}|},\tag{4.7}$$

welcher aber mit Verweis auf Kapitel 4.2.2 nicht zwingend mit der Distanzmessachse zusammenfällt. Bei vorliegendem Ausrichtungsfehler der berührungslos arbeitenden Distanzmessachse gegenüber der optischen Zielachse sind die zusätzlichen Abweichungskomponenten ε_{hz} und ε_v des Diskrepanzwinkels wie in Abbildung

4.5 veranschaulicht zu berücksichtigen. Da sich diese, wie bereits erläutert, wie ein zusätzlicher Zielachs- und ein zusätzlicher Indexfehler auswirken, ergibt sich für die Ausrichtungsabweichung $\vec{dr}_{dist}$ analog zu (4.6) eine Darstellung der Form

$$\vec{dr}_{dist} = (c + \varepsilon_{hz} + i \cos z) \begin{pmatrix} -\sin a \\ \cos a \\ 0 \end{pmatrix} + (\zeta + \varepsilon_v) \begin{pmatrix} -\cos a \cos z \\ -\sin a \cos z \\ \sin z \end{pmatrix} + \nu \begin{pmatrix} \cos a_\nu \cos z \\ \sin a_\nu \cos z \\ -\cos(a_\nu - a) \sin z \end{pmatrix}. \quad (4.8)$$

Diese Darstellung wird nochmals in Abschnitt 4.3.6 aufgegriffen, um die Auswirkung von fehlerbehafteten Winkel- und Streckenmessungen bei flächenhaften Deformationsmessungen zu simulieren.

4.3 Instrumentelle Einflussfaktoren auf die Distanzmessung

Die Distanzmessung stellt ein zentrales Element der dreidimensionalen Vermessung dar und unterliegt insbesondere im Bereich der Überwachungsmessung hohen Genauigkeitsanforderungen (Ramseier, 2004). Moderne Tachymetersysteme sind (unter normalen, klaren Sichtbedingungen) in der Lage, bei der Infrarotmessung auf Reflektoren eine absolute Streckenmessgenauigkeit von 0,6 mm + 1 ppm bis 2 mm + 2 ppm zu realisieren (vgl. Tabelle 4.3). Als reines Distanzmessgerät für den mittleren und langen Messbereich ist nach wie vor das Mekometer 5000 mit 0,2 mm + 0,2 ppm als eines der genauesten Instrumente für diesen Zweck anzusehen (Wasmeier, 2012).

Tabelle 4.3: EDM-Spezifikationen verschiedener Instrumente (Auswahl, Angaben laut Hersteller, Messunsicherheit nach ISO 17123-4 (ISO, 2001b))

	Leica TM30	Trimble S8	Topcon MS05A	Mekometer 5000
Infrarotmessung auf Prismen				
Präzision + Maßstab	0,6 mm + 1 ppm	0,8 mm + 1 ppm	0,8 mm + 1 ppm	0,2 mm + 0,2 ppm
Reichweite	3500 m	3000 m	3500 m	8000 m
Reflektorlos auf Oberflächen				
Präzision + Maßstab	2 mm + 2 ppm	2 mm + 2 ppm	1 mm + 1 ppm	nicht möglich
Reichweite	1000 m	1300 m	100 m	

Allerdings bestehen aus Sicht europäischer Prüfinstitutionen inzwischen Forderungen, nach denen Strecken mit einer Länge von bis zu einem Kilometer mit einer Genauigkeit von 0,1 bis 0,2 mm bestimmt werden sollen (Schwarz, 2012). Für den Nahbereich bis 10 m bedeutet dies eine Distanzmessgenauigkeit von 1 bis 2 μm und wird für industrielle Anwendungen durch Lasertracker abzudecken sein. Für große Distanzen hingegen sind für die Erreichbarkeit dieser Ziele alle relevanten Einflussgrößen und deren Auswirkungen sorgfältigst zu berücksichtigen. Schwarz (2012) erörtert die erforderlichen Maßnahmen, um diesem Ziel näher zu gelangen. Dabei werden neben instrumentellen Faktoren auch die Anforderungen an den Reflektor und die Atmosphäre, welche der Messstrahl durchläuft, diskutiert. So besteht zum Beispiel die Notwendigkeit, die mittlere Lufttemperatur entlang des Lichtsignals auf 0,1 K zu bestimmen, um den Fehler des atmosphärischen Einflusses (Laufzeitverzögerungen und Refraktion) auf unter 0,1 ppm zu reduzieren.

Aufgrund deutlich geringerer Genauigkeitserwartungen und nicht zuletzt wegen der materialabhängig beschränkten Reichweite stellen atmosphärische Einflüsse für reflektorlose Distanzmessungen bei herkömmlicher Berücksichtigung von Umgebungstemperatur und Luftdruck hingegen keine wesentliche Beeinträchtigung dar (s. a. Kapitel 5.1.1). Für eine Beurteilung berührungslos messender EDM-Systeme verbleiben aber mit Ausnahme der Phaseninhomogenitäten die klassischen EDM-Fehler

- Maßstabsfehler,
- Nullpunktkorrektur und
- Zyklischer Phasenfehler.

Entsprechende Vorschriften für Feldprüfverfahren zur Bestimmung der Fehler bzw. Genauigkeitsuntersuchung des elektrooptischen Distanzmessers sind in DIN 18723-6 resp. ISO 17123-4 geregelt. Darauf aufbauend lassen sich auch das Auflösungsvermögen und die Präzision ableiten, die als wichtige Kenngrößen für die Entscheidung über das einzusetzende Messverfahren anzusehen sind.

4.3.1 Maßstabsfehler

Eine trotz berücksichtigter meteorologischer Korrektur verbleibende streckenproportionale Abweichung von der Sollstrecke stellt ein instrumentell bedingter Maßstabsfehler dar. Dieser kann sowohl beim Pulsmessverfahren als auch beim Phasenvergleichsverfahren in Erscheinung treten, da beim Pulsmessverfahren die Quarzfrequenz zur Zeitmessung und die Frequenz beim Phasenvergleichsverfahren zur Modulation der Messwelle benötigt werden. Die Frequenzabweichungen der einzelnen EDM-Geräte sind zwar in der Regel gering (1 bis 3 ppm), betriebszeitabhängig und temperaturbedingt treten jedoch Größenwerte auf, die für präzise Streckenmessungen auch im Nahbereich nicht außer acht gelassen werden dürfen.

Sofern möglich, wird ein Maßstabsfehler bei Phasenmessern durch den direkten Abgriff und Messung der Modulationsfrequenz bestimmt, indem der ermittelte Wert einem Frequenzzähler übergeordneter Genauigkeit gegenüber gestellt wird. Oftmals zeigen sich hier auch Einlaufeffekte, die auf Faktoren wie die Batteriespannung, die Temperatur und die Alterung des Quarzes zurückzuführen sind. Bei modernen Totalstationen ist ein solcher Frequenzabgriff zumeist nicht mehr möglich. In diesem Fall muss ein Maßstabsfehler auf einer Eichstrecke oder Komparatorbahn bestimmt oder im Zuge einer Netzausgleichung geschätzt werden.

4.3.2 Nullpunktskorrektur

Die Nullpunktskorrektur wird herkömmlicherweise bei einem System bestehend aus EDM-Gerät und Reflektor bestimmt. Sie berücksichtigt die Differenz zwischen der äußeren Messstrecke (Zielgröße) und dem inneren Lichtweg im Instrument (z. B. interne Eichstrecke) und im Reflektor – kurz, den Unterschied zwischen mechanischen und elektronischen Nullpunkten. Grundsätzlich entfällt die Additionskonstante des Reflektors bei berührungslosen Distanzmessungen, wenngleich Ingensand u. a. (2003) von nachvollziehbaren Eindringtiefen des Lasers in unterschiedliche Materialien wie z. B. Styropor oder Marmor berichten.

Zur Bestimmung der Nullpunktskorrektur können lineare Ansätze mit bekannten (Kalibrierstrecke) oder unbekannten Teilstrecken angewendet werden. Die Messung der Teilstrecken erfolgt dabei in allen Kombinationen. Geschieht dies über den gesamten Arbeitsbereich des Gerätes, so spricht man von einer Additionskonstanten (u. U. mit einem entfernungsabhängigen Anteil). Die Auswirkung dieser additiven Komponente bei der Streckenmessung ist in Abbildung 4.6 für die Höhenbestimmung einer Deckenunterseite dargestellt.

Für bis zu sieben Teilstrecken sind in (Joeckel u. a., 2008) geschlossene Formeln zur Bestimmung der Nullpunktskorrektur zu entnehmen. Ansonsten können Teilstrecken und Nullpunktskorrektur im Sinne einer Ausgleichung geschätzt werden. Letzteres gilt auch für reine Streckennetze ohne lineare Anlage einer Teststrecke. Da Maßstab und Nullpunktskorrektur aber nicht simultan bestimmt werden können, ist zunächst der Maßstab im Labor oder auf einer Komparatorbahn zu bestimmen.

4.3.3 Zyklischer Phasenfehler

Der zyklische Phasenfehler ist ein periodisch auftretender Fehler, der durch die Überlagerung von Teilen des Sende- bzw. Referenzsignals direkt auf das im Empfänger empfangene Streckensignal hervorgerufen wird und sich mit einem ganzzahlig Vielfachen der Modulationswellenlänge des Feinmaßstabes λ wiederholt (Joeckel u. a., 2008). Die Ursachen für eine solche Überlagerung sind in der Bauweise elektrooptischer Distanzmessgeräte begründet und resultieren aus einer nicht vollständigen Abschirmung zwischen Sende- und Empfangseinheit. Zwischen beiden Einheiten kann es aufgrund der kompakten Bauweise zu einer teilweisen Signalüber-

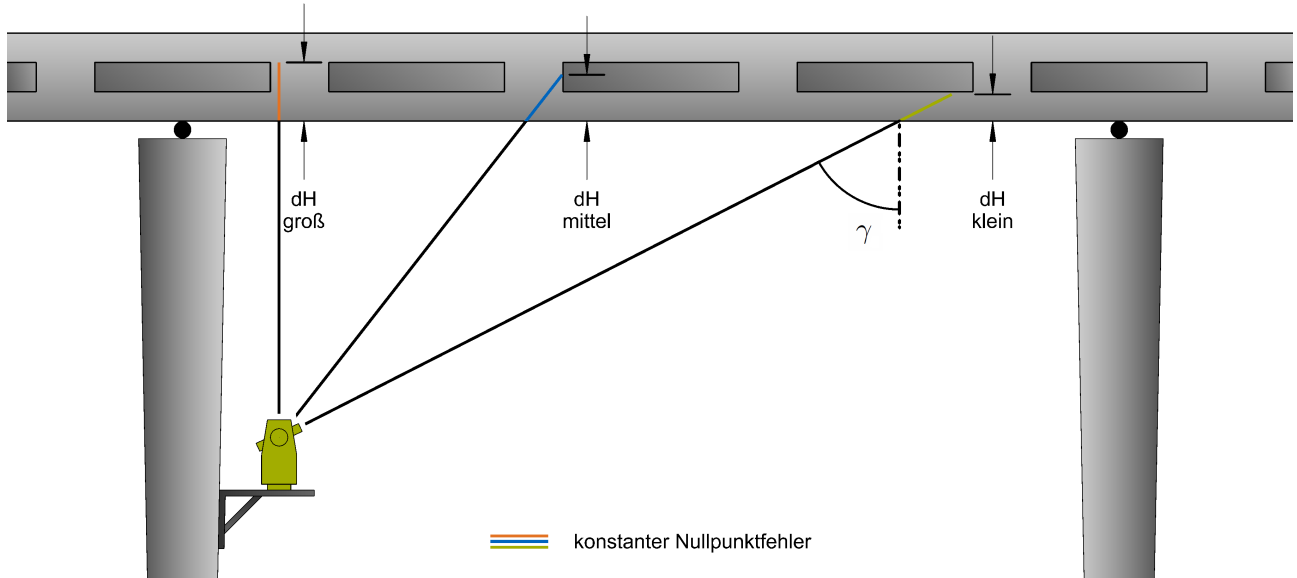


Abbildung 4.6: Auswirkungen eines Nullpunktfehlers auf die Höhenbestimmung einer Deckenunterseite

lagerung durch elektrisches Übersprechen, zum Beispiel durch die Nutzung gemeinsamer Kabelverbindungen zur Stromversorgung, sowie durch optisches Übersprechen erfolgen. Letzteres kann durch die Verwendung eines Lichtwellenleiters (Glasfaserkabels) zur Weiterleitung des Referenzsignals von der Sendediode zur Photodiode der Empfangseinheit zwar minimiert werden, dennoch kann insbesondere bei coaxial angeordneten Strahlengängen der Sende- und Empfangsoptik streuende Infrarotstrahlung unerwünscht, wenn auch geringe Signalüberlagerungen verursachen.

Die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers erfolgt auf Komparatorstrecken, wobei sich die beobachteten Abweichungen d_i zwischen den aus Interferometermessungen bekannten Werten s_i und den gemessenen Strecken s'_i durch eine ausgleichende Sinusfunktion mit der Periode des Feinmaßstabes beschreiben lassen:

$$d_i = (s_i - s_0) - (s'_i - s'_0) = b + a \cdot \sin \left[(s'_i - d\lambda_0) \cdot \frac{2\pi}{U} \right]. \quad (4.9)$$

Dabei werden Amplitude a und Phasenverschiebung $d\lambda_0$ sowie ein vertikaler Offset b (entspricht einer Nullpunktkorrektur) der Schwingung als Unbekannte zugelassen. In Folge der Anwendung eines Additionstheorems sowie einer Substitution kann das bestehende Modell durch die nichtlinearen Verbesserungsgleichungen

$$v_{s'_i} = b + u_1 \cdot \sin \left(s'_i \frac{2\pi}{U} \right) - u_2 \cdot \cos \left(s'_i \frac{2\pi}{U} \right) - d_i \quad (4.10)$$

beschrieben werden. Die darin enthaltenen Substitutionen zweier Hilfsunbekannter lauten

$$u_1 = a \cdot \cos \left(d\lambda_0 \frac{2\pi}{U} \right) \quad \text{und} \quad u_2 = a \cdot \sin \left(d\lambda_0 \frac{2\pi}{U} \right) \quad (4.11)$$

mit

$$a = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad \text{und} \quad d\lambda_0 = \arctan \left(\frac{u_2}{u_1} \right) \cdot \frac{U}{2\pi} \quad (4.12)$$

Diese Darstellung entspricht der Form $\vec{v} = A \cdot \hat{x} - \vec{1}$ und lässt sich nach der Methode der kleinsten Quadrate unter der Annahme unkorrelierter und gleichgenauer Beobachtungen schätzen. Neben bautechnischen

Eingriffen zur Verminderung des elektrischen und optischen Übersprechens kann der Fehler mit (4.10) rechnerisch kompensiert werden.

Abbildung 4.7 zeigt eine solche Auswertung für die reflektorlose EDM-Einheit eines Tachymeters der Baureihe TCRA 1101+ von Leica nach Beseitigung des Maßstabsfehlers und der Nullpunktkorrektur. Die Durchführung der Messreihe erfolgte auf einer Komparatorbahn mit interferometrisch gemessenen Sollstrecken über eine Länge von 12 m. Der Messpunktabstand beträgt 5 cm, wobei jede Position zehn Mal berührungslos gemessen wurde, um das Messrauschen zu minimieren. Die ermittelte Amplitude von 0,4 mm und die Periodizität verdeutlicht, dass der zyklische Phasenfehler zwar deutlich unterhalb der spezifizierten Genauigkeit liegt, aber nach wie vor eine signifikante Fehlergröße darstellt und für hochpräzise Anwendungen zu berücksichtigen ist.

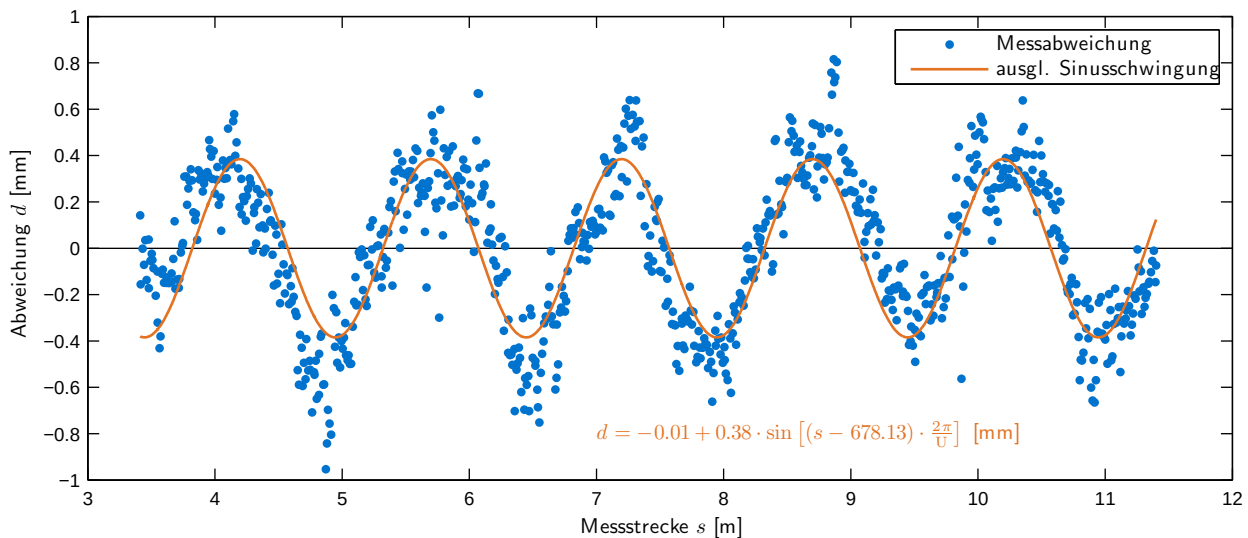


Abbildung 4.7: Zyklischer Phasenfehler der reflektorlosen EDM-Einheit des Leica TCRA1101plus im Nahbereich

Weitere zyklische Fehlerkomponenten können durch Reflexionen an Linsen, Sende- und Empfangsdioden hervorgerufen werden und erweitern das Modell um die Überlagerung mehrerer solcher Sinusschwingungen, deren Periode ebenfalls Unterteilungen des Feinmaßstabes aufweisen können. Diese weisen sich durch eine stark abgeschwächte Amplitude aus, können jedoch bei Bedarf mit Hilfe von Fourier-Reihen bestimmt werden.

4.3.4 Auflösungsvermögen und Präzision

Das Auflösungsvermögen eines Messgerätes ist die Fähigkeit, zwei eng nebeneinander liegende Messwerte als verschieden zu erkennen – bei Distanzmessungen entspricht dies der minimalen Streckendifferenz zwischen zwei benachbarten Messpunkten. Das tatsächliche Auflösungsvermögen entspricht dabei nicht zwangsläufig der Anzeigegenauigkeit (der kleinsten Zählinheit) des Gerätes. Von daher kann es lohnenswert sein, zu prüfen, ob die Anzeigegenauigkeit künstlich erhöht werden kann. Im Falle der untersuchten Baureihe (TCRA1101+) werden für Distanzmessungen offiziell drei Nachkommastellen ausgegeben, was bei einer spezifizierten absoluten Distanzmessgenauigkeit von 2 mm + 2 ppm auch sinnvoll erscheint. Über eine *on-board*-Applikationen zur Tachymetersteuerung kann in diesem Fall jedoch die Ausgabe einer vierten Nachkommastelle umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang kann zudem überprüft werden, ob eine Mittelung von Mehrfachmessungen einen Zugewinn für die Reduktion des Messrauschens darstellt. Als Kenngröße hierfür dient die Präzision als Maß für die Reproduzierbarkeit desselben Wertes unter den gegebenen Bedingungen.

Für die Bestimmung von Auflösungsvermögen und Präzision wird eine eigens für die reflektorlose Distanzmessung vorgesehene Zieltafel (s. Abb. 4.2) auf einem verstellbaren Schlitten einer optischen Bank montiert. Der Schlitten gewährleistet eine Verschiebung der Tafel um definierte Beträge und ermöglicht somit

den Vergleich mit einem Sollmaß übergeordneter Genauigkeit. Die Verstellbeträge betragen dabei für die mm-anzeigenden Geräte 0,1 mm und es wurden 25 Stellpositionen eingestellt. Die Zieltafel wurde aus zwei unterschiedlichen Entfernungen (12 und 26 m) von beiden Tachymetern pro Position zehnfach angemessen.

Abbildung 4.8 zeigt für beide Instrumente die gesamte Messreihe bestehend aus jeweils 250 Messwerten. Die Charakteristik der um den Sollwert streuenden Residuen lässt erkennen, dass die Auflösung schlechter ist als 1/10 mm. Eine Berechnung des Auflösungsvermögens auf Basis der Fehlerformel für Doppelmessungen ergibt die in Tabelle 4.4 wiedergegebenen Werte. Dabei sind auch die Resultate im Falle einer Mittelwertbildung von je 10 Einzelmessungen an den 25 Stellpositionen gelistet. Dabei wird deutlich, dass eine solche Mittelwertbildung nur einen geringfügigen Vorteil auf eine verbesserte Auflösung mit sich bringt. Dennoch ist sie mit einer Präzision von unter 0,2 mm in der Lage, das Messrauschen zu reduzieren. Da diese Betrachtung auf zwei Distanzen im Nahbereich beschränkt ist, kann eine abschließende Aussage über das Auflösungsvermögen in Abhängigkeit des Messrauschens allerdings nicht getroffen werden.

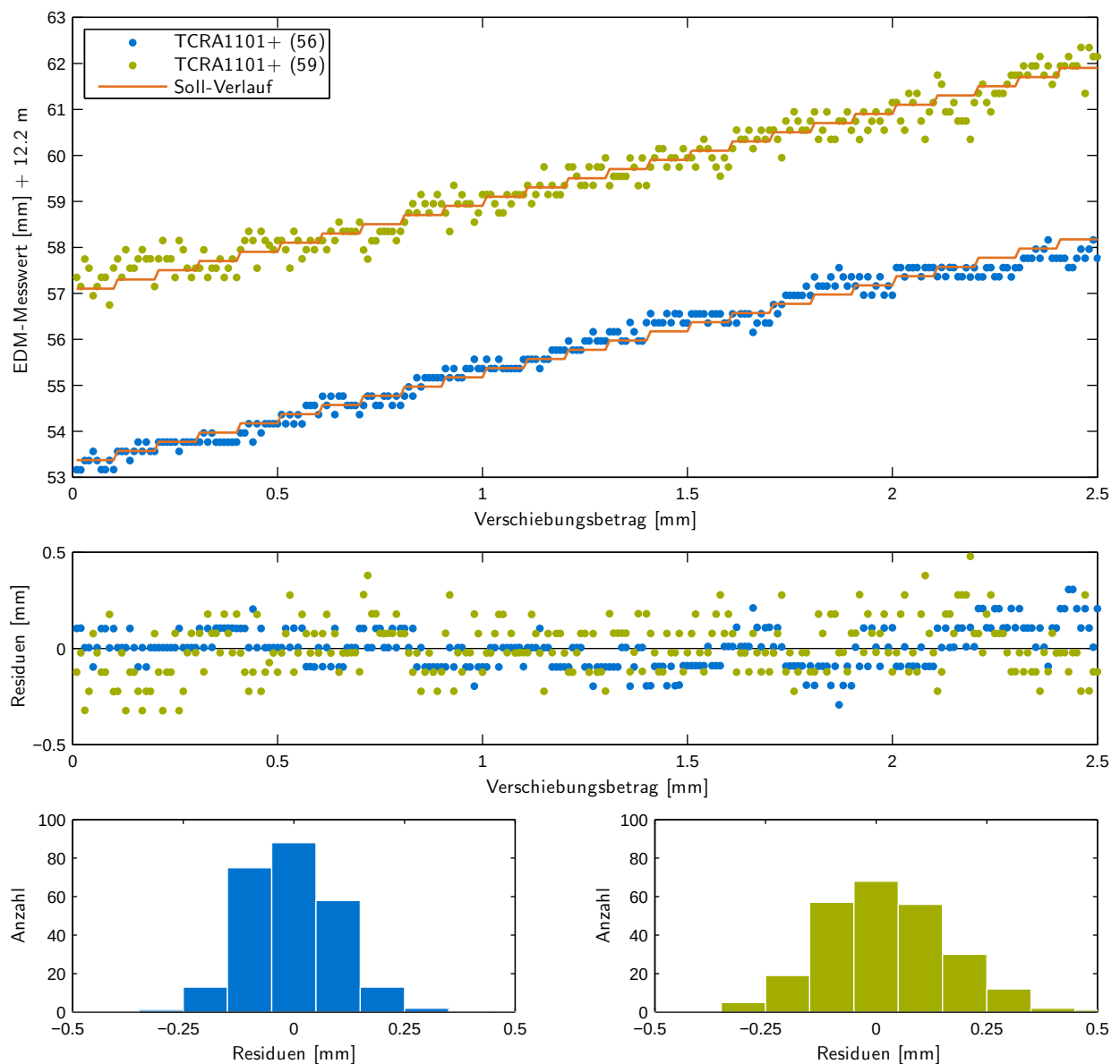


Abbildung 4.8: Testreihe zur Bestimmung des Auflösungsvermögens

Tabelle 4.4: Bestimmung von Auflösungsvermögen und Präzision

Parameter/Messreihe	Distanz	TCRA1101+ (56)	TCRA1101+ (59)
Auflösungsvermögen aus 250 Einzelmessungen	ca. 12 m	0,18 mm	0,21 mm
	ca. 26 m	0,20 mm	0,25 mm
Auflösungsvermögen aus 25 Mittelwerten	ca. 12 m	0,12 mm	0,14 mm
	ca. 26 m	0,16 mm	0,15 mm
mittlere Präzision aus je 10 Einzelmessungen	ca. 12 m	0,06 mm	0,12 mm
	ca. 26 m	0,09 mm	0,15 mm

4.3.5 Phaseninhomogenitäten

Von Phaseninhomogenitäten spricht man, wenn nicht alle modulierten Strahlen des gesamten Strahlenkegels zur gleichen Zeit dieselbe Phasenlage haben. Die Ursache dafür liegt bei Instrumenten auf Basis des Phasenvergleichsverfahrens vor allem in der Güte der Sendediode, lässt sich aber im Einzelnen auf Modenverteilung (vgl. Kapitel 5.2.1.1), Dispersion (der Abhängigkeit von Welleneigenschaften von der Wellenlänge) und Diffraktion (Beugungseffekten) von Sendediode und Optik zurückführen (Fuhrland, 2008). Der Einfluss der Phaseninhomogenitäten kann (gerade bei älteren Instrumenten) bis zu mehrere Millimeter betragen. Bei modernen Geräten überschreitet er aufgrund der starken Strahlbündelung nur in den äußersten Randbereichen des Strahlkegels die mm-Grenze. Für Pulsmessverfahren ist der Begriff der Phaseninhomogenitäten grundsätzlich nicht zutreffend, da das transversale Pulsprofil in der Regel als Anhäufung von Photonen betrachtet wird.

Im weitesten Sinne können in diesem Zusammenhang auch Interferenzerscheinungen, die sog. *Speckles* (engl. f. Sprenkel, vgl. Abb. 5.11) genannt werden. Specklemuster entstehen bei der Beleuchtung von rauen Oberflächen durch einen Laserstrahl und weisen eine zufällige Verteilung der Lichtgranulation auf. Auswirkungen auf die Distanzmessungen werden in (Joeckel u. a., 2008) erwähnt und werden ebenda als vernachlässigbar bezeichnet – dennoch ist davon auszugehen, dass dieser Effekt zumindest von Herstellern genauer unter Beobachtung steht.

Die Bestimmung von Phaseninhomogenitäten entspricht bei Phasenvergleichsverfahren auf Reflektoren einem Abtasten des Strahlquerschnittes durch schematisch angeordnete Distanzmessungen: Als Bezugspunkt der Messung wird die Prismenmitte gewählt. Um diesen Punkt herum wird ein regelmäßiges gleichmäßiges Raster mit Fehlzielungen beobachtet. Dabei reichen die Fehlzielungen in Abhängigkeit von Strahldivergenz und Messentfernung weit über das Prisma hinaus. Als grundlegende Darstellung von Phaseninhomogenitäten werden Isolinien gleicher Entfernungs- bzw. gleicher Phasenlage gewählt. Für die reflektorlose Distanzmessung ist die Bestimmung von Phaseninhomogenitäten wie oben beschrieben nicht praktikabel, da der Reflexionspunkt des Zieles eine minimale Ausdehnung und eine saubere Trennung vom Hintergrund zur Vermeidung von Mischsignalen voraussetzt. Die erste Bedingung verhindert eine zuverlässige Distanzmessung, da die rückgestrahlte Energie unterhalb der registrierbaren Schwelle liegt und kein Messergebnis zustande kommt.

4.3.6 Modellbildung der Distanzabweichungen

Die in den Abschnitten 4.3.1 bis 4.3.4 dargestellten systematischen und zufälligen instrumentelle Fehlereinflüsse können für eine Gesamtkorrektur einer Einzelstrecke im Nahbereich herangezogen werden:

$$d = \underbrace{d_0 \cdot (m - 1)}_{\text{Maßstab}} + \underbrace{k_0}_{\text{Nullpunkt}} + \underbrace{(b) + a \cdot \sin \left[(d_0 - d\lambda_0) \cdot \frac{2\pi}{U} \right]}_{\text{zyklischer Phasenfehler}} + \underbrace{\text{Messrauschen}}_{\text{Präzision}}, \quad (4.13)$$

wobei b im Zuge einer vorherigen Bestimmung der Nullpunktskorrektur den Wert Null annehmen sollte. Neben instrumentellen Korrekturen sind weiter eine Geschwindigkeitskorrektur zur Berücksichtigung atmosphä-

rischer Einflüsse sowie geometrische Reduktionen gemäß den Abbildungsvorschriften zu berücksichtigen. Hierzu zählen die Krümmungsreduktion aufgrund von Refraktion, eine Neigungsreduktion der Schrägdistanz auf Horizontalstrecken und schließlich eine Höhenreduktion auf den Beobachtungshorizont und eine Reduktion bezüglich des Bezugsmeridians.

4.4 Auswirkungen fehlerbehafteter Winkel- und Distanzmessungen

Nicht oder unzureichend kalibrierte Instrumente erzeugen systematische Messabweichungen, deren Auswirkung bei unveränderten Verhältnissen (Meteorologie, Kalibrierwerte, Messkonfiguration) sich bei reinen Differenzmessungen oftmals selbst eliminieren. Ändern sich die Verhältnisse jedoch, ist aber auch bei relativen Beobachtungen zwischen zwei zu vergleichenden Epochen mit systematischen Abweichungen zu rechnen. Bei solchen Differenzmessungen kann dies zu Scheindeformationen führen, die es frühzeitig zu erkennen gilt.

Die Ausführungen aus Abschnitt 4.2.3 fortführend, können nun die vektoriellen Darstellungen der Richtungsabweichungen der Ziel- und Distanzmessachse sowie die Distanzmessung beeinflussende Größen aus Abschnitt 4.3.6 herangezogen werden, um solche Scheindeformationen in einer Simulation herbeizuführen. In Anlehnung an die numerischen Untersuchungen zur Messgenauigkeit eines terrestrischen Laserscanners (Gordon, 2008) werden hierfür virtuelle Ebenen durch eine simulierte, fehlerbehaftete Laserabtastung generiert und mit den Soll-Geometrien und, wie bei epochenweisen Deformationsmessungen üblich, untereinander verglichen.

Der virtuelle Messraum ist Abbildung 4.9 zu entnehmen und hat eine Abmessung von $20 \times 20 \times 10 \text{ m}^3$ in Länge, Breite und Höhe. Um den Einfluss der Messkonfiguration zu verdeutlichen, wurden für beide Epochen unterschiedliche Instrumentenstandpunkte gewählt. Die Instrumente weisen in beiden Epochen identische Fehlergrößen auf, stehen auf der Diagonalen und haben einen Abstand von 5 m und 12 m von der Wand. Der durchschnittliche Abstand zur Decke beträgt 8,35 m. Auf dieser liegt das Hauptaugenmerk, da diese Konfiguration dem in Kapitel 6 ausgeführten Messkonzept am nächsten kommt. Da sich jedoch, wie im Folgenden ersichtlich wird, nicht alle Fehlerursachen auf dieses Element auswirken, beinhaltet die Simulationsumgebung zusätzlich ein vertikales Wandelement.

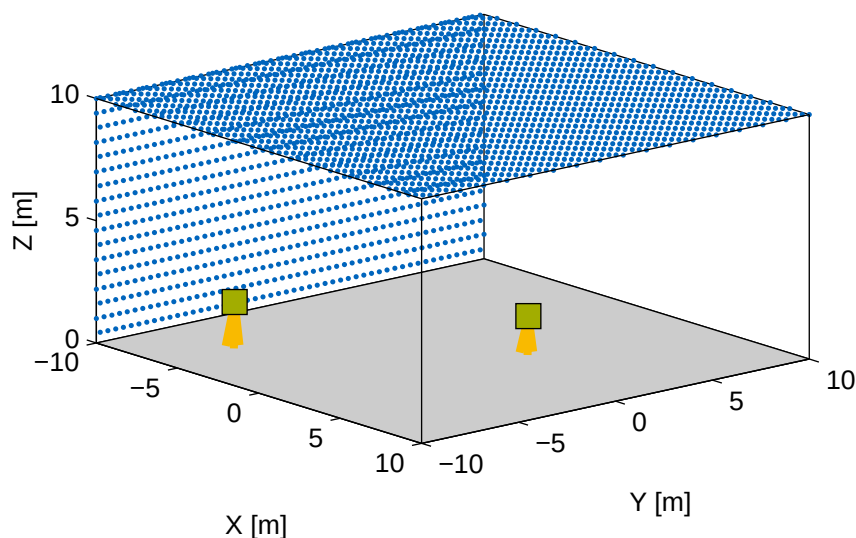


Abbildung 4.9: Aufnahmekonfiguration der simulierten Abtastung. Die beiden Sollgeometrien (eine vertikale sowie eine horizontalen Ebene) werden mit ihren durch systematische Messabweichungen verfälschten Punktwolken verglichen. Die Erfassung der Punktwolken geschieht dabei von zwei unterschiedlichen Standpunkten, so dass auch die Differenz beider Standpunkte betrachtet werden kann.

In den folgenden Abbildungen (4.10 bis 4.16) werden jeweils links und mittig die orthogonalen Abweichungen der simulierten Laserscanpunkte beider Standpunkte zur angegebenen Sollebene dargestellt. Für eine verein-

fachte Interpretation wurde auf eine einheitliche Farbcodierung geachtet. Die rechten Abbildungen beschreiben die, ebenfalls orthogonalen, Differenzen zwischen den beiden Messpochen und dienen in ihren charakteristischen Ausprägungen dem frühzeitigen Erkennen einer fehlerhaften Kalibrierung. Dabei ist anzumerken, dass diese Ausprägungen stark von der Objektgeometrie (z. B. dem Abstand zur und Neigung gegenüber der Objektoberfläche) abhängig sind, so dass die nachfolgenden Abbildungen nur einen beschreibenden Charakter aufweisen. Zudem werden die synthetischen Instrumentenfehler nur einzeln betrachtet; etwaige Überlagerungen werden nicht behandelt.

Abbildung 4.10 gibt die Auswirkungen eines Zielachsfehlers von $c = 2$ mgon wieder, dessen Auswirkungen identisch sind mit einer horizontalen Diskrepanz von $\varepsilon_{hz} = 2$ mgon der berührungslos messenden Distanzmesseinheit. Es wird daraus ersichtlich, dass der Einfluss bei frontalen Beobachtungen auf eine vertikale Ebene minimal ist. Mit zunehmendem Abstand und somit für flache Visuren steigt der Einfluss stetig an. Die unterschiedlichen Entfernungen zu dem Wandelement machen sich in ihrer Größenordnung nicht bemerkbar, so dass sich der Einfluss zwischen beiden Beobachtungsepochen in einem nahezu konstanten Offset wieder spiegelt. Die scheinbaren Verformungen an der horizontalen Decke sind vernachlässigbar gering und werden deshalb nicht dargestellt.

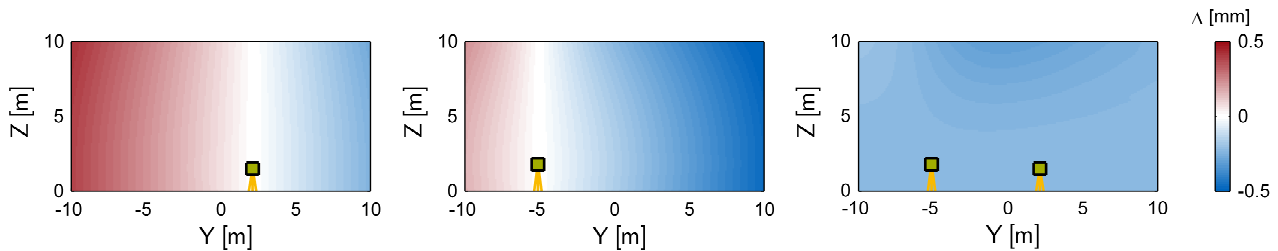


Abbildung 4.10: Auswirkung eines Zielachsfehlers ($c = 2$ mgon) oder der horizontalen Komponente eines Diskrepanzfehlers ($\varepsilon_{hz} = 2$ mgon) an der virtuelle Wand

Für die Abweichung der Kippachse von der Orthogonalität zur vertikalen Stehachse fallen die geometrischen Abweichungen von der vertikalen Ebene bei gleichen Fehlerbeträgen ($i = 2$ mgon) deutlich geringer aus als bei einem Zielachsfehler (vgl. Abbildung 4.10). Dennoch ist eine Abhängigkeit vom Vertikalwinkel z in Abbildung 4.11 erkennbar, wobei horizontale Visuren und das frontal beobachtete Vertikalprofil nahezu frei von Scheindeformationen sind. Auch bei der resultierenden Differenzpunktwolke zwischen beiden Standpunkten bleibt die horizontale Visur von den Scheindeformationen verschont. Ein Maximalbereich prägt sich mittig zwischen beiden Standpunkten für steilere Visuren aus. Der Einfluss des Kippachsfehlers auf die horizontale Ebene ist, wie bereits für den Zielachsfehler c , vernachlässigbar gering und wird daher nicht in die Betrachtung eingeschlossen.

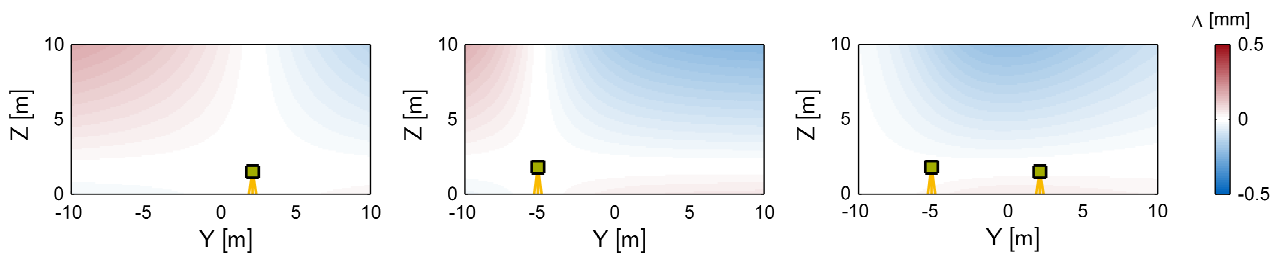


Abbildung 4.11: Auswirkung eines Kippachsfehlers ($i = 2$ mgon) an der virtuellen Wand

Die folgenden Instrumentenfehler wirken sich insbesondere auf die Messungen an dem horizontalen Deckenelement aus (vgl. Abbildungen 4.12 bis 4.16). Selbstverständlich sind auch Auswirkungen an den vertikalen Wandelementen zu verzeichnen, auf deren Darstellung wird jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Ein durch einen Höhenindexfehler ζ oder einen vertikalen Diskrepanzwinkel ε_{hz} von 2 mgon fehlerhafter Zenitwinkel z wirkt sich erheblich auf die beobachtete Ebene über den Instrumenten aus (s. Abbildung 4.12). Direkt im Zenit sind die Einflüsse zwar vernachlässigbar, mit radial zunehmender Horizontaldistanz von diesem Zentralpunkt nehmen die Abweichungen jedoch stark zu und verursachen ein Muster konzentrischer

Kreise. In der Differenzbildung zweier Standorte führt dies zu einer Elimination der Scheindeformation entlang der mittig liegenden Orthogonalen zur Verbindungslinie beider Standpunkte. Abgesehen von diesem fehlerfreien Bereich verursacht die Indexabweichung des Vertikalkreises bei Deformationsmessungen maximale Scheindeformationen direkt im Zenit über den jeweiligen Standpunkten, allerdings mit unterschiedlichen Vorzeichen. Die charakteristische Ausprägung beschreibt eine Hyperbelschar mit den beiden Standpunkten als Brennpunkten.

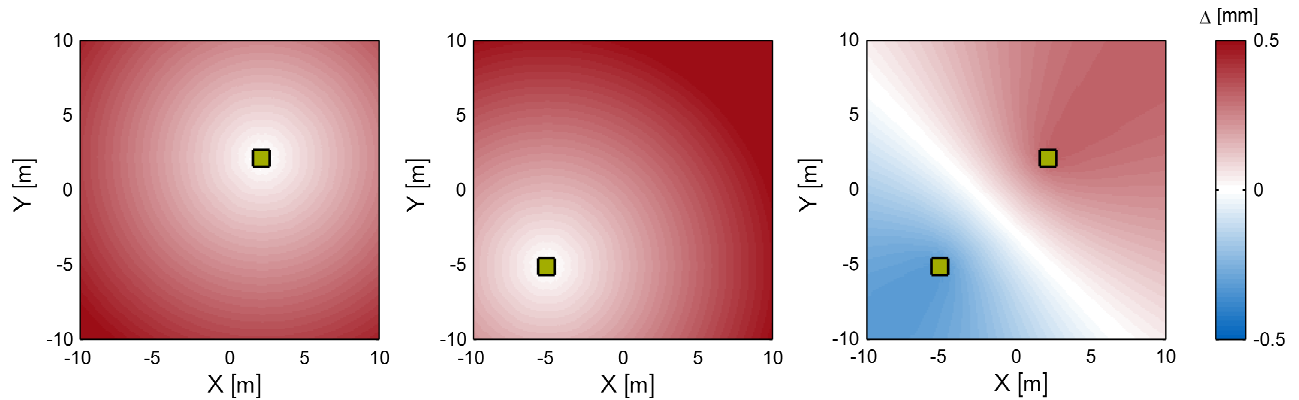


Abbildung 4.12: Auswirkung eines Höhenindexfehlers ($\zeta=2$ mgon) oder der vertikalen Komponente eines Diskrepanzfehlers ($\varepsilon_{hz}=2$ mgon) an der virtuellen Decke

Als letzter Achsfehler ist der operative Stehachsfehler zu berücksichtigen. Da dieser kein Instrumenten-, sondern ein Aufstellfehler ist, sind für diese Simulation für beide Standpunkte unterschiedliche Richtungen der Stehachsschiefe veranschlagt (s. Abbildung 4.13). Die Beträge sind aber auch in diesem Beispiel für beide Konfigurationen mit $\nu = 1,2$ mgon identisch. Da ein Stehachsfehler eine Verkipfung der Horizontalebene vortäuscht, werden die Beobachtungen zum horizontal liegenden Deckenelement ebenfalls um den Betrag der Stehachsschiefe, und zwar in Richtung der Stehachsschiefe verkippt. Die Auswirkung ist folglich orthogonal zu dieser Richtung Null; in Richtung der Stehachsschiefe nehmen die Abweichungen von der Sollgeometrie kontinuierlich zu, in die entgegengesetzte Richtung kontinuierlich ab. Da die Geometrie einer Ebene erhalten bleibt, ist für dieses Beispiel festzustellen, dass die scheinbare Deformation keine Verformungsanteile aufweist sondern eine reine Starrkörperbewegung repräsentiert.

Das Resultat aus der Differenz zwischen beiden Konfigurationen ergibt ebenfalls eine zur Horizontalen verkippten Ebene. Die Neigungsrichtung entspricht bei identischen Beträgen der beiden Stehachsfehler dem Mittelwert der Richtungen der Stehachsschiefe. Sind die Beträge nicht identisch, so entsprechen sie dem gewichteten arithmetischen Mittel. Der Schnitt zweier nicht paralleler Ebenen führt zu einer gemeinsamen Schnittkante, die orthogonal zur Neigungsrichtung liegt. Diese Kante ist frei von Scheindeformationen und liegt i. d. R. außerhalb der Verbindungslinie zwischen beiden Instrumentenstandpunkten.

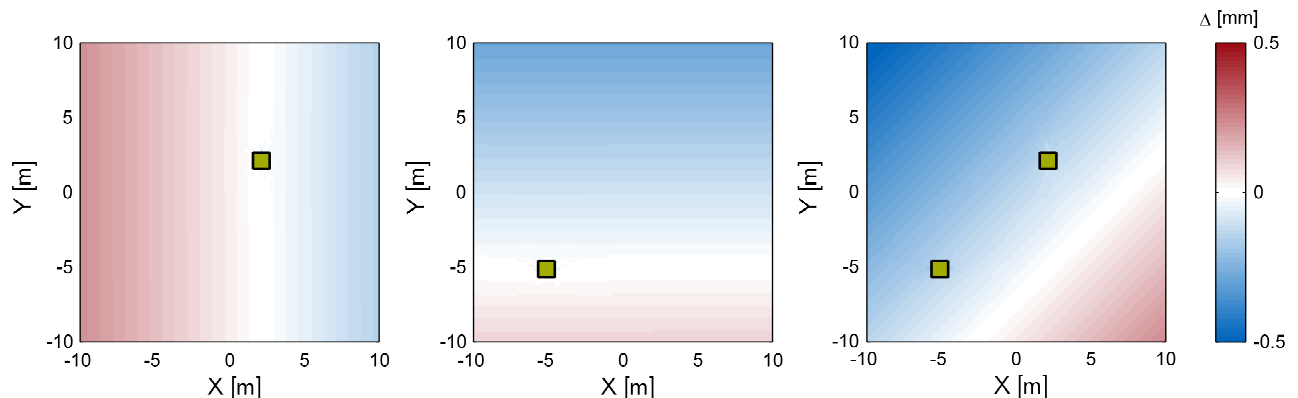


Abbildung 4.13: Auswirkung eines Stehachsfehlers (Epoche 1: $\nu = 1,2$ mgon $a_\nu = 0$ gon; Epoche 2: $\nu = 1,2$ mgon $a_\nu = 100$ gon) an der virtuellen Decke

Ein streckenabhängiger Distanzmessfehler bewirkt unabhängig von seiner Richtung eine Skalierung der abgetasteten Umgebung. Diese zentrische Streckung bewirkt eine Ähnlichkeitsabbildung, bei der Geometrieeigenschaften wie die Parallelität erhalten bleiben. Somit entsprechen die Scheindeformationen auf den beiden Standpunkten einer Parallelverschiebung, die sich als jeweils konstante Abweichung von der Sollgeometrie zu erkennen geben (siehe Abbildung 4.14). Sofern der Maßstabsfehler in beiden Konfigurationen identisch ist, ist die Differenz zwischen diesen Konfigurationen wieder frei von einer Scheindeformation. Ändert sich der Maßstabsfaktor hingegen, z. B. durch unzureichende atmosphärische Korrekturen, ist auch hier mit einer konstanten Abweichung zu rechnen, die sich aus der Differenz der beiden Maßstäbe ergibt.

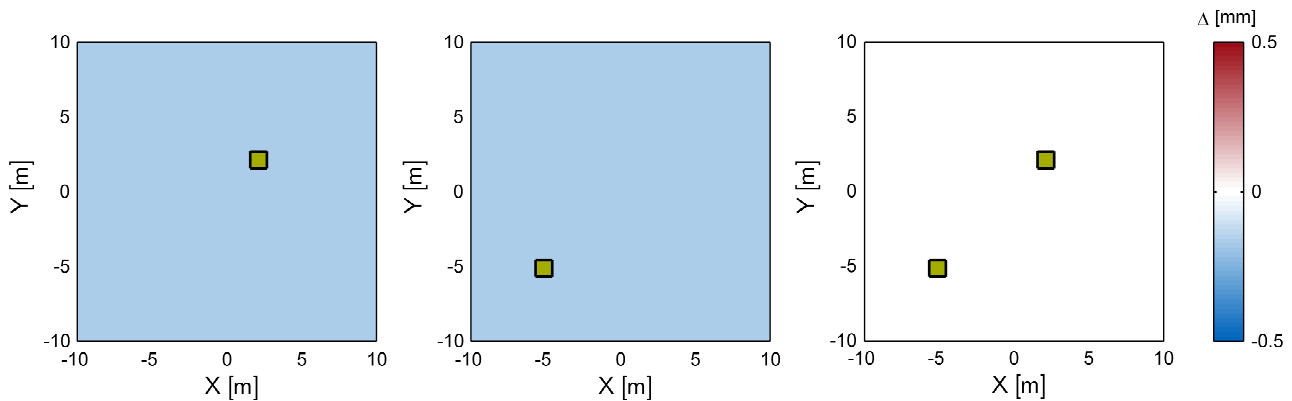


Abbildung 4.14: Auswirkung eines Maßstabsfehlers von +17 ppm an der virtuellen Decke

Abbildung 4.15 zeigt die Scheindeformation der Punktwolke an der horizontalen Ebene bei Nichtbeachtung einer additiven Abweichung der Streckenmessung. Es wird deutlich, dass für zunehmende Distanzen zum Messobjekt der Anteil der Abweichung an der Distanz geringer wird. Somit ist ihr Einfluss für frontale Beobachtungen mit orthogonalem Auftreffwinkel, also an der zentral über dem Instrument gelegenen Position, am größten und sinkt mit flacher werdendem Auftreffwinkel. Die gleichen Feststellungen treffen für die Deformation einer vertikalen ausgerichteten Ebene zu. Direkt im Zenit nehmen die Fehlereinflüsse Extrema an, mit zunehmender Entfernung nimmt der Einfluss jedoch ab, bis er in sehr großen Distanzen aufgrund der flachen Visuren vernachlässigbar wird. Ebenso wie bei der Auswirkung eines Höhenindexfehlers (Abbildung 4.12) verursacht ein Nullpunktfehler ein Muster konzentrischer Kreise – allerdings bei positiven Fehlergrößen mit unterschiedlichem Vorzeichen. Bei einer Differenzbildung beider Punktwolken entsteht auch hier ein von Scheindeformationen freier Bereich entlang der mittig liegenden Orthogonalen zur Verbindungslinie beider Standpunkte. Entlang der Verbindungslinie nehmen die Scheindeformationen vom Zentrum an betragsmäßig zu, bis sie hinter den Standpunkten ein Extremum erreichen, bei dem sich die Fehlereinflüsse von beiden Standpunkten überlagern. Aufgrund der grundsätzlichen Abnahme des Fehlereinflusses mit zunehmender Entfernung zu den Standpunkten, nimmt die scheinbare Gesamtdeformation danach ebenfalls wieder ab.

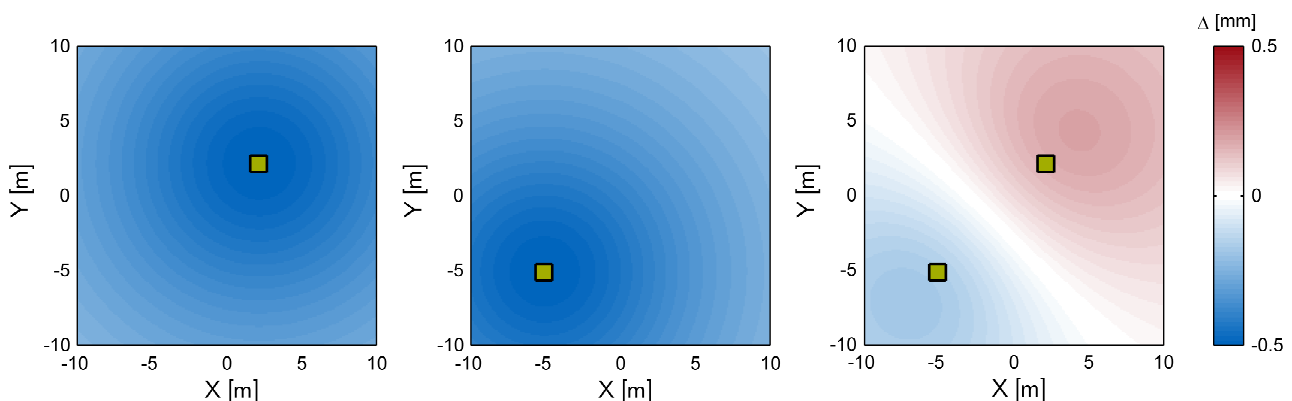


Abbildung 4.15: Auswirkung einer Nullpunktsskonstante von +0,5 mm an der virtuellen Decke

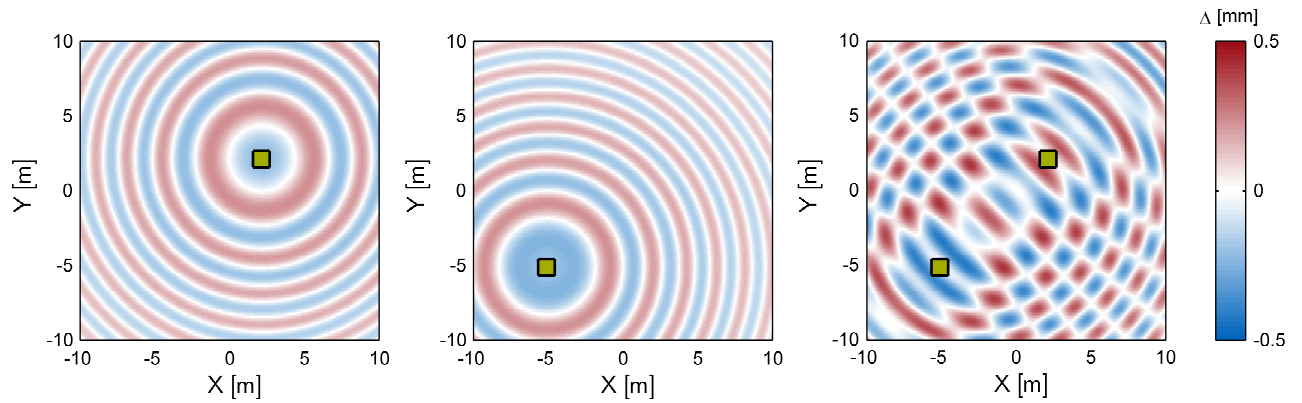


Abbildung 4.16: Auswirkung eines zyklischen Phasenfehlers mit einer Amplitude von 0,25 mm an der virtuellen Decke

Explizit die Erkenntnisse aus Abbildung 4.15 ermöglichten eine frühzeitige Erkennung einer fehlerhaften Kalibrierung im Praxisbeispiel, welchen in Kapitel 6 erörtert wird. In Abschnitt 6.2 wird dieses Szenario nochmals aufgegriffen und ein Lösungsansatz hierzu vorgestellt.

Abschließend werden noch die Auswirkungen des zyklischen Phasenfehlers in Abbildung 4.16 veranschaulicht. Der mit einem Feinmaßstab von $U = 1.5$ m periodisch wiederkehrende Distanzmessfehler mit einer Amplitude von 0,25 mm verursacht ausgehend von dem Zenitpunkt über den Instrumenten ein konzentrisches Wellenmuster. Wie bereits bei der Nullpunktskonstante nimmt dieser Einfluss für flache Visuren ab; der Abstand zwischen den Wellenfronten nimmt hingegen ab. Die Überlagerung beider Wellenmuster folgt dem Superpositionsprinzip und verursacht Interferenzerscheinungen mit Nullstellen und mit Extrema, die sich aus der Summe der Einzelamplituden ergeben.

Kapitel 5

Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche

Wesentliche instrumentelle Fehler moderner Tachymeter wurden in Kapitel 4 hinsichtlich Ursache, Auswirkung und Kalibriermethoden erläutert. Dennoch verbleiben neben zufällig verteilten Messunsicherheiten insbesondere bei der elektrooptischen Entfernungsmessung nach wie vor systematische Anteile, die auf die Interaktion des Messstrahls mit der Objektoberfläche sowie das dazwischen liegende Medium zurückzuführen sind. Als wesentliche Bestandteile dieser Interaktion sind aufgrund atmosphärischer Einflüsse die Laufwege zwischen Sender, Objekt und Empfänger anzusehen; aber auch die geometrische und radiometrische Oberflächenbeschaffenheit sowie der Einfallswinkel, unter dem der Laserstrahl auf die Objektoberfläche trifft.

Während atmosphärische Laufzeitverzögerungen seit Jahren als gängige Praxis zur Korrektur von EDM-Messungen berücksichtigt werden, sind die übrigen Einflüsse in der Fachliteratur als nicht abschließend behandelt zu werten. Zahlreichen Publikationen, die sich mit der Variation der Distanzmessung aufgrund unterschiedlicher Materialien von Styropor bis Beton mit unterschiedlicher Farbgebung befassen, sind zwar Versuchsreihen und -ergebnisse zu entnehmen – eine empfohlene Vorgehensweise zur Korrektur der Distanzmessungen bleibt jedoch aus und ist in den meisten Anwendungsfällen, beispielsweise bei der Bestandserfassung mittels terrestrischem Laserscanning, auch nicht praktikabel umsetzbar. Daher beschränkt sich der erste Abschnitt dieses Kapitels auf die Beschreibung der beobachtbaren Effekte und deren Ursachen.

Anschließend widmet sich dieses Kapitel den geometrischen Umständen, unter denen der Laserstrahl auf das reflektierende Objekt trifft. Bisherige Arbeiten beschränken sich auch in diesem Fall auf den experimentellen Nachweis systematischer Abweichungen. Die Ursache des Effektes wird zumeist mit der Intensitätsverteilung innerhalb des Laserspots und der aufgrund von Reflexionsgesetzen „deformierten“ wirksamen Intensitäten erklärt. Auf eine systematische Vorgehensweise zur Korrektur von Rohmessstrecken wird allerdings kaum eingegangen. Auch wenn die anzubringenden Korrekturen im Submillimeterbereich und damit deutlich unter den offiziellen Spezifikationen der Messgenauigkeit liegen, so existieren im Bereich der ingenieurgeodätischen Deformationsmessung durchaus Anwendungen (vgl. hierzu Kapitel 6), bei denen eine Korrektur sinnvoll erscheint.

Auch im Hinblick auf die Weiterentwicklung der reflektorlosen Distanzmessung von reinen Impulslaufzeit- oder Phasenvergleichsverfahren hin zu einer so genannten *Waveform Analysis*, bei der die gesamte zeitliche Signalform einer Analyse unterzogen wird und die beispielsweise die Detektion mehrerer Ziele innerhalb des Signalweges ermöglicht, ist das Verständnis der Interaktion Laserstrahl/Objektoberfläche von besonderem Interesse. Als Beleg hierfür kann die Dissertation von Jutzi (2007) angesehen werden. Darin beschrieben ist die Möglichkeit, aus einer solchen Methodik auch die geometrische Rekonstruktion der reflektierenden Oberfläche durchzuführen. So gelang es in besagter Arbeit, aus der Kenntnis der ausgesendeten und empfangenen Signalform eines luftgestützten Laserscanners die Oberflächenantwort zu rekonstruieren und daraus die Geländeneigung resp. den Einfallswinkel zu ermitteln.

Auch wenn dem Nutzer bodengebundener Tachymeter oder Laserscanner diese Signalinformation in der Regel nicht zugänglich ist, verdeutlicht diese Erkenntnis, dass der Einfallswinkel der Lasermessungen einen Einfluss auf die Distanzmessung hat. Inwiefern sich dieser Einfluss als Distanzabweichung von einer Solldistanz bemerkbar macht, wird in diesem Kapitel anhand einer Simulationsrechnung untersucht und stellt den Schwerpunkt dieses Kapitels dar.

5.1 Effekte und Ursachen

5.1.1 Meteorologie

Nach dem Austritt aus der Sendeoptik wird der äußere Lichtweg des Messstrahls bis zum Wiedereintritt in die Empfangsoptik von atmosphärischen Einflüssen gestört. Dies erfordert in erster Linie eine so genannte Geschwindigkeitskorrektur, die eine Extrapolation der im Vakuum definierten Lichtgeschwindigkeit auf die aktuell herrschenden meteorologischen Verhältnisse, also die Brechzahl des Mediums Luft, ermöglicht. Ausgehend von der verwendeten Trägerwellenlänge des Laserlichts ergibt sich ein Gruppenrefraktionskoeffizient, der unter Berücksichtigung der aktuellen meteorologischen Parameter wie Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und der chemischen Zusammensetzung der Luft (insbesondere des CO_2 -Gehalts) an die Messatmosphäre anzupassen ist. Eine detaillierte Vorgehensweise zur Anbringung dieser 1. Geschwindigkeitskorrektur ist beispielsweise aus (Joeckel u. a., 2008) in Anlehnung an Kohlrausch, Barrel und Sears zu entnehmen, worin Resolution 3 der International Association of Geodesy (IAG) von 1999 Beachtung findet.

Als allgemeingültige Näherung kann für EDM-Messungen von folgenden Gradienten ausgegangen werden: Eine Zunahme der Temperatur um 1°C erhöht die Multiplikationskonstante um 1 ppm und eine Zunahme des Luftdrucks um 3,4 hPa senkt wiederum die Multiplikationskonstante um 1 ppm. Zieht man in Betracht, dass in der Regel bereits vom Hersteller eine interne atmosphärische Korrektur auf eine Referenzatmosphäre vorgenommen wird, liegt der zu korrigierende atmosphärische Einfluss bei gängigen Trägerwellenlängen von 300 bis 1000 nm in der Größenordnung von -40 bis +50 ppm (vgl. Abb. 5.1).

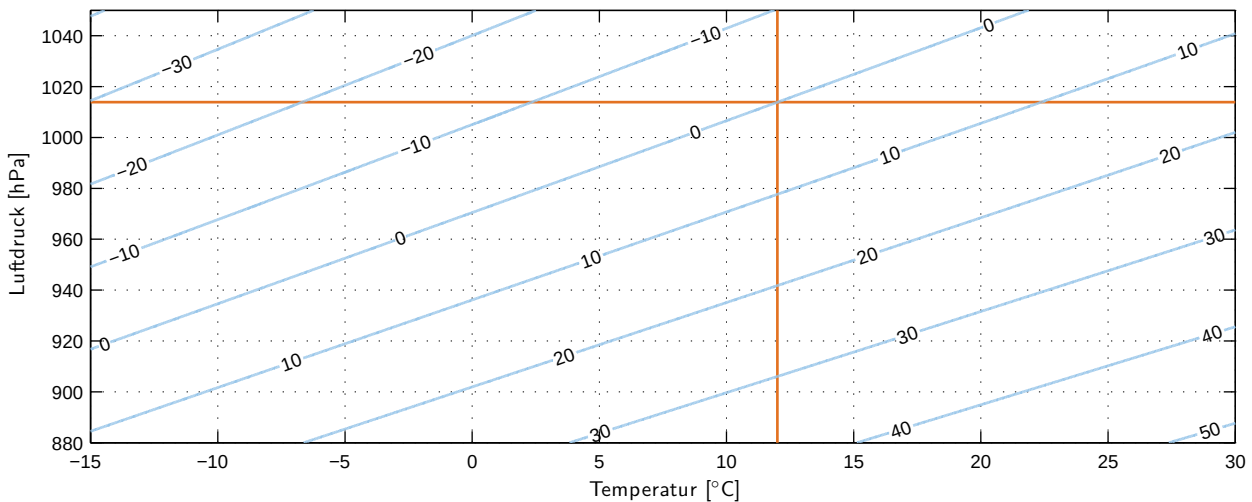


Abbildung 5.1: Meteorologische Korrektur in [ppm] für eine Trägerwellenlänge von 700 nm bei einer berücksichtigten Bezugsatmosphäre ($t_0 = 12^\circ\text{C}$, $p_0 = 1013.25$ hPa und einer relativen Luftfeuchte von 60%)

In einer Messentfernung von 100 m entspricht eine meteorologische Abweichungen von der Referenzatmosphäre von $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ und $\Delta p = 50$ hPa lediglich einer Abweichung von ca. 1,8 mm und kann demzufolge für viele Anwendungen im mittleren Entfernungsbereich durch einen geschätzte Umgebungstemperatur kompensiert werden. Für hochpräzise Anforderungen empfiehlt sich die gesonderte Erfassung der besagten Parameter und eine geräteinternen oder nachträglichen Anbringung der entsprechenden Korrekturen.

Allerdings werden Distanzmessungen auch durch Partikel in der Luft, wie Staub, Dampf und Regentropfen erheblich beeinflusst, da der Messstrahl an solchen Partikeln teilweise reflektiert und gebrochen wird. In der Folge ist mit Fehlmessungen zu rechnen (Dold, 2010). Neben der direkten Auswirkung auf den Messwert bewirkt die Atmosphäre eine Signalabschwächung im Sinne einer Extinktion. Dieser Vorgang wird in Abschnitt 5.2.2 detailliert erläutert und berücksichtigt.

5.1.2 Totalreflexionen und Mehrwegeffekte

In der Regel werden berührungslose Distanzmessungen erfolgreich auf diffus reflektierende Oberflächen durchgeführt. Dennoch kann es, insbesondere bei hochauflösenden Rundumscans, vorkommen, dass der Messstrahl auf eine in Bezug zur Wellenlänge glatte Oberfläche trifft und von dieser vollständig nach dem Prinzip „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ reflektiert wird. Bei einer solchen Totalreflexion kann keine Energie zurück zur EDM-Einheit gelangen und folglich kein Streckenmesswert registriert werden. Als Resultat enthält die Punktwolke an besagter Stelle eine Lücke bzw. ein „schwarzes Loch“. Ein weiterer Effekt ist zu beobachten, wenn die Energie nach der Reflexion an einer sehr glatten bzw. spiegelnden Oberfläche auf eine weitere Oberfläche trifft, die wiederum diffus reflektiert. Gelangen unter einer solchen geometrischen Konstellation Teile der ausgesandten Energie wieder zurück zur Empfangseinheit, kommt eine nicht korrekte Streckenmessung zu Stande, die den zum Messzeitpunkt gültigen Vertikal- und Horizontalwinkel zugeordnet wird. Analog zur GNSS-Terminologie kann man hier von Mehrwegeffekten sprechen, die sich im Resultat, z. B. einer Punktwolke, als so genannte „Phantompunkte“ abbilden. Beide Fehlerarten sind als grobe Fehler zu klassifizieren und sind vor der Weiterverarbeitung der Messdaten aus diesen zu entfernen.

5.1.3 Mischsignale

Unter Mischsignalen sind Fehlmessungen zu verstehen, die insbesondere an Kanten entstehen. Bei einer nicht zu vermeidenden Divergenz des Messstrahls kann es vorkommen, dass zwei räumlich hintereinander liegende Objekte innerhalb der Messkeule liegen. Sofern sich die Distanzen dieser beiden Objekte nicht deutlich unterscheiden, tragen beide Objekte anteilig zu dem Streckenmessergebnis bei (Schäfer u. Schleinkofer, 2005). An einer stufenförmigen Kante, wie sie beispielsweise in Abbildung 5.40 dargestellt ist, führt ein sukzessives Abtasten der Kante zu einem Ausrundungseffekt (Kern, 2003). Das Messverhalten berührungslos arbeitender Distanzmessmodule wird beispielsweise von Richter u. Juretzko (2007) untersucht und dient in gewisser Weise als Qualitätsmerkmal für solche Messsysteme. Abschnitt 5.4.1 macht sich diesen Effekt zu Nutze, um die angestrebte Simulationsumgebung zu verifizieren.

Insbesondere terrestrische Laserscanner nutzen zur Reduzierung dieses Effektes automatische Filter, die sich u. a. auf die Historie der unmittelbar zuvor gemessenen Punkte berufen. Je nach Grad der Filtereinstellungen führt dies aber auch zu einer Glättung von Kanten und muss daher auf die abzuleitende Objekttröue abgestimmt sein. Ganz ohne Filterwirkung kann ein solcher Effekt auch auftreten, wenn die weiter entfernte Reflexionsfläche nicht mehr im Erscheinungsbild auftritt. In diesem Fall entstehen abermals Phantompunkte, die von Staiger (2003) und inzwischen in der Literatur aufgrund der visuellen Ausprägung üblicherweise als „Kometenschweif“ bezeichnet werden. Für eine saubere Modellierung sind auch diese vor der Weiterverarbeitung der Messdaten oftmals zu eliminieren.

5.1.4 Materialbeschaffenheit

Die Materialbeschaffenheit umfasst in diesem Zusammenhang die Materialfarbe und die damit zusammenhängende Reflektanz sowie die Oberflächenstruktur bzw. die Rauheit des Materials.

Als Reflektanz wird das Verhältnis zwischen der zurückgestreuten und der einstrahlenden spektralen Lichtleistung bezeichnet und dadurch das von Umgebungsbedingungen unabhängige Reflexionsvermögen eines Materials beschrieben. Werden äußere Bedingungen, wie z. B. eine Verminderung der Lichtleistung aufgrund eines nicht frontalen Einfallswinkels (Abschnitt 5.3.1) oder eine atmosphärische Dämpfung aufgrund der Zielentfernung (Abschnitt 5.2.2), berücksichtigt, ist anstelle der Reflektanz der Begriff Reflexionsgrad oder Reflektivität angebracht. Reflektanzwerte können, wie beispielhaft von Möck (2011) beschrieben, empirisch bestimmt werden. Für grauen Beton liegen diese im Bereich von 30% bis 40%. Die Reflektanz hat Einfluss auf die Leistung des zurückgestrahlten Lichtes (s. a. Abschnitt 5.3.2) und beeinflusst die Streckenmessung nur insoweit, als dass eine nicht homogene Materialfarbe innerhalb des vom Laser beleuchteten Bereichs zu einer unterschiedlichen Gewichtung der zur Distanzmessung beitragenden Oberflächenelemente führt. Daher sollte, sofern möglich, bei tachymetrischen Scanaufnahmen mit größeren Laserspots eine geeignete Vorauswahl

der anzumessenden Bereiche stattfinden und starke Kontraste oder Übergänge in der Materialbeschaffenheit innerhalb eines Messpunktes vermieden werden.

Der Begriff der Rauheit erscheint zunächst trivial, stellt sich bei näherer Betrachtung jedoch als umstritten dar. Letzteres gilt insbesondere dann, wenn die Rauheit einer Oberfläche durch einen quantitativen Wert beschrieben werden soll um daraus ein belastbares Qualitätsmerkmal, z. B. eines Sichtbetons unter architektonischen Gesichtspunkten, abzuleiten. (Mömber u. Schulz, 2005) und (Volk, 2005) stellen hierzu nicht abschließende Verfahrensweisen für eine objektive Beurteilung vor. El-Tornachi (2003) und Lenz (2012) bestimmen die Rauheit von Betonoberflächen auf Basis von flächenhaften Laserscans, um die Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton im Zuge von Sanierungsmaßnahmen zu überwachen. Dabei stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Rauheit auf die erreichbare Messgenauigkeit. Vereinfacht lässt sich Rauheit zunächst in eine globale bis lokale Rauheit unterteilen. Unter ihr können großmaßstäbige Variationen der Oberflächenform oder Abweichungen von einer idealisierten Geometrie verstanden werden. Vergrößert man den Betrachtungsmaßstab, ergeben sich makro- und mikroskopische Rauheiten. Nach dem aus der Fernerkundung bekannten Rayleigh-Kriterium, wirkt eine Oberfläche für elektromagnetische Strahlung der Wellenlänge λ dann als glatt, wenn für die Standardabweichung der Unebenheiten

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \gamma} \quad (5.1)$$

gilt, wobei der Einfallswinkel γ dem Winkel zwischen Flächennormale und Einfallsrichtung der Strahlung entspricht. Für eine typische Trägerwellenlängen von $\lambda = 700 \text{ nm}$ bedeutet dies für frontale Anzielungen, dass Oberflächen mit einer Standardabweichung der Unebenheiten von $h > 0,08 \text{ }\mu\text{m}$ als rau wahrgenommen werden; bei einem Einfallswinkel von 70° erhöht sich diese Grenze auf $0,25 \text{ }\mu\text{m}$.

Die Auswirkungen von unterschiedlichen Oberflächenformen auf Entfernungsmessungen werden bereits in den Dissertationen von Kern (2003) sowie Juretzko (2005) diskutiert. Beide Arbeiten beobachten Effekte aufgrund der Rauheit der Oberfläche, welche zu einer systematischen Verfälschung des gemessenen Ergebnisses führen. Dabei wird auch ein Eindringen in die Struktur poröser, also räumlich strukturierter, Oberflächen, die nicht der manuell tastbaren Oberfläche entsprechen, angerissen. Als Beispiele hierfür sind Schneeoberflächen und Styropor zu nennen – letzteres Material wird in (Ingensand u. a., 2003) und schließlich (Schulz, 2007) näher erörtert. Grundsätzlich werden hier Effekte des Eindringens der Strahlung in Hohlräume der Oberfläche wirksam, die zu an der Materialoberfläche reflektierten Anteilen der Strahlung aus Bereichen unterhalb der fühlbaren Oberfläche führen. Diese entsprechen gegenüber der tastbaren Oberfläche größeren Distanzen und tragen somit zu einer systematischen Verfälschung des gemessenen Ergebnisses bei.

In den genannten Veröffentlichungen findet auch der Einfluss der Oberflächenrauheit Erwähnung und wird teilweise mit Messreihen belegt. Um den Einfluss der Rauheit auf eine Entfernungsmessung abzuschätzen, wird in Abschnitt 5.4.3 eine Betonoberfläche im Zuge von Simulationsrechnungen berücksichtigt.

5.1.5 Zielgeometrie und Einfallswinkel

Die Art der Reflexion hat auf die Messung nur insoweit Auswirkung, als dass die Streckenmessung fehlschlägt falls nicht genügend Energie zurückgeworfen wird oder die Streckenmessung systematisch zu kurz ausfällt, falls das reflektierte Signal zu stark ist und der Empfänger dadurch übersteuert. Ein Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messergebnisse ist abgesehen dieser Extremverhältnisse nach Kern (2003) nicht zu erwarten. Unter realen Bedingungen sind aber zusätzliche Parameter wie Mehrwegeeffekte, die Strahldivergenz sowie die Intensitätsverteilung innerhalb der Messkeule, aber auch die Objektentfernung und die Ausrichtung zum Sensor, zu berücksichtigen. All diese Faktoren beschreiben eine Zielgeometrie und sind durchaus als potentielle Einflussfaktoren auf die Streckenmessung anzunehmen.

Für die weitere Betrachtung gilt die Konvention, dass der Einfallswinkel γ (engl. *incidence angle*) dem Winkel zwischen der Flächennormale und der Einfallsrichtung und der Auftreffwinkel ψ dem Winkel zwischen Einfallsrichtung und der Oberfläche entspricht.

In (Kern, 2001) werden Auswirkungen unterschiedlicher Einfallswinkel auf die reflektorlose Distanzmessung eines Lasermeters des Typs DISTO GSI diskutiert. Hierzu wurde eine verschwenkbare Zieltafel in 5° -Schritten

verdreht und jeweils zehn Distanzmessungen ausgelöst. Anhand der Messdaten wird auf empirischem Wege versucht, eine Systematik nachzuweisen. Die Ergebnisse zeigen einen tendenziellen Einfluss, der jedoch innerhalb der Messunsicherheit des Instrumentariums liegt. Da eine solche Versuchsanordnung über eine Rotationsachse verfügen muss, die direkt auf der Oberfläche liegt, sind solche Resultate jedoch nur bedingt aussagekräftig. Eine wesentlich geeignetere Vorgehensweise besteht in der Messung identischer Punkte von unterschiedlichen Standpunkten aus, was eine vorherige Freie Stationierung in einem Grundlagnetz höchster Präzision voraussetzt. Auf diese Weise wird auch von Kuhlmann (2002) die berührungslose Distanzmessung in Bezug auf Abhängigkeiten des Einfallswinkels untersucht. Von zwei unterschiedlichen Standpunkten aus werden mehrere Punkte berührungslos vermessen und die ermittelten Koordinaten verglichen. Die erhaltenen Differenzen zwischen einem frontalen und schiefem Auftreffwinkel spiegeln ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit der berührungslosen Distanzmessung vom Einfallswinkel wieder.

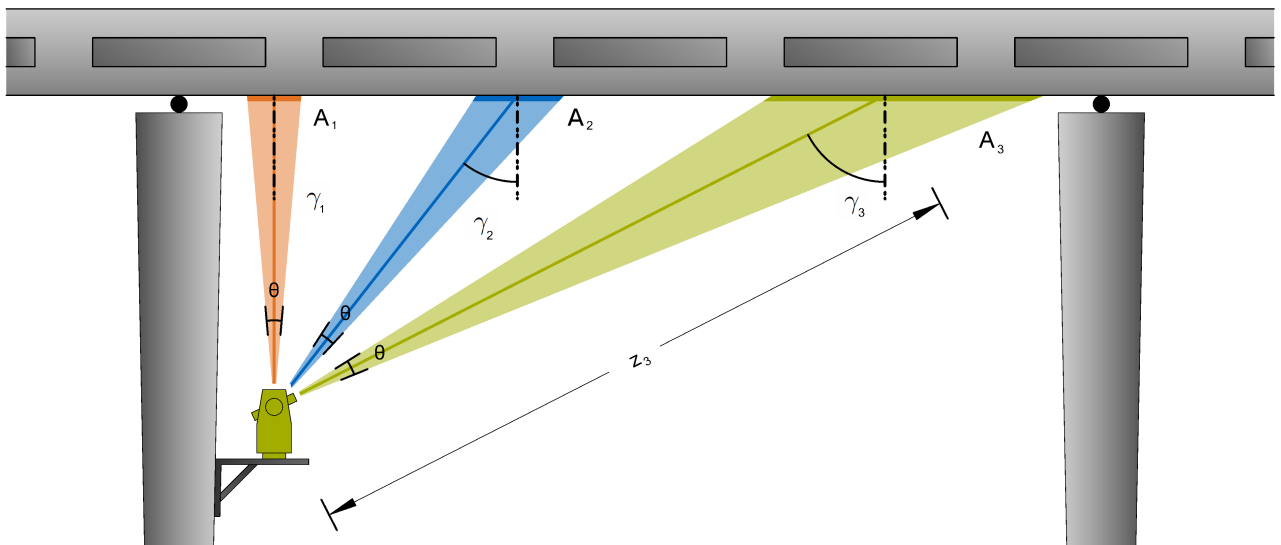


Abbildung 5.2: Schematische Seitenansicht der Zielgeometrie mit den Zielentfernungen z_i , den Einfallswinkel γ_i , einer konstanten Strahldivergenz Θ und den Spotgrößen A_i am Messobjekt

Ebenso wie Kern (2003) beziehen sich Joeckel u. a. (2008) auf eine divergenzbedingte ungleichmäßige Beleuchtung des Zielobjekts, welche bei großen Einfallswinkeln zwischen Laserstrahl und Oberflächennormale zu systematischen Verfälschungen der Streckenmessung führen kann. Abbildung 5.2 veranschaulicht dieses Phänomen ausgehend von einem Laserstrahl mit konstanter Strahldivergenz Θ , der an unterschiedlichen Stellen auf die Brückenunterseite (vgl. auch Abschnitt 6.3) trifft. Mit zunehmender Entfernung z_i und Einfallswinkel γ_i vergrößert sich auch der Spotdurchmesser A_i . Ausgehend von der Mittelachse des Laserstrahls lässt sich dieser Spot in einen linken und rechten Bereich unterteilen, wobei leicht ersichtlich ist, dass die vorhandene Lichtenergie im jeweils linken Bereich eine kleinere Fläche beleuchtet und somit die Energiedichte hier höher ist. Folglich wird dieser Bereich bei der Auswertung des Mischsignals höher gewichtet und es kommt zu einer systematischen Verkürzung des Streckenmessergebnisses.

Dieser Effekt ist jedoch nur bei deutlich größeren Divergenzwinkeln (bei gängigen berührungslosen Laserentfernungsmessgeräten beträgt dieser lediglich 1-2 mrad) bemerkbar und kann nicht als ausschlaggebende Erklärung der Abhängigkeit vom Einfallswinkel angesehen werden. Kern (2003) liefert für den Vorgang der Interaktion des Laserstrahls am Objekt daher eine weitere Erklärung, deren Wirkungsweise in Abbildung 5.3 dargestellt ist und in der Quelle folgendermaßen beschrieben wird:

„Die Wellenfronten des Laserstrahls entsprechen im Fernfeld denjenigen von Kugelwellen, wobei die Leistungsdichte von der Strahlmitte ausgehend entsprechend einer Gaußschen Glockenkurve exponentiell abfällt. Trifft nun solch ein Gaußscher Strahl auf eine schiefe Ebene, so wird er hinsichtlich seiner Ausrichtung und seiner Energie gemäß des Reflexionsgesetzes zum größten Teil reflektiert und nur ein geringer Energieanteil gelangt zum Messgerät zurück (bei Annahme einer diffusen Reflexion mit Spiegelung). Bei der Reflexion wird die Energiewellenfront (wie in Abbildung 5.3) dargestellt) verformt. Für den Teil der Reflexionsfläche, der näher zum Lasergerät zeigt (Anm.: Bereich Δr_1), rücken die wirksamen Intensitäten näher zusammen. Für den Teil

der Reflexionsfläche, der weiter weg vom Lasergerät ist (Anm.: Bereich Δr_2), ziehen sich die wirksamen Intensitäten auseinander. Am Photodetektor wirkt damit eine Intensitätsverteilung, die zu Gunsten der näheren Reflexionsteilfläche zeitlich (Anm.: Bereich Δt_1) verschoben ist. Eine systematisch verkürzte Laufzeitmessung und damit eine zu kurze Entfernungsmessung werden registriert. Dieser Effekt ist umso deutlicher je größer der Einfallswinkel und je größer die Strahldivergenz ist.“

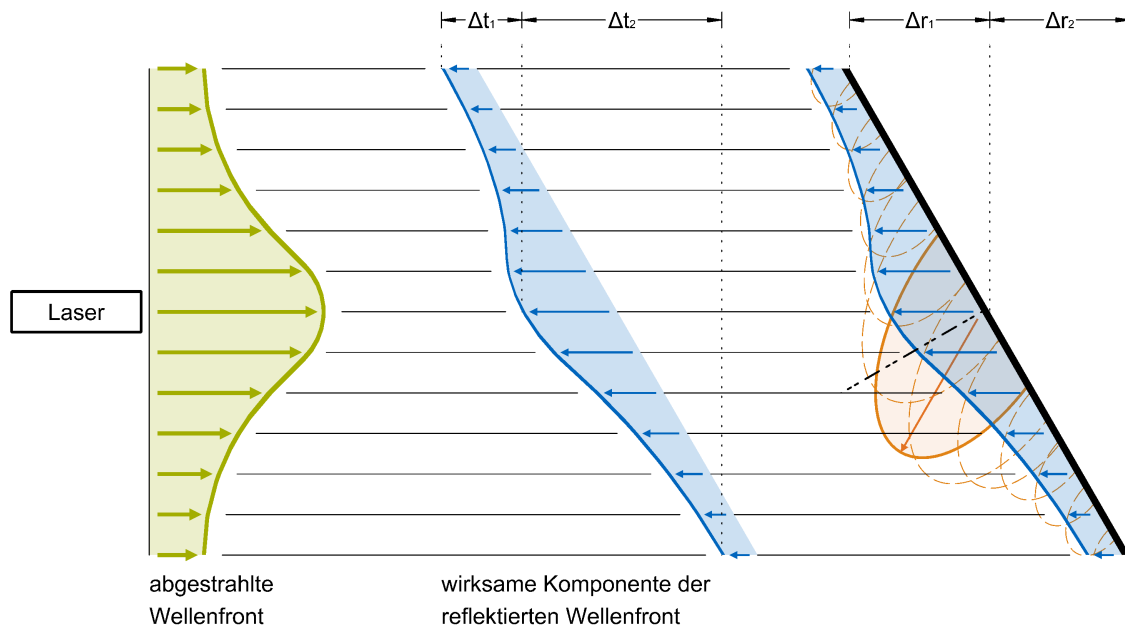


Abbildung 5.3: Veränderung der abgestrahlten Wellenfront durch Reflexion an einer geneigten Zielfläche mit Einfallswinkel γ und dessen Auswirkung auf das Entfernungsergebnat (nach Kern (2003))

In der Fachliteratur werden zur analytischen Beschreibung Genauigkeitsmodelle für die Streckenmessgenauigkeit in Abhängigkeit des Auftreffwinkels vorgeschlagen und diskutiert. Abbildung 5.4 zeigt drei Genauigkeitsmodelle, die den rein funktionalen (dimensionslosen) Zusammenhang zwischen Auftreffwinkel ψ als Winkel zwischen Einfallsrichtung und der Oberfläche beschreiben. Auf eine Angabe von weiteren Parametern zur Überführung in eine metrische Größe sei an dieser Stelle verzichtet, da allen Arbeiten unterschiedliche Instrumente zu Grunde liegen und hier keine vergleichende Untersuchung angestrebt wird.

Von Soudarissanane u. a. (2007, 2009) werden durch einen terrestrischen Laserscanner erzeugte Punktwolken hinsichtlich Intensitätsvariationen und ihr Rauschverhalten im Sinne einer Standardabweichung betrachtet. Dabei wird ein Zusammenhang zwischen Rauschniveau und dem Einfallswinkel erkannt und in Anlehnung an das Lambertsche Kosinusgesetz (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.3.2) als $1/\cos$ -Funktion beschrieben. In Abbildung 5.4 wird diese aufgrund der einheitlichen Darstellung des Auftreffwinkels anstelle des Einfallswinkels durch eine $1/\sin$ -Funktion ausgedrückt.

Innerhalb des von Gordon (2008) vorgestellten Ausgleichungsalgorithmus zur Bestimmung von Orientierungs- und Kalibrierparametern terrestrischer Laserscanner werden durch die Einbindung einer Varianzkomponentenschätzung zusätzliche Komponenten des stochastischen Modells geschätzt, um äußere Einflussfaktoren zu beschreiben. Dadurch wird eine realistischere Modellierung der tatsächlichen Messgenauigkeit ermöglicht und eine Abnahme der Distanzmessgenauigkeit mit zunehmender Messentfernung und Einfallswinkel nachgewiesen. Die von Runne (1993) vorgeschlagene Kotangensfunktion zur Beschreibung der Genauigkeit der Streckenmessung auf schräg angezielte Flächen wird hierbei mit einer weiteren Sinusschwingung überlagert, wobei eine Bestimmung des tatsächlichen Fehlereinflusses nicht diskutiert wird. Zámečnicková u. Neuner (2014) berichten von einem experimentell ermittelten Einfluss des Einfallswinkels im Nahbereich von 3,5 bis 5,2 m. Im Unterschied zu früheren Untersuchungen werden hier die gescannten Messpunkte im Nachgang abgesteckt und durch ein Theodolitmesssystem, welches als Bezugsmessung anzusehen ist, analysiert.

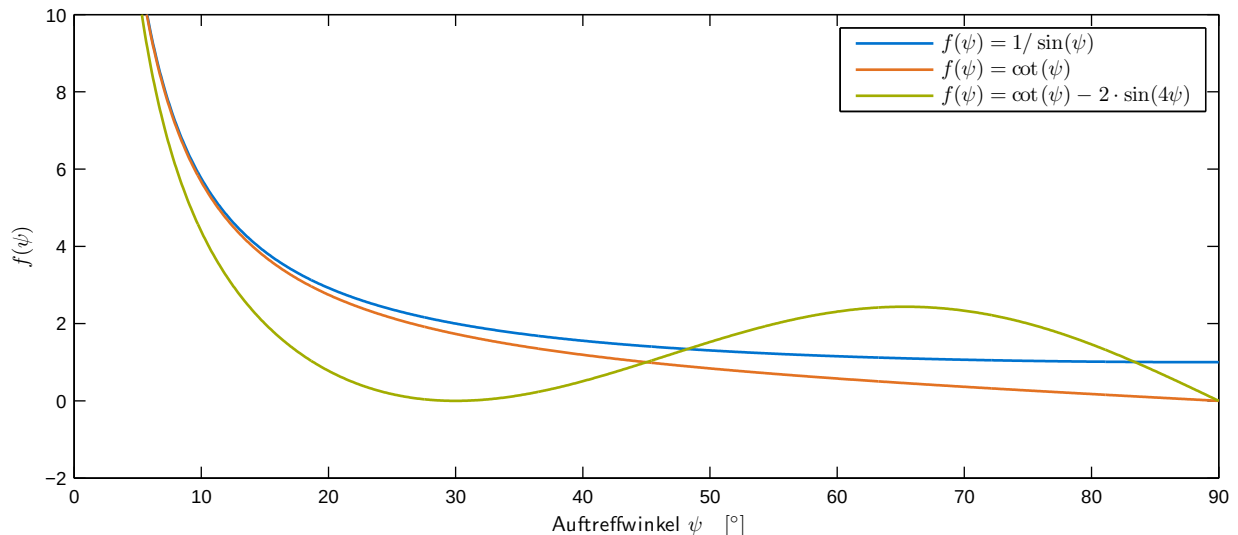


Abbildung 5.4: Genauigkeitsmodelle für die Streckenmessgenauigkeit in Abhängigkeit des Auftreffwinkels

Insbesondere die in diesem Abschnitt dargelegten Studien belegen, dass Zielgeometrie und Einfallswinkel als systematische Einflussgröße bei berührungslosen Distanzmessungen angesehen werden.

5.1.6 Schlussfolgerung

Unternimmt man zunächst den Versuch, alle an der Reflexion beteiligten Einflussfaktoren zusammenzufassen, sind folgende Punkte anzuerkennen:

- Die Laserspotgröße ist abhängig von Messentfernung, Strahldivergenz und Einfallswinkel.
- Die Strahldivergenz kann in Breite und Höhe unterschiedlich sein und der Laserstrahl bereits bei Verlassen der Optik einen elliptischen Querschnitt aufweisen.
- Die Einfallswinkel innerhalb der beleuchteten Objektoberfläche sind i. d. R. nicht konstant – insbesondere bei rauen Oberflächen und Zielpunkten, die kleiner als die Laserspotgröße sind.
- Die Intensitätsverteilung innerhalb eines idealisierten Laserstrahls ist abhängig vom radialen Abstand zur Messachse sowie von der Messentfernung. Aufgrund von Absorption, Streuung, Beugung und Reflexion kommt es zudem zu einer Abschwächung der Intensitäten.

In Anbetracht der komplexen Geometrien von Laserstrahl und Oberfläche erscheint die Formulierung eines funktionalen Zusammenhangs zur Ermittlung des Fehlereinflusses äußerst problematisch. Zwar lässt sich ein idealisierter Laserstrahl, wie im Folgeabschnitt 5.2.1 beschrieben, analytisch formulieren – eine beliebige, reflektierende Oberfläche hingegen lässt sich vereinfacht nur als Dreiecksvermaschung beschreiben. Die Ableitung von Korrekturparametern auf Basis von Labormessungen scheint ebenfalls wenig attraktiv: Zu groß sind die Kombinationsmöglichkeiten aus Messentfernung, Einfallswinkel und Rauheitsklassen unterschiedlicher Oberflächen. Diese Faktoren legen nahe, einen numerischen Ansatz zu entwickeln, in dem die angesprochenen Laser- und Oberflächenparameter einer Simulation unterzogen werden können. Eine solche Simulation umfasst im Wesentlichen die Bereiche der Modellierung eines Laserstrahls, der Berücksichtigung externer Einflüsse auf die Signalabschwächung (Atmosphäre, Abschnitt 5.2.2), der Integration von Testoberflächen (5.3.1), einer Sichtbarkeitsanalyse (5.3.3) sowie die Berücksichtigung von Reflexionsmodellen (5.3.2).

5.2 Modellierung von Laserstrahlen

Seit ihrer nunmehr über 50-jährigen Geschichte sind Laser ein unverzichtbarer Bestandteil unserer modernen Welt und betreffen weitaus mehr als die in Abschnitt 2.2.5 genannten Anwendungen in der Messtechnik. Bei der Auslegung von Resonatoren bzw. bei der Konzeption von Lasersystemen mit einer komplexen Anordnung weiterer optischer Elemente wie Spiegel und Linsen sind vorherige Berechnungen zum Verlauf des Strahlenganges unerlässlich und können mit kommerziellen Softwarelösungen im Sinne von *Optical Design Software* und *Raytracing* durchgeführt werden. Dabei ist neben dem optischen Lichtweg auch die elektrische Feldstärke oder die Verteilung der Lichtintensität in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung und des Radialabstands von der Laserachse von Bedeutung, um beispielsweise die Interaktion zwischen Laserstrahl und Objektoberfläche abschätzen zu können.

Hieraus ergeben sich wiederum Möglichkeiten zur simulationsgestützten Optimierung von Fertigungsprozessen, beispielsweise bei der Lasermaterialbearbeitung. Während im industriellen Umfeld derartige Lasersimulationen in der Planung und Auslegung von einzelnen Fertigungsschritten oder ganzen Produktionsabläufen eingesetzt werden, dienen solche Simulationen im wissenschaftlichen Bereich insbesondere dazu, den Einfluss einzelner Parameter gezielt zu analysieren und dadurch ein verbessertes Verständnis der Vorgänge während eines Prozesses zu erzielen. Aktuelle Forschungsarbeiten (vgl. Brückner u. a. (2007)) beschäftigen sich mit der Entwicklung von Modellierungswerkzeugen zur Simulation thermodynamischer und thermomechanischer Vorgänge beim Laserstrahlschweißen und Laserstrahlbohren. Darüber hinaus werden die Strahlausbreitung und die Strahl-Stoff-Wechselwirkung, wie beispielsweise die Wärmeverteilung und -eindringtiefe, bei der Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Lasern simuliert (Schmidt u. a., 2012).

Um eine derartige Modellierung durchführen zu können, ist zunächst ein tieferes Verständnis über die Ausbreitung von Laserstrahlen erforderlich. Nachfolgende Abschnitte widmen sich daher der mathematischen Beschreibung eines Gauß-Strahls mit dem Schwerpunkt der Strahlgeometrie und der theoretischen Intensitätsverteilung. Zur weiteren Berücksichtigung physikalischer Vorgänge bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie sei auf die in Abschnitt 5.3 beschriebene Simulationsumgebung verwiesen.

5.2.1 Der Gauß-Strahl

Da die geometrische Optik auf der Annahme beruht, dass sich Licht geradlinig als ein Bündel von Lichtstrahlen ausbreitet, diese Annahme in der Realität aufgrund der Welleneigenschaft des Lichts jedoch erheblichen Abweichungen unterliegt, ist die allgemeine Beschreibung des Lichts als elektromagnetische Welle durch die Maxwell-Gleichungen unzureichend. Insbesondere bei der Ausbreitung seitlich begrenzter Lichtbündel ist festzustellen, dass eine ebene Welle ihr Intensitätsprofil im Strahlverlauf ändert. Graf (2009) und Eichler u. Eichler (2015) beschreiben die hierfür erforderliche Umformung, um eine zeitfreie Wellengleichung zu erhalten, die als Grundstein für den so genannten Gauß-Strahl anzusehen ist.

In der Optik versteht man unter einem Gauß-Strahl jene elektromagnetische Strahlung, deren transversales (quer zur Ausbreitungsrichtung liegendes) elektrisches Feld und die Intensitätsverteilungen durch Gauß-Funktionen angenähert werden können. Eine solche Intensitätsverteilung ist bei vielen Lasern, die aufgrund ihres Resonators in einem Grund-Transversalmodus betrieben werden, zu beobachten. Da zudem nach der Brechung an Linsen ein Gauß-Strahl lediglich in einen anderen Gauß-Strahl mit neuen Parametern umgewandelt wird, stellt er ein effizientes und weit verbreitetes Modell in der Laseroptik dar und soll daher im Folgenden vertieft werden. Das mathematische Modell zur Beschreibung von Gauß-Strahlen beruht auf einer Lösung der paraxialen Form der Helmholtz-Gleichung (Graf, 2009) und stellt die komplexe Amplitude des elektrischen Feldes des Laserstrahls dar. In Kombination mit dem magnetischen Feld lässt sich der Strahl als eine elektromagnetische Welle ausdrücken, wobei nach (Pedrotti u. a., 2007) die Beschreibung von nur einem der beiden Felder ausreicht, um die Eigenschaften des Strahls zu formulieren.

5.2.1.1 Transversale elektromagnetische Moden (TEM)

Wie bereits angeklungen, können Laser nicht nur in ihrem Grund-Transversalmodus betrieben, sondern in verschiedenen transversalen Feldverteilungen angeregt werden. Da die meisten Laser in nur einer dieser sogenannten Strahlungsmoden emittieren, ist in der Lasertechnik die Unterscheidung des Strahlungsfeldes nach den transversalen elektromagnetischen Moden (TEM) gebräuchlich (Linos, 2006). Diese TE-Moden ergeben sich für Resonatoren mit rechteckigen Spiegeln durch das Produkt zweier Hermitescher Polynome und werden durch zwei Indizes gekennzeichnet, die die Anzahl der Nullstellen des elektrischen Feldes in der Transversalebene (xy-Ebene) wiedergeben. Ein TEM_{mn} hat demnach m Nullstellen in x-Richtung und n Nullstellen in y-Richtung.

Im Falle von zylindersymmetrischen Resonatoren werden die Moden jedoch durch ein Produkt aus Laguerre-Polynomen und Gaußfunktionen beschrieben (Nörtershäuser, 2009). Da für zylindersymmetrische Geometrien die Verwendung von Zylinderkoordinaten angebracht ist, hat sich hierfür die Bezeichnung TEM_{pl} etabliert, bei der die Indizes die Anzahl der radialen und azimuthalen Dunkelstellen im Intensitätsmuster repräsentieren – mit wachsendem p erhöht sich dabei die Zahl der konzentrischen Ringe. Die resultierenden Muster der transversalen Intensitätsverteilung zylindrischer TE-Moden ist in Abbildung 5.5 veranschaulicht.

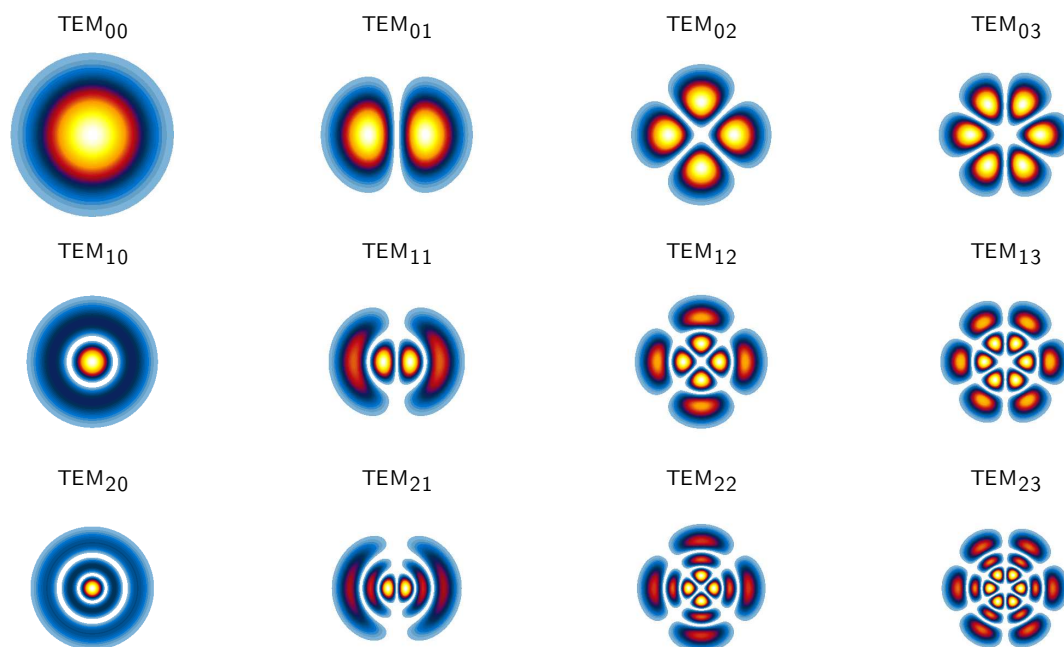


Abbildung 5.5: Transversale Intensitätsmuster zylindrischer TE-Moden (TEM_{pl}) auf Basis der Laguerre-Polynome

Strahlung im Modus TEM_{00} wird als Gauß-Strahl bezeichnet und weist, sowohl für Hermite-Gauß-Moden als auch für Laguerre-Gauß-Moden, keine Nullstellen auf. Ein Gaußscher Strahl zeichnet sich durch eine Beugungsbegrenzung auf, was bedeutet, dass bei ihm das Produkt aus Strahldivergenz und minimalem Strahlradius entlang der Ausbreitungsrichtung konstant ist und – im Vergleich zu jedem anderen Strahlungsmodus – den kleinstmöglichen Wert annimmt. Daher werden Laser nach Möglichkeit so konstruiert, dass sie Strahlung im TEM_{00} emittieren. Der TEM_{00} hat also erhebliche Bedeutung für die Praxis und wird häufig als Näherung für höhere Strahlungsmoden verwendet (Hecht, 2005). Auf Grundlage dieses Umstandes werden im Anschluss an die Einführung der wesentlichen Kenngrößen (5.2.1.2) die idealisierten Intensitätsverteilungen (5.2.1.3) innerhalb eines (u. U. elliptischen) Gauß-Strahls betrachtet.

5.2.1.2 Geometrische Strahlkenngrößen

Für ein besseres Verständnis der mathematischen Beschreibung eines Gauß-Strahls seien zunächst die elementaren Begriffe und Kenngrößen zur Beschreibung der Strahlgeometrie sowie der Haupteigenschaften der Intensitätsprofile kurz erläutert.

Für die Darstellung eines Gauß-Strahls werden üblicherweise Zylinderkoordinaten verwendet. Dabei wird die Ausbreitungsrichtung als z -Achse definiert und der radiale Abstand r von der Ausbreitungsachse zur Darstellung des Strahlrandes herangezogen. Aus Abbildung 5.6 ist als dritte Komponente die Laserintensität zu entnehmen. Die Intensitätsverteilung lässt sich in zwei Hauptrichtungen untergliedern: Für die geometrische Beschreibung ist dabei zunächst nur das transversale Profil der TEM_{00} ausschlaggebend. Es ist gaußförmig und die Intensität fällt senkrecht zur Strahlachse in Form einer radialsymmetrischen Glockenkurve ab. Da die Gaußfunktion mit zunehmendem radialen Abstand langsam ausläuft, wird der Rand des Laserstrahls willkürlich definiert und es gilt für den gaußschen Strahlradius w derjenige radiale Abstand von der Strahlachse, bei dem die Intensität auf $1/e^2$ der Maximalintensität I_0 auf der Strahlachse abgefallen ist bzw. 13,5% des Maximalwertes beträgt (Eichler u. Eichler, 2015; Meschede, 2005). Weitere Verfahren zur Bemessung des Strahlrandes werden in Abschnitt 5.2.3 und 5.2.3.4 diskutiert.

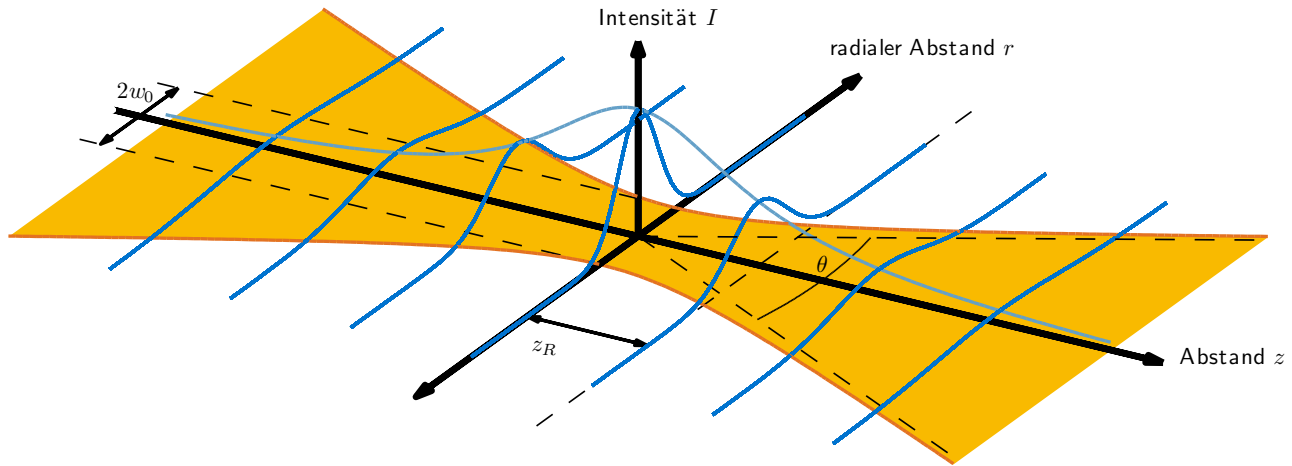


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der geometrischen Strahlkenngrößen und Intensitätsprofile eines Gauß-Strahls

Der minimale Strahldurchmesser wird als Strahltaile (engl.: *waist*) bezeichnet und mit dem Parameter $2w_0$ deklariert. Im Abstand der sog. Rayleigh-Länge z_R weitet sich der Strahlradius auf das $\sqrt{2}$ -fache auf. Eine wesentliche Charakteristik im Zusammenhang mit dem entfernungsabhängigen Strahlradius ist schließlich der Divergenzwinkel θ im Fernfeld.

5.2.1.3 Intensitätsverteilung

Die optische Intensität I ist die optische Leistung P pro Flächeneinheit, die auf eine gedachte Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung aufgebracht wird. Die Einheiten der optischen Intensität (oder Lichtintensität) sind demnach W/m^2 oder (häufiger) W/cm^2 (Paschotta, 2008). Obwohl die Intensität im Experiment schwerer zugänglich ist als die Leistung, wird zur Beschreibung eines Laserstrahls oftmals auf die Intensitätsverteilung zurückgegriffen. Sofern Laserstrahlen mit zylinderhutförmigen transversalen Profilen (beispielsweise mit einem konstanten Intensitätswert innerhalb eines Bereiches nahe der Laserachse und einem rapiden Intensitätsverlust außerhalb dieses Bereiches) betrachtet werden, ergibt sich die Intensität aus der Division der optischen Leistung durch die Fläche des Laserspots. Für gaußförmige Profile mit einem Strahlradius w ergibt sich der Zusammenhang zwischen Intensität und Leistung jedoch nach (Eichler u. Eichler, 2015) zu

$$I_0 = \frac{2P_0}{\pi w^2}. \quad (5.2)$$

Das hier dargestellte Intensitätsmaximum I_0 liegt ebenso wie die maximale Leistung P_0 stets auf der Laserachse ($r = 0$). Die Maximalleistung bei Austritt aus dem Resonator ($z = 0$) ist dem Datenblatt des Lasers zu entnehmen. Im weiteren Verlauf wird die Ausgangsintensität stetig in zwei Dimensionen abgeschwächt: entlang der Ausbreitungsrichtung z und orthogonal hierzu. Man spricht hierbei auch von einem axialen und einem transversalen Profil, welche sich wie im Folgenden näher beschrieben durch ein Lorentz- und ein Gauß-Profil ausdrücken lassen.

Betrachtet man zunächst das transversale Profil eines gaußförmigen Strahls, so ist festzuhalten, dass die Intensität mit zunehmendem radialen Abstand r von der Laserachse exponentiell abnimmt und durch

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (5.3)$$

beschrieben wird (Hecht, 2005). Sowohl die Intensität auf der Strahlachse I_0 als auch die Strahlbreite w sind des Weiteren abhängig von der Entfernung entlang der Ausbreitungsrichtung z und somit direkt mit dem axialen Intensitätsprofil verbunden. Die Geometrie des resultierenden transversalen Profils ist durch die entfernungsabhängige Parameterfunktion

$$\omega(z) = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (5.4)$$

charakterisiert und liefert den Strahlradius bzw. den Rand des Strahls $\omega(z)$ unter Berücksichtigung der Strahl-
taille ω_0 . Da die Strahl-
taille für vielen Anwendungen als minimalen Radius beim Austritt des Laserstrahls aus der Optik eines EDM-Senders angenommen werden kann, sei infolgedessen für weitere Betrachtungen die Annahme $\omega_0 = \omega(0)$ getroffen.

Die in (5.4) enthaltene Größe z_R wird als Rayleigh-Länge bezeichnet und ergibt sich aus dem Zusammenspiel der Strahl-
taille und der Wellenlänge zu

$$z_R = \pi \cdot \frac{\omega_0^2}{\lambda}. \quad (5.5)$$

Das axiale Lorentz-Profil beruht auf der Überlegung, dass bei freier Strahlausbreitung keine Energie verloren geht und sich demnach die Intensitäten im Strahlzentrum umgekehrt proportional wie die Quadrate der Strahlradien verhalten (Kück, 2003), folglich gilt

$$I_0(z) = I_{0,0} \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega(z)^2}. \quad (5.6)$$

$I_{0,0}$ entspricht dabei dem absoluten Intensitätsmaximum, das an der Stelle $r = 0$ und $z = 0$ vermutet werden darf.

Die Zusammenführung von (5.3) und (5.7) ermöglicht schließlich eine räumliche Formulierung der Intensitätsverteilung eines Laserstrahls, welche sich durch die Zylinderkoordinaten r und z wie folgt darstellen lässt

$$I(r, z) = I_{0,0} \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)}\right)^2 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right). \quad (5.7)$$

Der hier dargestellte Strahl ist zylindersymmetrisch um die Ausbreitungsachse z und weist somit ein kreisförmiges Querprofil auf. Ein solcher Strahl wird als stigmatisch bezeichnet und stellt lediglich ein Sonderfall dar. Treffen nämlich zylindersymmetrische Strahlen bereits innerhalb des Resonators unter einem Winkel auf sphärische Spiegel oder im weiteren Strahlverlauf auf optische Linsen, führt dies zu einer Asymmetrie des Strahls (Graf, 2009), welche durch ein elliptisches Querprofil und/oder astigmatische Fokusse zum Ausdruck kommt.

Infolgedessen sind für elliptische Querprofile zwei unterschiedliche Strahlradien $\omega_x(z)$ und $\omega_y(z)$ in den beiden transversalen Komponenten anzusetzen, die sich nach (5.4) unabhängig voneinander errechnen und sich durch eine Exzentrizität ausdrücken lassen. Wie aktuelle Bestrebungen in der Produktentwicklung elektro-optischer Entfernungsmessinstrumente zeigen (Zogg u. a., 2009), unternehmen Gerätehersteller den Versuch, ebendieses elliptische Strahlprofil durch den Einbau einer anamorphen Linse sowie einer Blendenvorrichtung

zu korrigieren und in einen zylindersymmetrischen Strahlquerschnitt zu transformieren. Da diese Weiterentwicklung derzeit noch nicht als Standard anzusehen ist und nach wie vor Sensoren ohne diese Korrektur zum Einsatz kommen, sei abschließend der Übergang zum elliptischen Strahlprofil aufgeführt. Hierfür ist der bisher angesetzte radiale Abstand zunächst über den Satz des Pythagoras und schließlich als Produkt zweier Exponentialfunktionen zu formulieren, woraus sich die kartesische Darstellung einer dreidimensionalen Intensitätsverteilung ergibt

$$I(x, y, z) = I_{0,0} \left(\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2x^2}{\omega_x^2(z)} \right) \exp \left(-\frac{2y^2}{\omega_y^2(z)} \right). \quad (5.8)$$

Mit Hilfe der Formel (5.8) ist eine vollständig räumliche Beschreibung von Intensitätswerten in einem kartesischen Koordinatensystem möglich. Der Vorteil der kartesischen Betrachtungsweise erleichtert dabei die detaillierte Betrachtung der Intensitätsverteilungen innerhalb einer Simulationsumgebung, wie sie in Abschnitt 5.3 umgesetzt wird.

5.2.1.4 Beugungsmaßzahl

Aufgrund seiner minimalen Divergenz ist der Gauß-Strahl für viele technische Anwendungen optimal. In der Praxis werden jedoch oft von diesem Idealfall abweichende Laserstrahlen mit unterschiedlichen Fokussierungen eingesetzt (Eichler u. a., 2004). Zur analytischen Beschreibung der Intensitätsverteilung eines modifizierten Gauß-Strahls kann nach (Przeslakowski, 2007) Gleichung (5.8) formal beibehalten werden, wenn die um die Beugungsmaßzahl M^2 erweiterte Wellenlänge

$$\lambda' = \lambda \cdot M^2 \quad (5.9)$$

eingeführt wird. Die Beugungsmaßzahl M^2 ist eine dimensionslose Zahl und beschreibt prinzipiell die Fokussierbarkeit von Lasern. Damit stellt sie eine wesentliche Kenngröße zur Qualitätsbeschreibung von Laserstrahlen dar und wird durch den reziproken Wert als Strahlqualität K bezeichnet. Geometrisch betrachtet ist die effektive Beugungsmaßzahl als Vergleichswert zwischen dem vorherrschenden Divergenzwinkel und der Divergenz eines idealen Gauß-Strahls mit gleichem Durchmesser an der Strahltaile zu verstehen (Eichler u. a., 2004). Der Divergenzwinkel im Fernfeld wird dann mit

$$\theta = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (5.10)$$

beschrieben. Da oftmals die Herstellerangaben nähere Auskunft über die Divergenzeigenschaften (direkt oder indirekt über die Spotdurchmesser in diversen Entfernungen) des Laserstrahls geben, kann 5.10 nach M^2 aufgelöst genutzt werden, um für eine Anpassung der Strahlgeometrie zu sorgen. Für elliptische Strahlen können zudem zwei unterschiedliche Beugungsmaßzahlen in den orthogonal zur Laserachse verlaufenden Richtungen x und y angesetzt werden (Paschotta, 2008).

Weitere Einzelheiten zur Bestimmung der Beugungsmaßzahl sind Kapitel 5.2.3 zu entnehmen. Für eine normgerechte Ermittlung dieser Strahlcharakteristik sei jedoch auf die ISO-Norm 11146 (ISO, 2005a) verwiesen.

Abbildung 5.7 gibt die theoretische Intensitätsverteilung und Geometrie eines modifizierten Gauß-Strahls wieder, die auf Basis des berührungslos messenden Distanzmessmoduls eines Leica TCRA1101 erstellt wurde. Mit einer Laserspotgröße von $2 \times 1 \text{ cm}^2$ in einem Abstand von 50 m (Zeiske, 1999) kann für das Fernfeld ein Divergenzwinkel von $\theta = 4 \times 2 \text{ mrad}$ abgeleitet werden, woraus sich nach Formel (5.10) unter der Kenntnis der Wellenlänge sowie der Strahltaillen die Beugungsmaßzahlen $M_x^2 = 6,7$ und $M_y^2 = 7,7$ ermitteln lassen.

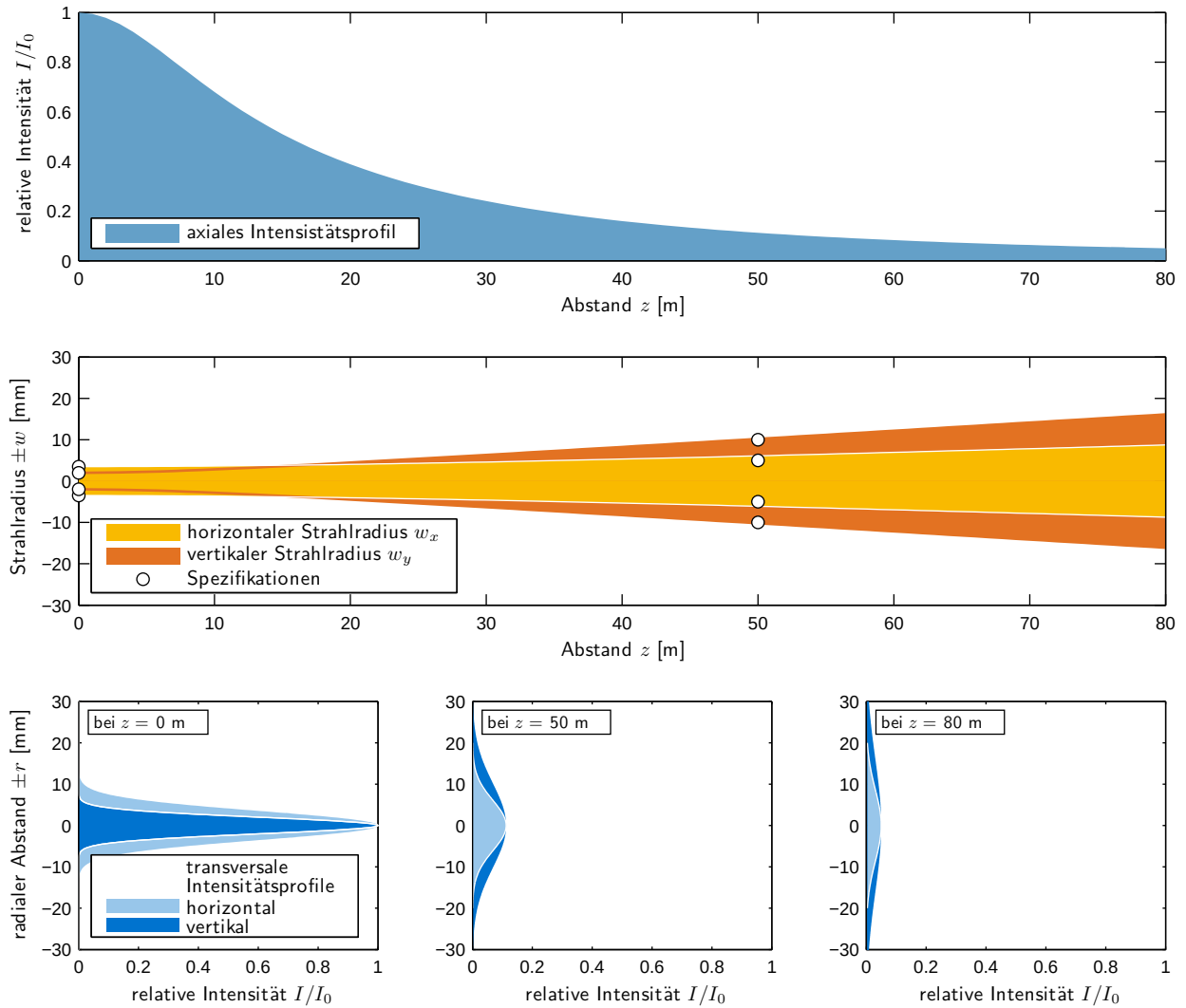


Abbildung 5.7: Modifizierter Gauß-Strahl des RL-EDM eines Leica TCRA1101. Oben: Intensitätsprofil (Lorentz-Profil) entlang der Ausbreitungsrichtung. Mitte: Strahlradien sowie die Gegenüberstellung mit den Herstellerangaben. Unten: drei Intensitätsprofile (Gauß-Profile) quer zur Ausbreitungsrichtung beim Austritt aus dem Resonator, in einer Entfernung von 50 m und bei maximaler Reichweite.

5.2.2 Modellierung der Atmosphäre

Bereits in Abschnitt 5.2.1.3 wurde das Intensitätsprofil entlang der Ausbreitungsrichtung als Lorentz-Profil durch Formel (5.6) beschrieben. Die darin postulierte Annahme, dass bei freier Strahlausbreitung keine Energie verloren geht, bezieht sich allerdings nur auf den leeren Reiraum. Aufgrund von Absorption, Streuung, Beugung und Reflexion kommt es jedoch auch zu einer Abschwächung der Intensitäten entlang der Wegstrecke innerhalb der Atmosphäre (Petrie u. Toth, 2009). Dieser als Extinktion bezeichnete Vorgang wird durch das Lambert-Beersche Gesetz beschrieben und kann zur Bestimmung der Intensität

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\epsilon c z} \quad (5.11)$$

nach Durchlaufen der Strecke z ausgehend von der Intensität der Ausgangsstrahlung I_0 herangezogen werden. Das im Exponent enthaltene Produkt aus dem molaren Extinktionskoeffizienten ϵ und der Konzentration c der Probe wird als Schwächungskoeffizient β bezeichnet und ist durch die Materialeigenschaften des Mediums festgelegt. In der wolkenfreien Atmosphäre setzt sich dieser aus den Streu- und Absorptionskoeffizienten der Luft und des Aerosols zusammen (Baldenhofer, 2012), so dass für (5.11) auch

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-(k_\lambda + \sigma_\lambda)z} \quad (5.12)$$

geschrieben werden kann. Nach Tradowsky (1983) kann der Streukoeffizient σ_λ experimentell aus der Sichtweite S näherungsweise zu

$$\sigma_\lambda = \frac{3,9}{S} \cdot \left(\frac{0,53}{\lambda} \right)^{0,62 \cdot S^{1/3}} \quad (5.13)$$

ermittelt werden. Hierin erkennbar ist die Abhängigkeit von der Wellenlänge λ . Ansonsten ist für den Schwächungskoeffizienten eine Proportionalität zur Wellenlänge gegeben, die in der Literatur (z. B. von Joeckel u. a. (2008)) mit $\beta \sim \frac{1}{\lambda^4}$ angegeben wird. Da die Abschwächung also neben der Zahl der streuenden und absorbierenden Teilchen pro Volumeneinheit auch von der Wellenlänge abhängig ist, erzielen elektromagnetische Distanzmessgeräte mit infraroter Strahlung höhere Reichweiten als solche, die im sichtbaren Spektrum operieren.

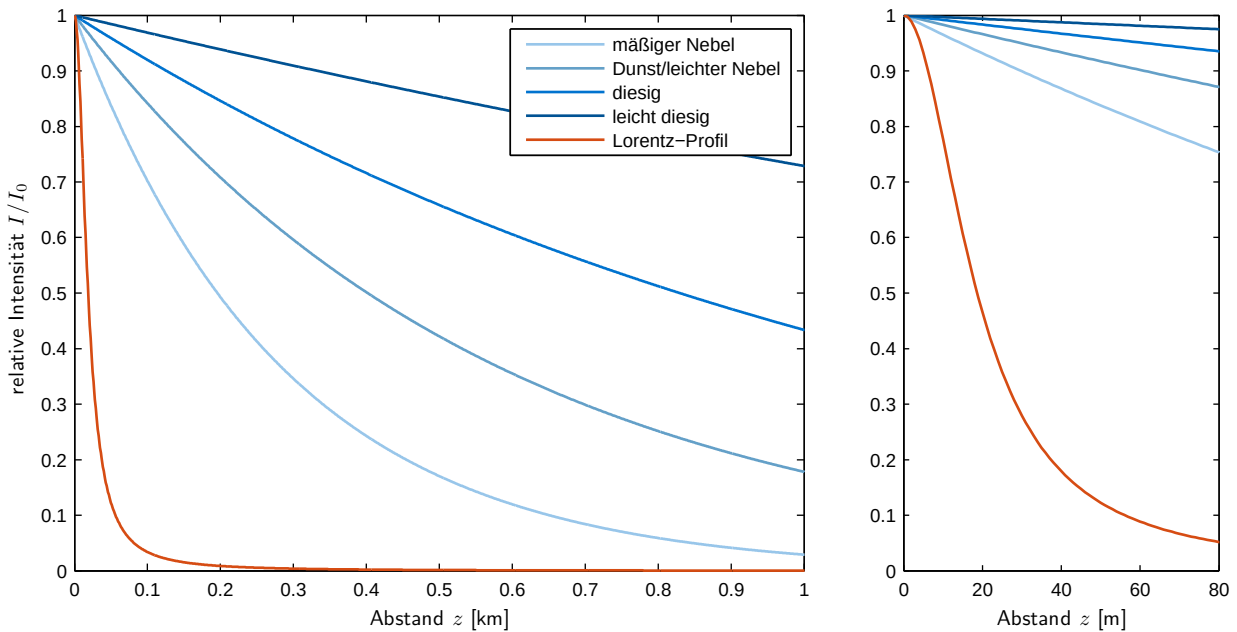


Abbildung 5.8: Abschwächung der Laserintensität aufgrund atmosphärischer Streuung und Strahldivergenz

Abbildung 5.8 (links) zeigt die streuungsbedingte Abschwächung für eine Reichweite von 1 km bei unterschiedlichen Sichtweiten zwischen 1 und 10 km. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass dieser Anteil auch bei mäßigen Sichtverhältnissen deutlich geringer ausfällt, als die Intensitätsverluste, die ein Laser aufgrund seiner Strahldivergenz hinnehmen muss. Beschränkt man sich auf einen berührungslos arbeitenden Entfernungssensor mit einer Reichweite von 80 m (Abbildung 5.8, rechts), so beträgt beispielsweise die Extinktion für ein mit der Wellenlänge von 620 nm operierender Laser bereits 24,4% bei einer Sichtweite von 1 km und lediglich 2,5% bei einer Sichtweite von 10 km. Dem gegenüber steht jedoch ein Verlust von 94,7% aufgrund der Strahldivergenz.

Für eine vollständige Modellierung der Intensitäten innerhalb der Messatmosphäre sind diese beiden Effekte zu überlagern. Bedenkt man, dass sowohl bei der Reflexion an einer Oberfläche (vgl. Kapitel 5.1.4), aber zusätzlich für den Rückweg des Signals zum Empfänger ebenfalls diese Intensitätsverluste anzusetzen sind, wird deutlich, mit welcher geringen Empfangssignalen zu rechnen ist. (Brenner, 2006) und (Petrie u. Toth, 2009) stellen zur Abschätzung eine Leistungsbilanz von Laserpulsen eines ALS-Systems auf.

5.2.3 Reale Intensitätsverteilung eines Laserstrahls

Laserstrahlung wird im Allgemeinen durch diverse Eigenschaften, wie die mittlere Leistung, den Strahldurchmesser, die Strahldivergenz sowie die Farbe, Wellenlänge oder Frequenz charakterisiert. Die bisher vorgestellten Methoden zur Charakterisierung eines Gauß-Strahls basieren auf theoretischen Strahlungsmodellen

und entsprechen naturgemäß einem unter realen Bedingungen vorherrschenden Strahlverlauf nur bedingt. So weisen reale Laserstrahlen beispielsweise eine höhere Strahldivergenz und bei Fokussierung durch eine Linse größere Strahlradien auf als der Gaußstrahl, was sich bei gleichbleibender Leistung in einer verringerten Leistungs- und Strahldichte bemerkbar macht.

Die bereits vorgestellte Beugungsmaßzahl M^2 ermöglicht zwar eine Anpassung der Strahlradien und somit der Strahlgeometrie, die Intensitätsverteilung hingegen weist nach wie vor ein Lorentz- und ein Gauß-Profil auf. Aufgrund Brechungen an optischen Bauteilen, Beugungen an Blenden sowie atmosphärischer Einflüsse wie Refraktion und Szintillation sind bei Lasern jedoch vom Gauß-Strahl stark abweichende Strahlen zu beobachten. Dies macht sich beispielsweise in zeitlich und räumlich variierenden Intensitätsverteilungen bemerkbar. Weitere Ursachen können nach Eichler u. a. (2004) das Anschwingen höherer transversaler Moden, Amplituden- oder Phasenstörungen aufgrund einer inhomogenen Verstärkung des Lasermediums oder sich überlagernde Teilstrahlen sein.

Betrachtet man die in Abschnitt 5.2.1.2 vorgestellte Methode zur Bestimmung des Strahlrandes, welche durch das Unterschreiten eines Grenzwertes definiert ist, ist leicht ersichtlich, dass Intensitätsverteilungen, die unterhalb dieser Schwelle liegen, nicht berücksichtigt werden. Um eine zuverlässige Berechnung der realen Strahlgeometrie durchzuführen, ist folglich, wie in den nachfolgenden Formeln (5.14) bis (5.17) zu entnehmen, die Kenntnis über die zweidimensionale Intensitätsverteilung in diversen Entfernungen entlang der Ausbreitungsrichtung und eine Auswertung auf Basis der ersten und zweiten Momente vonnöten. Eine Methode, um diese Intensitäten zu registrieren, basiert auf der direkten Messung mit Hilfe eines CCD-Sensors, wie in Abschnitt 5.2.3.2 vertieft und exemplarisch dargestellt wird. Kommerzielle Laseranalysesysteme, sog. *Laser Beam Profiler*, erfassen ebendiese zweidimensionale Intensitätsverteilung quer zum Strahlengang und erlauben eine räumliche Abbildung der Intensitäten und bieten darüber hinaus oftmals auch die Möglichkeit, Stabilitätsbeobachtungen durchzuführen, um beispielsweise den Einfluss externer Störgrößen auf den Strahlverlauf zu analysieren. Da es eine große Vielfalt (ultraviolette, sichtbare, Infrarot, kontinuierlichen Welle, gepulste, High-Power, stromsparenden) von Lasern gibt, ist jedoch kein Analysesystem für jede Leistungsstufe, Pulsdauer, Wiederholungsrate, Wellenlänge und Strahlradius geeignet. Eine Auswahl verfügbarer Analysesysteme für Basisanwendungen ist Tabelle 5.1 zu entnehmen. Dieser sind zusätzlich herkömmliche CCD- und CMOS-Sensoren aktueller digitaler Spiegelreflexkameras aus dem Amateur- und Profibereich gegenübergestellt, darunter auch die Nikon D3000, wie sie für die angewandten Messverfahren eingesetzt wird.

Tabelle 5.1: Eigenschaften kommerzieller Laseranalysesysteme und Systemkameras (Auswahl, Angaben entnommen aus dem Web-Portal digitalkamera.de, 2016)

System (Hersteller)	Wellenlänge [nm]	Sensorgröße [mm ²]	Auflösung [Pixel]	Pixelabstand [μm]	Frequenz [fps]	Farbtiefe [Bit]
BeamProfiler (Metrolux)	320-1100	9.0×6.7	1392×1040	6.5	14.8	14
CinCamCCD-2302 (Cinogy)	350-1100	8.5×7.1	2452×2056	3.4	6.0	14
L11058 (Ophir Photonix)	190-1100	36.0×24.0	4008×2672	9.0	3.1	12
D3000 (Nikon)	k. A.	23.6×15.8	3872×2592	6.1	3.0	36
D3x (Nikon)	k. A.	36.0×23.9	6048×4032	6.0	5.0	42
EOS-1Ds Mark III (Canon)	k. A.	36.0×24.0	5616×3744	6.4	5.0	42
EOS 500D (Canon)	k. A.	22.3×14.9	4752×3168	4.7	3.9	42

Neben des auf die Wellenlänge des Lasers abgestimmten Farbspektrums der CCD-Kamera ist die aktive Sensorfläche ein wesentlicher Faktor, der bei der Auswahl des Systems in Betracht gezogen werden muss, da er für die zu vermessende Strahlgröße ausschlaggebend ist. Die begrenzte Ausdehnung verfügbarer und gleichzeitig preiswerter CCD-Sensoren lässt nämlich nur die Vermessung geringer Strahlradien zu, was für im Fernfeld divergierende Strahlen im Umkehrschluss bedeutet, dass die Reichweite der Vermessung limitiert bleibt. Damit der gesamte Strahl vollständig abgebildet werden kann, so lautet eine Empfehlung von (Laser2000, 2005), sollte der Strahldurchmesser nach der Methode $1/e^2$ nicht mehr als 80% der Höhe oder Breite des aktiven Sensorbereichs betragen. Dadurch wird in der Regel ein hinreichend großer Bereich geschaffen, um auch die Randbereiche abbilden und die Strahldrift messen zu können. Für kritische Strahlmessungen wie z. B. die Bestimmung des Strahldurchmessers nach der Methode der zweiten Momente ($D4\sigma$) sollte dieser Durchmesser nicht mehr als die Hälfte der Sensorhöhe oder -breite betragen.



Abbildung 5.9: Messkonfiguration für die direkte Laserabbildung auf einen CCD-Sensor



Abbildung 5.10: Messkonfiguration für die indirekte Laserabbildung über eine Projektionstafel

Um jedoch auch Laserstrahlen mit größeren Divergenzwinkeln in großer Entfernung, z. B. bei Laserspotgrößen von $10 \times 20 \text{ mm}^2$ in 80 m, vollständig abbilden zu können, genügen die Abmessungen der in Tabelle 5.1 aufgeführten Sensoren nicht mehr den Anforderungen. Zur Lösung dieser Einschränkung existieren unterschiedliche Varianten: Für kommerzielle Laseranalysesysteme ist die Nutzung sog. *TaperCams* möglich. Bei diesen Kameras befindet sich vor dem Sensor ein faseroptischer *Taper*, d. h. ein präzise angeordnetes Bündel aus Glasfasern. Die besondere Eigenschaft dieser Bündel besteht darin, dass der aktive Kern der Glasfasern an der Eintrittseite größer ist als an der sensorseitigen Austrittsstelle. Dies soll nach Angaben des Herstellers Laser2000 (2005) eine verzerrungsfreie Abbildung und eine Verkleinerung der auftretenden Intensitätsverteilung auf dem CCD-Chip ermöglichen. Dennoch ist auch dieser Verkleinerungsfaktor limitiert und ermöglicht maximal Abbildung von Laserspots der Größe $20 \times 15 \text{ mm}^2$. Daher wurden zwei weitere Möglichkeiten der bildmesstechnischen Analyse von Laserstrahlquerschnitten angewendet. Zunächst (Abschnitt 5.2.3.2) wird das Konzept der direkten Beleuchtung eines CCD-Chips durch eine versetzte Kameraanordnung erweitert. Dabei entsteht eine Serie von sich überlappenden Einzelaufnahmen, die in einem *Stitching*-Prozess zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden können. Alternativ hierzu kann ein Abbild des Lasers über eine indirekte Aufnahme vorgenommen werden (Abschnitt 5.2.3.3). Hierzu ist es erforderlich, dass eine diffus reflektierende, ebene Fläche mit einheitlichem Reflexionsvermögen vom Laser beleuchtet wird. Der Vorteil in dieser Methode besteht darin, dass nahezu keine Grenzen für den Laserstrahldurchmesser gegeben sind. Der einschränkende Faktor ist die Lichtintensität, die von Kamera und einem lichtstarken Objektiv einzufangen sind.

In beiden umgesetzten Verfahren werden schlussendlich die aus RGB-Informationen abgeleiteten Grauwerte analysiert. Es ist daher anzumerken, dass die Verfahren keinen Bezug zu einer absoluten Intensität oder Laserleistung herstellen können. Zwar wäre dies grundsätzlich über eine kalibrierte Nulllinie denkbar, aufgrund der zur Verfügung stehenden Laborausstattung wird auf eine solche Umrechnung jedoch verzichtet. Dafür lässt sich aus den Grauwertinformationen aufgrund der Farbtiefe von je 12 Bit für die drei Farbkanäle R, G und B eine zuverlässige Beschreibung der relativen Intensitätsverteilungen ableiten.

Neben der Laserstrahlvermessung mit CCD-Sensoren sind in ISO 11146 (ISO, 2005a) und (ISO, 2005b) weitere Verfahren mit einer reduzierten messtechnischen Anforderung vorgesehen. Diese Verfahren nutzen bewegliche Bauelemente, die sich durch den Laserstrahl bewegen und diesen inkrementell abtasten. Als bewegliches Element kommen hier insbesondere ein beweglicher Spalt oder eine bewegliche Schneide zum Einsatz. Als letzte Variante ist zur Beobachtung kreissymmetrischer Intensitätsverteilungen eine variable kreisförmige Apertur vorgesehen, bei dem die Apertur nicht bewegt, sondern lediglich deren Durchmesser verändert

wird. Der Vorteil dieser drei Verfahren besteht in der Fähigkeit, auch Laserstrahlen hoher Leistung erfassen zu können, ohne die Messvorrichtung, also den CCD-Sensor, zu gefährden.

5.2.3.1 Bestimmung von Laserstrahlparametern aus CCD-Aufnahmen

Bevor die praktische Durchführung der Messreihen mittels CCD-Technologie und deren Ergebnisse vorgestellt werden, sollen zunächst die Voraussetzungen und die analytische Methode zur Bestimmung von Laserstrahlparametern aus CCD-Aufnahmen erläutert werden:

Da für eine exakte Messung die peripheren Strahlungsanteile, die mit einer quadratischen Gewichtung in radialer Richtung in die Berechnung eingehen, mit hoher Genauigkeit einbezogen werden müssen, ist zum einen die Definition des Integrationsbereiches sowie zum anderen die Bestimmung der Nulllinie des Bildes erforderlich. Die Nulllinie besagt, dass Bildbereiche ohne Einwirkung von Laserenergie den Wert Null annehmen. Dabei sind ein Versatz der Grauwertminima und eine Eliminierung der Rauschkomponenten erforderlich. Dies kann über eine mehrfache Erfassung der Szenerie ohne Lasereinwirkung erfolgen. Die Standardabweichung dieser Aufnahmen beschreibt dabei das Rauschniveau und der Mittelwert gibt Aufschluss über die Abweichung zur besagten Nulllinie. Letzteres kann rechnerisch für alle weiteren Aufnahmen, auch mit abgebildetem Laserspot, korrigiert werden. Aufgrund des Sensorrauschens entstehen hierdurch allerdings auch negative Anteile, die in die nachfolgenden Berechnungen einfließen.

Erst nach diesen Vorarbeiten erfolgt die Bestimmung der wesentlichen Parameter wie des Strahlmittelpunktes und der Strahlradien. Zur objektiven Charakterisierung der Laserstrahlparameter sind nach ISO 11146 (ISO, 2005a) die ersten und zweiten Momente der zweidimensionalen Intensitätsverteilung in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrecht liegenden Ebene heranzuziehen.

Die ersten Momente ergeben sich in diesem Fall folglich aus den intensitätsgewichteten Pixelkoordinaten der entzerrten Laserfotografien dividiert durch die integrierte Laserintensität des gesamten Beobachtungsausschnitts. Das Ergebnis entspricht analog zur Mechanik einem Massenschwerpunkt und liefert den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung, respektive den Strahlmittelpunkt

$$\langle x(z) \rangle = \frac{\int x I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy} \quad \text{und} \quad \langle y(z) \rangle = \frac{\int y I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy}. \quad (5.14)$$

Die zentrierten zweiten Momente werden auch als Varianz bezeichnet und sind ein Maß für die Streuung der Intensitäten um den zuvor bestimmten Schwerpunkt. Die Varianzen ergeben sich zu

$$\langle x^2(z) \rangle = \frac{\int (x - \langle x \rangle)^2 I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy} \quad \text{und} \quad \langle y^2(z) \rangle = \frac{\int (y - \langle y \rangle)^2 I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy}, \quad (5.15)$$

woraus sich schließlich die Strahlradien ($D4\sigma$) entlang der Koordinatenachsen aus den doppelten Standardabweichungen der zweiten Momente bestimmen lassen

$$r_x = 2\sqrt{\langle x^2(z) \rangle} \quad \text{und} \quad r_y = 2\sqrt{\langle y^2(z) \rangle}. \quad (5.16)$$

Bei rotationssymmetrischen Verteilungen gilt $r_x = r_y$. Für den TEM₀₀-Mode ergibt die Berechnung die übliche Definition des Strahldurchmessers als Abstand zwischen den Stellen im Strahl, bei denen die Intensität auf $1/e^2 = 13,5\%$ vom Maximalwert abgefallen ist.

Sofern keine rotationssymmetrische Verteilung mit identischen Strahlradien vorliegt, dient als Ergänzung der bisherigen Ortsmomente das gemischte Ortsmoment zweiter Ordnung

$$\langle xy(z) \rangle = \frac{\int (x - \langle x \rangle) \cdot (y - \langle y \rangle) I(x, y, z) dx dy}{\int I(x, y, z) dx dy} \quad (5.17)$$

dazu, die Lage der Hauptachsen der Strahlellipse zu bestimmen. Der Winkel zwischen Ordinate der Ellipsenhalbachse, die näher an der Ordinatenachse liegt, lässt sich anschließend durch

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\langle xy(z) \rangle}{\langle x^2(z) \rangle - \langle y^2(z) \rangle} \quad (5.18)$$

bestimmen und ist nur für $\langle x^2(z) \rangle \neq \langle y^2(z) \rangle$, also nicht kreisförmige Strahlquerschnitte, definiert. Die Orientierung der Hauptachsen stellt dabei eine weitere Größe zur Charakterisierung eines Laserstrahls dar. Bei sich veränderndem Hauptachsenwinkel entlang der Ausbreitungsrichtung spricht man von einem allgemein astigmatischen Strahl. Zur weiteren Unterscheidung von einfach astigmatischen und allgemein astigmatischen Strahlen sei auf Letsch (2009) sowie Eppich (1998) verwiesen.

Die drei zweiten normierten und zentrierten Ortsmomente aus (5.17) und (5.15) beschreiben somit die geometrische Ausdehnung des Strahls. Wird diese Messung in mehreren Ebenen entlang der Ausbreitungsrichtung z durchgeführt, ist eine Beschreibung der räumlichen Geometrie möglich. Es ergeben sich daraus aber zudem sieben weitere zweiten Momente: Diese so genannten Winkel- und Ortswinkelmomente beschreiben die Ausdehnung des Strahls im Fernfeld, die Phasenfronten sowie den Twistparameter. Erst die Kenntnis dieser Parameter ermöglicht eine vollständige Unterteilung des Strahls in die drei verschiedenen Typen stigmatisch, einfach astigmatisch und allgemein astigmatisch. Für eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Messung und der physikalischen Interpretation sei ebenso auf (Letsch, 2009) und (Eppich, 1998) verwiesen.

5.2.3.2 Direkte Abbildung des Laserspots auf einem CCD-Sensor

Nachfolgendes Foto (Abb. 5.11) wurde in einem Abstand von 70 cm zu einer Laserdiode eines TCRA1101+ durch eine direkte Beleuchtung, bzw. ohne kameraseitig angebrachtes Objektiv, des CCD-Chips einer Nikon D3000 Spiegelreflexkamera gewonnen. Die Belichtungszeit beträgt den kameraseitig definierten Minimalwert von 1/4000 Sekunde. Mit einer Sensorgröße von $23,6 \times 15,8 \text{ mm}^2$ und einer Auflösung von 3872×2592 Pixel ($\sim 10 \text{ MP}$) ergibt sich ein Pixelabstand von ca. $6 \text{ }\mu\text{m}$. Etwaige geometrische Sensorverzerrungen oder radio-metrische Störeinflüsse (wie z. B. ein radialer Lichtabfall und Beleuchtungsinhomogenitäten) wurden hierbei vernachlässigt.

Bei dieser detailreichen Darstellung des Laserquerschnitts sind deutliche Abweichungen in Form, aber auch in der Intensitätsverteilung von einem in Abschnitt 5.2.1.3 beschriebenen, idealisierten Querschnitt zu verzeichnen. Der zentrale Bereich mit hohen Intensitäten (gelbe bis weiße Bereiche) erstreckt sich über eine sechseckige Querschnittsfläche mit einer Ausdehnung von etwa 9 mm in der Breite und 5 mm in der Höhe. Diese Grundform ist bei Tageslicht im Nahbereich auch mit bloßem Auge wahrnehmbar. Als wesentliches Merkmal ist die deutlich erkennbare Asymmetrie des Sechsecks zu nennen, wobei das Maximum nicht zentrisch zu liegen scheint. Innerhalb des Zentralbereichs sind zudem teilweise rautenförmig angeordnete Schwankungen in der Intensitätsverteilung zu verzeichnen. Auch wenn an dieser Stelle noch nicht von einem ausgeprägten Streulichtkegel gesprochen werden kann, so ist doch augenscheinlich, dass der Rand nicht eindeutig einzugrenzen ist – wenige Ausschweifungen sowie zahlreiche vom Zentralbereich losgelöste Pixel mit geringen, aber signifikanten Intensitäten geben zu erkennen, dass eine Berücksichtigung der realen Intensitätsverteilung für weitere Simulationen unerlässlich ist.

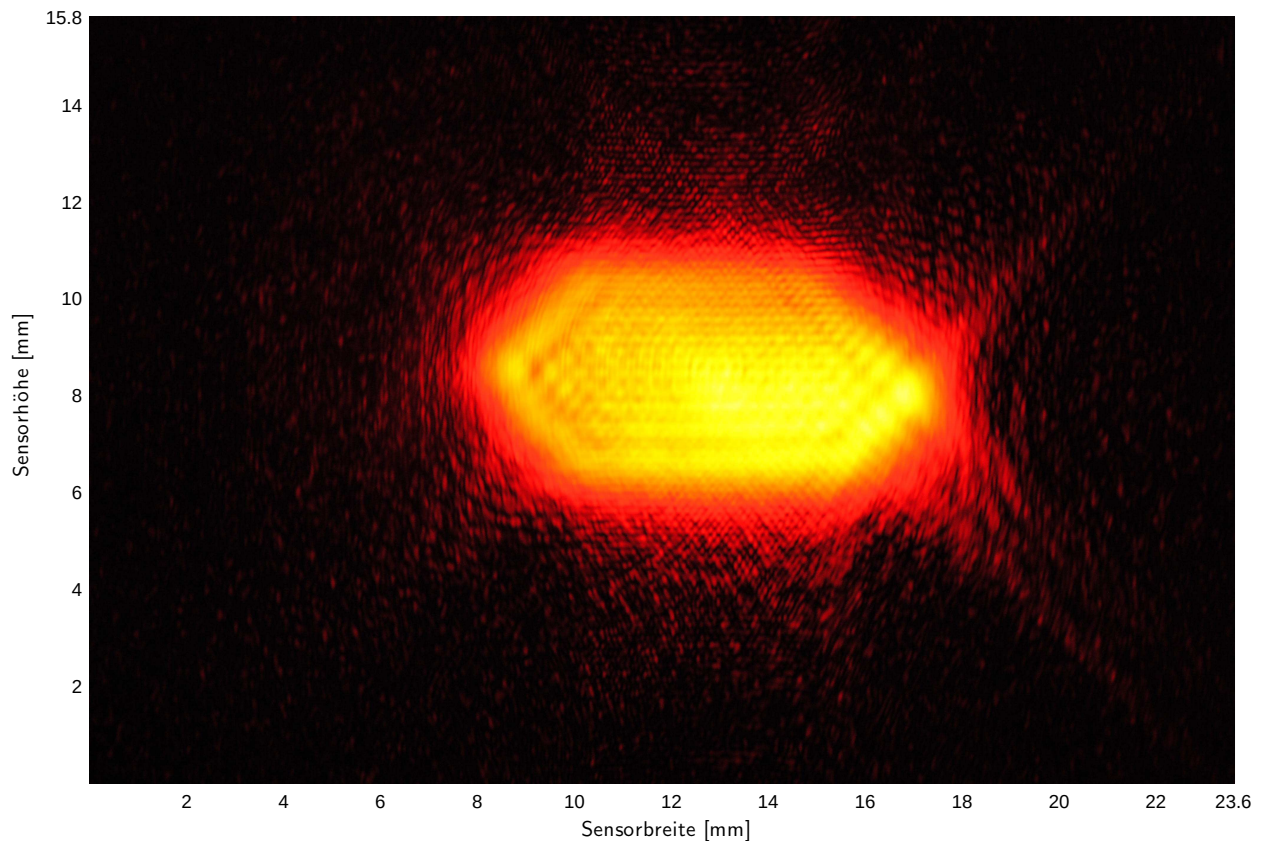


Abbildung 5.11: Direkte Abbildung des Laserstrahls auf einen CCD-Sensor.

Entfernung: 0,7 m; Belichtungszeit: 1/4000 Sek.

Da im weiteren Verlauf der Untersuchungen jedoch auch Schnittebenen in größerer Entfernung von Relevanz sind, ist diese Intensitätsverteilung im unmittelbaren Nahbereich nicht ausreichend. Daher wurde zusätzlich eine Vorgehensweise mit inkrementellem Versatz des Lasers zwischen der Aufnahme von Einzelfotos getestet. Hierbei wird nur ein Ausschnitt der Laserschnittebene bzw. des Laserspots auf dem CCD-Sensor abgebildet. Berücksichtigt man eine ausreichende Überlappung zwischen den Aufnahmen, ermöglichen *Stitching*-Methoden ein rechnerisches Zusammensetzen der Einzelaufnahmen zu einem Gesamtbild.

Abbildung 5.12 zeigt eine Bildserie mit neun Einzelaufnahmen, die in einer Entfernung von 10 m entstanden. Die Kameraeinstellungen sind identisch mit der vorherigen Aufnahme und jedes Bild umfasst die volle Sensorfläche wie Abb. 5.11. Der Überlappungsbereich beträgt in der Horizontalen wie Vertikalen etwa 50%, was ein effizientes Abtasten der gesamten Laserquerschnittsfläche zwar erschwert, für die Zusammensetzung zu einem Gesamtbild jedoch in diesem Falle unerlässlich schien.

Das Resultat der Kombination ist in Abb. 5.13 zu sehen. Aufgrund des besagten Überlappungsbereiches verbleibt eine effektive Sensorgröße von $50 \times 31 \text{ mm}^2$ mit 41 MP. Die Spotgröße lässt sich mit etwa $20 \times 15 \text{ mm}^2$ beziffern. Die sechseckige Grundform ist im Vergleich zur Nahaufnahme nicht mehr auszumachen, dafür tritt ein deutliches, sternförmiges Streulicht auf, dessen Intensitätsschwankung ein wellenförmiges Muster an den Rändern ausbildet.

Diese subjektive Beschreibung wird von der Bildanalyse und den daraus ermittelten Laserstrahlparametern, wie in Abschnitt 5.2.3.1 beschrieben, gestützt. Aus Tabelle 5.2 kann neben den ermittelten Strahlradien und den Spotgrößen auch entnommen werden, dass sich für beide Entfernungen eine Verdrehung der Hauptachsen zur Horizontalen von $-6,2^\circ$ bzw. $-11,7^\circ$ ergibt, wobei anzumerken ist, dass die Horizontierung der Spiegelreflexkamera lediglich mit einer Röhrenlibelle bewerkstelligt wird und die Werte somit eine geringe Neigungskomponente der Kamera beinhalten.

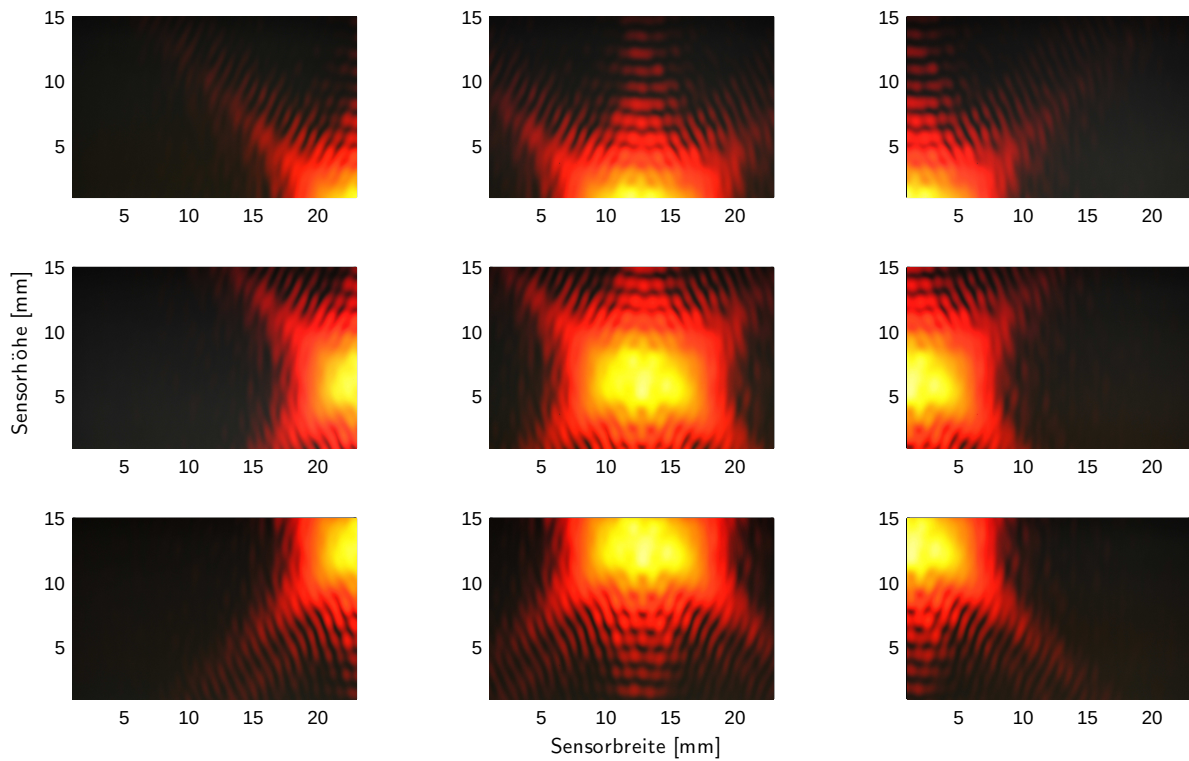


Abbildung 5.12: Direkte, aber versetzte Abbildung des Laserstrahls auf einen CCD-Sensor.
Entfernung: 10 m; Belichtungszeit: 1/4000 Sek.; Überlappungsbereich 50%

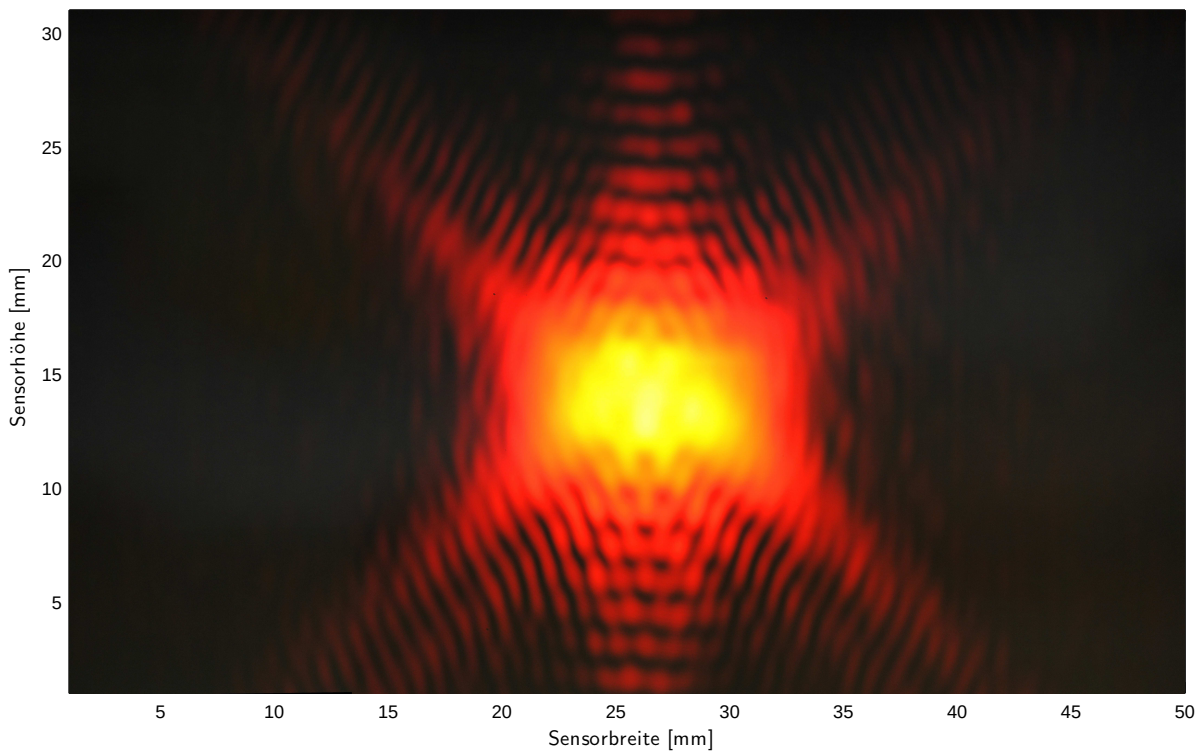


Abbildung 5.13: Gesamtbild der direkte Abbildung des Laserstrahls auf CCD-Sensoren. Zusammengesetztes Gesamtbild;
Entfernung: 10 m; Belichtungszeit: 1/4000 Sek.

Tabelle 5.2: Resultate der CCD-Messung

Entfernung [m]	Radien $r_x \times r_y$ [mm ²]	Spotgröße [mm ²]	Hauptachsenwinkel φ [°]
0,7	5,7×3,6	63,1	-6,2
10,0	8,7×10,5	350,0	-11,7

Die Abbildungen 5.14 und 5.15 stellen die Aufnahmen nochmals in Falschfarben dar. Darin eingezeichnet sind die Randellipsen der D4 σ -Methode sowie die vertikale und horizontale Achse des Lasers, an deren Schnittpunkt sich der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung und somit der Lasermittelpunkt befindet. Die entsprechenden Querschnittsprofile verdeutlichen nochmals die Aspekte Symmetrieeigenschaft und Intensitätsschwankungen.

Im direkten Vergleich fällt auf, dass insbesondere das Horizontalprofil in 0,7 m Entfernung eine abgeflachte Form mit starken Intensitätsschwankungen aufweist; in einer Entfernung von 10 m nähert sich diese dem zu erwartenden Gaußprofil an. Die Randbereiche weisen nach starkem Intensitätsverlust aus den Zentralbereichen eine periodische Intensitätsschwankung auf, die erklären, weshalb für diese Anwendung zur Bestimmung des Strahlrandes die D4 σ -Methode im Gegensatz zur festen $1/e^2$ -Schwelle zu bevorzugen ist.

Da eine asymmetrische Intensitätsverteilung eine mögliche Fehlerquelle der berührungslosen Distanzmessung darstellt, ist diese näher zu betrachten. Eine Symmetrie bezeichnet die Eigenschaft, bei der ein geometrisches Objekt auf sich selbst abgebildet werden kann – dies kann im zweidimensionalen Fall durch eine Drehung (Rotationssymmetrie), eine Verschiebung (Translationssymmetrie) oder eine Spiegelung entlang einer Geraden (Achssymmetrie) oder gegenüber eines Punktes (Punktsymmetrie) hervorgerufen werden. Da die Messung in zwei Lagen eine oft praktizierte Vorgehensweise in der Vermessung darstellt, wurde an dieser Stelle der Laserspot hinsichtlich seiner Punktsymmetrie untersucht. Abbildungen 5.16 und 5.17 geben hierfür Differenzbilder zwischen der Originalaufnahme und der sowohl um die Horizontal- als auch um die Vertikalachse gespiegelte Aufnahmen wieder.

Abbildung 5.16 weist im unmittelbaren Zentrum keine Abweichungen in den relativen Intensitäten auf. Daran anschließend sind aber im Zentralbereich bis zum halben Strahldurchmesser großflächige Abweichungen von bis zu 0,3 Einheiten zu erkennen. Insgesamt ist ein starkes Ungleichgewicht zwischen dem II. und IV. Quadranten zu verzeichnen. Danach nehmen diese deutlich ab, verbleiben in den Randbereichen aber immer noch auf einem Niveau von etwa 0,1 Einheiten. Auch in einer Entfernung von 10 m ist der Bereich um den Strahlmittelpunkt frei von asymmetrischen Einflüssen. Aber auch hier sind im Bereich innerhalb der Randellipse Abweichungen von 0,2 Einheiten offensichtlich. Diese sind im Gegensatz zum Extremen Nahbereich jedoch weniger systematisch angeordnet, so dass ein reduzierter Einfluss auf die Distanzmessung zu erwarten ist.

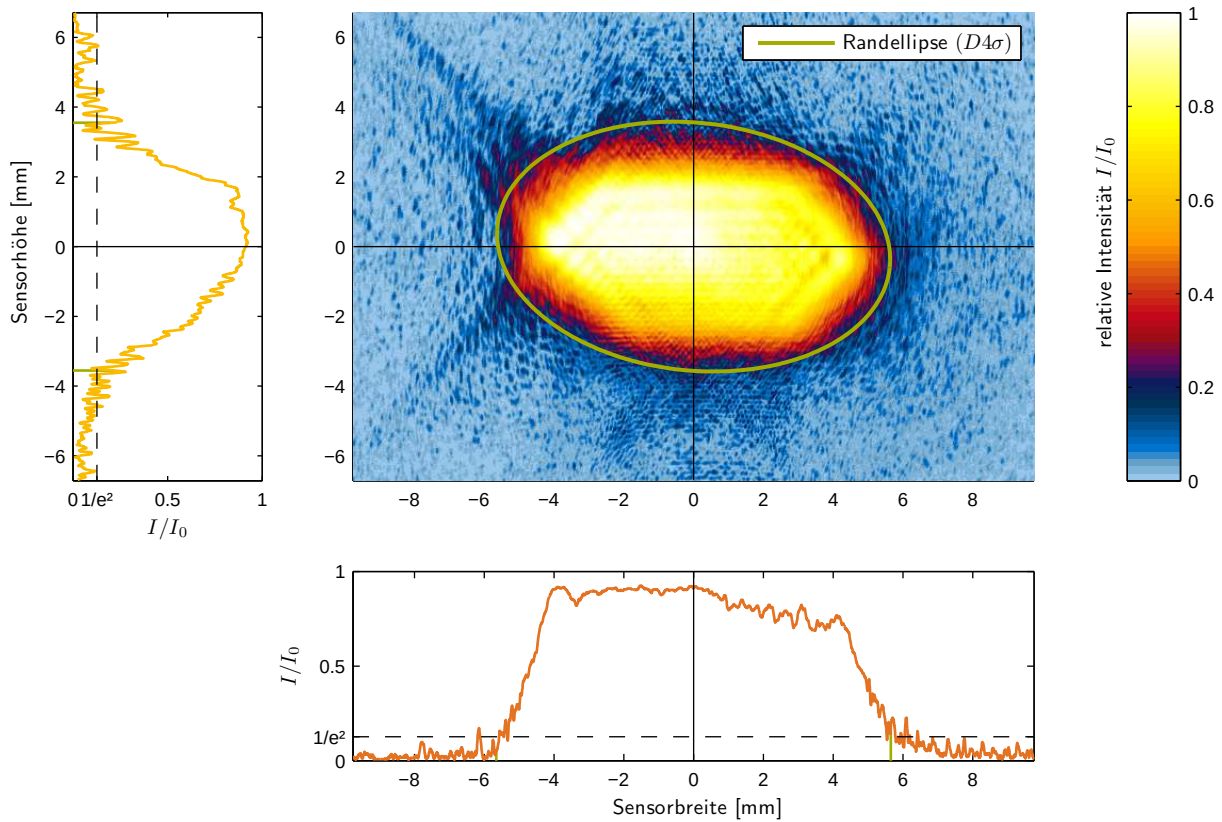


Abbildung 5.14: Intensitätsverteilung und Laserstrahlparameter in einer Entfernung von 0,7 m

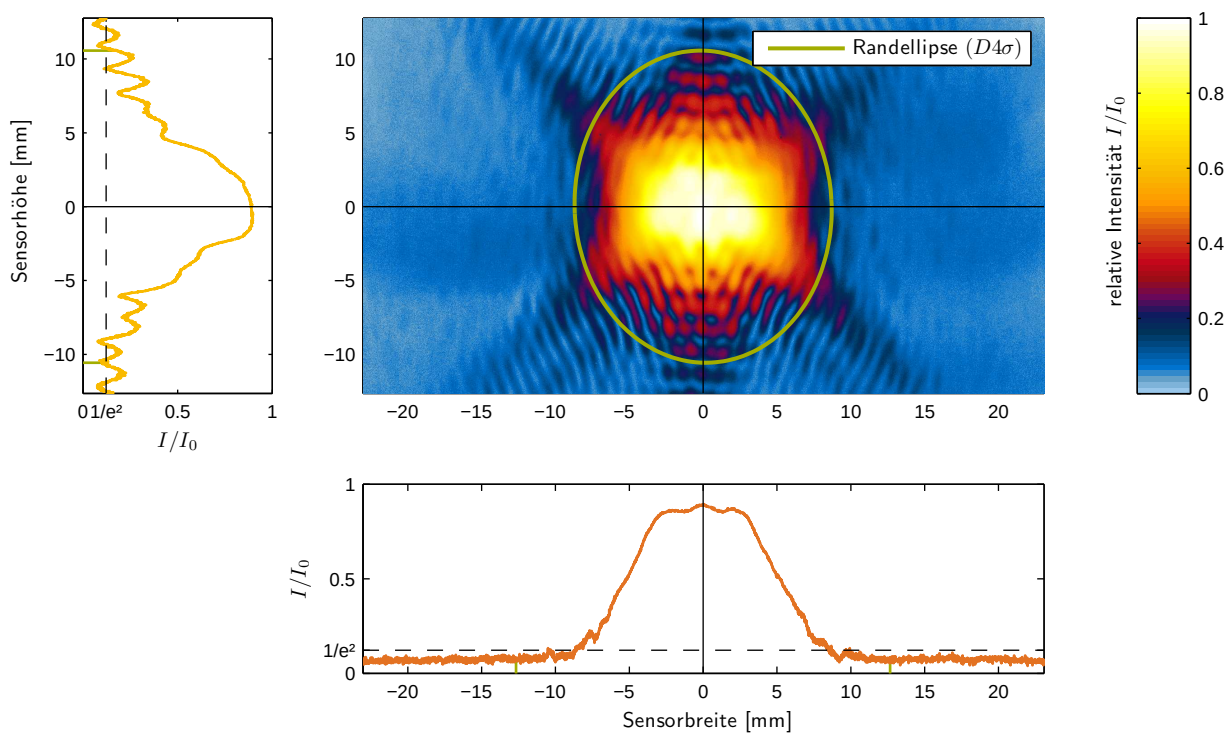


Abbildung 5.15: Intensitätsverteilung und Laserstrahlparameter in einer Entfernung von 10 m

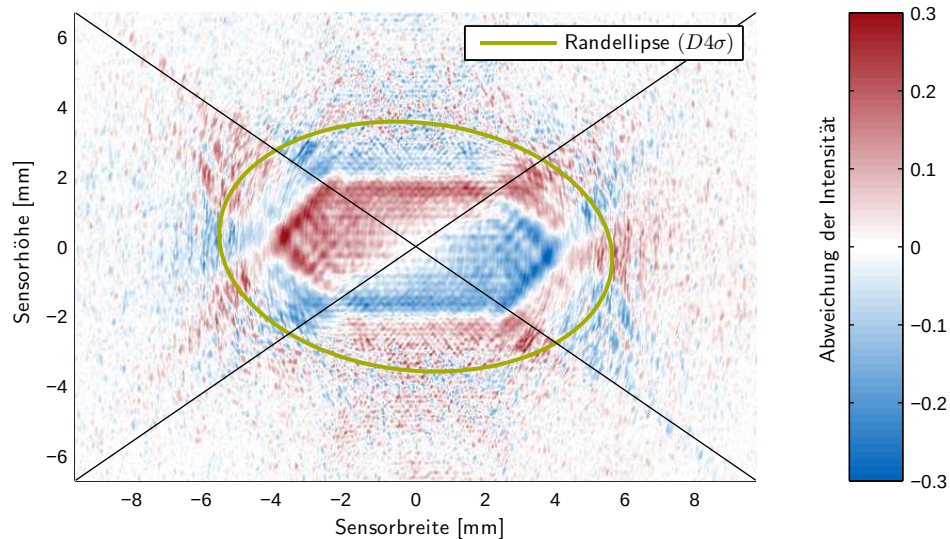


Abbildung 5.16: Punktsymmetrie in einer Entfernung von 0,7 m

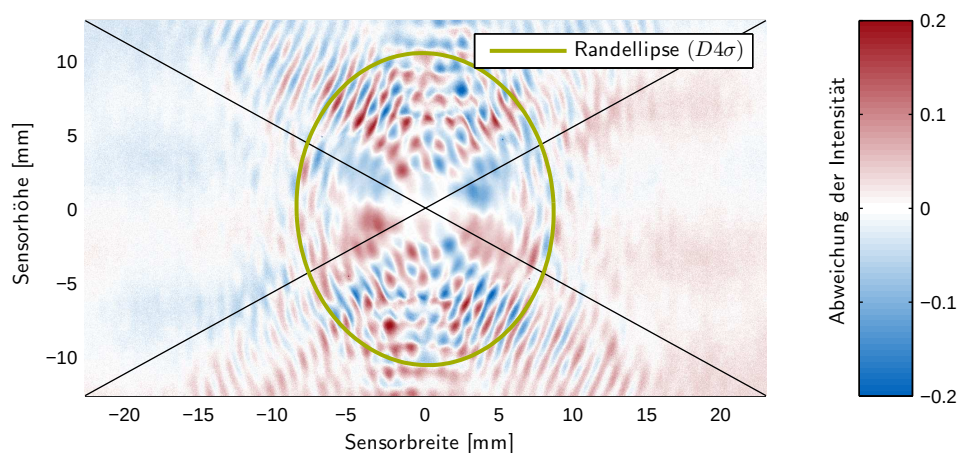


Abbildung 5.17: Punktsymmetrie in einer Entfernung von 10 m

5.2.3.3 Indirekte Abbildung des Laserspots auf eine Projektionstafel

Bei der indirekten Abbildung der Laserspots wird erneut die Spiegelreflexkamera Nikon D3000, diesmal in Kombination mit einem Nikon-Objektiv vom Typ AF-S NIKKOR 18-105 1:3,5-5,6G, eingesetzt. Als Projektionsfläche des Laserspots wird eine mit einer matt-weißen Folie beklebte Metallplatte mit einer Dimensionen von ca. $50 \times 40 \text{ cm}^2$ verwendet. In diese sind am Rand Bohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm in einem Abstand von 6 cm eingelassen, welche von einer auf der Rückseite angebrachte Leuchteinheit beleuchtet werden (siehe Abb. 5.10). Somit bilden sich die Bohrungen als Leuchtpunkte in den Digitalbildern ab und stehen als Passpunkte für eine spätere projektive Bildentzerrung nach Luhmann (2010) zur Verfügung. Das Resultat einer solchen Entzerrung ist den Abbildungen 5.18 zu entnehmen.

Für die Verarbeitung und Auswertung der Bilder wird auf zwei verschiedene Softwarekomponenten zurückgegriffen: Die Entzerrung der Laserfotos wird mit dem Softwaresystem HALCON der Firma MVTec Software GmbH durchgeführt, die Berechnung der Laserparameter nach Abschnitt 5.2.3.1 erfolgt in der Entwicklungsumgebung MATLAB von Mathworks, Inc.

Die Versuchsreihe wurde auf einem Kellergang mit etwa 90 m Länge durchgeführt. Der Vorteil dieser Umgebung liegt in der Möglichkeit, diese abzudunkeln, womit die Sichtbarkeit des Laserspots auch in großer Entfernung noch gewährleistet werden kann. Während der Aufnahmen ist darauf zu achten, dass die Umge-

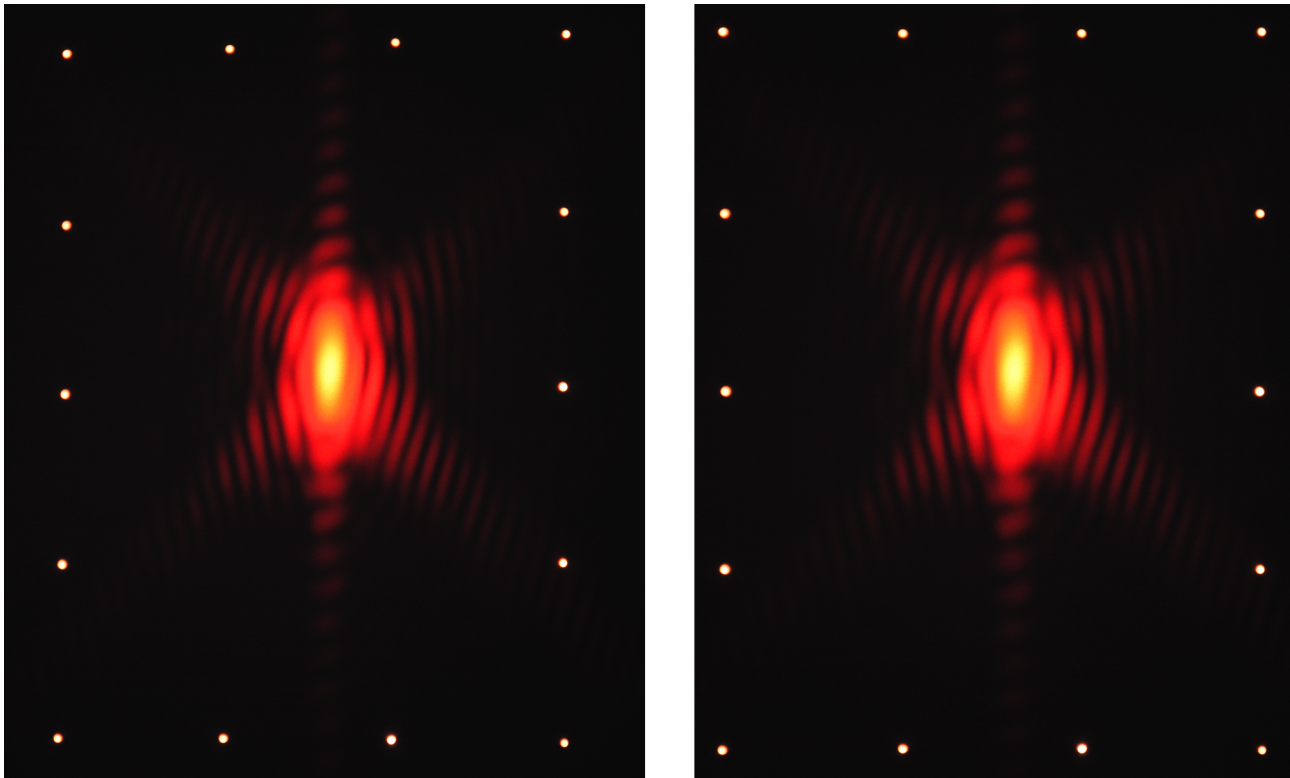


Abbildung 5.18: Foto des Laserspots auf einer Projektionsfläche in 80 m Entfernung im Original (links) und nach der projektiven Bildentzerrung (rechts)

beeinflüsse minimiert werden – so konnte die Temperatur auf unter 1°C stabil gehalten werden. Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Vermeidung von Luftturbulenzen, die z. B. durch das Öffnen und Schließen von Türen hervorgerufen werden. Insbesondere bei großen Distanzen machen sich etwaige Luftturbulenzen in einer Bewegung des Laserspots auf der Projektionsfläche bemerkbar (Zahn, 2012). Dies führt bei zu langen Belichtungszeiten wiederum zu einer Bewegungsunschärfe, welche es zu vermeiden gilt. Somit werden an die Aufnahmetechnik bzw. die Kameraeinstellungen hohe Ansprüche gestellt, die sich in Hinblick auf eine ISO-konforme Messung der Leistungsdichteverteilung aus den nachfolgenden Gesichtspunkten bezüglich Auflösung, Bildrauschen, Blende und Belichtungszeit ergeben:

Der CCD-Sensor besitzt eine Größe von $3872 \times 2592 \text{ Pixel}^2$, die effektive Pixelanzahl beträgt damit ca. 10 Megapixel. Der aufgenommene Ausschnitt der Projektionstafel beträgt etwa $240 \times 330 \text{ mm}^2$, was zu einer effektiven Pixelauflösung von ca. $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ entspricht. Dieser Wert wird im Zuge der Bildentzerrung manifestiert, indem das entzerrte Bild auf eine Größe von $200 \times 260 \text{ mm}^2$ mit einer Auflösung von $2000 \times 2600 \text{ Pixel}^2$ zu- rechtgeschnitten wird. Geht man von einem minimalen Strahlradius von 5 mm aus, liegt die Auflösung der Versuchsanordnung bei 1/50 des kleinsten Strahldurchmessers. Der geforderte Mindestwert von 1/20 wird demnach deutlich unterboten.

Das Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *Signal-to-noise ratio*, kurz SNR) des Kamerachips bzw. der Aufnahmen soll besser als 50 dB sein. Dieses geringe Bildrauschen wird bei der Nikon D3000 durch die Wahl der Einstellung ISO-100 gewährleistet, bei der der SNR-Wert nach HeiseFoto (2012) bei besser als 70,4 dB liegt. Um bei einem minimalen Bildrauschen und möglichst geringen Belichtungszeiten arbeiten zu können, ist man auf lichtstarke Objektive angewiesen, zu denen das eingesetzte Objektiv sicherlich nicht zählt. Daher erfolgen die Aufnahmen bei maximal geöffneter Blende (F5,6) bei einer Brennweite von 105 mm (Telebereich). Die dabei gering ausfallende Tiefenschärfe erfordert dabei eine präzise Fokussierung auf den Zielbereich, ermöglicht aber eine Reduzierung der Belichtungszeit. Im Rahmen der Versuchsanordnung konnten somit Fotos mit einer Belichtungszeit von 1,0 Sekunden aufgenommen werden, die die Bewegungsunschärfe aufgrund der atmosphärisch bedingten Laserspotbewegungen zwar nicht vollständig zu eliminieren vermochte, diese aber deutlich reduzieren konnte.

Die Rayleighlänge des untersuchten Lasers beträgt 20 m und 17,5 m. Für die nachfolgende Messreihe (siehe Abb. 5.19), bestehend aus 19 Aufnahmen, liegen sechs Messungen vor den Rayleighlängen und weitere 13 hinter dieser. Die Versuchsanordnung und -durchführung entspricht in dieser Hinsicht den geforderten Kriterien der ISO-Norm.

5.2.3.4 Resultate der Laserstrahlparameter aus der indirekten Abbildung

Abbildung 5.19 beinhaltet die Intensitätsverteilungen der aufgenommenen Laserspots in einer Schrittweite von 2,5 m bis zu einer Entfernung von 10 m und darüber hinaus in einer Schrittweite von 5 m bis zur spezifizierten Reichweite des Laserdistanzmessers von 80 m. Deutlich zu erkennen ist die Flächenzunahme des Laserquerschnitts, aber auch eine zunehmende räumliche Ausdehnung des Streulichtkegels.

Die Strahlanalyse nach der Methode der ersten und zweiten Momente liefern die Strahlradien, wie sie Abbildung 5.20 und für eine Distanz von 50 m auch Tabelle 5.3 zu entnehmen sind. Diesen gegenüber gestellt sind die aus den Datenblättern (Zeiske, 1999) und (Leica Geosystems, 2003) entnommenen Strahldurchmesser. In ihrer Entwicklung entlang des überprüften Messbereichs scheinen die beiden Messreihen sowohl in der horizontalen wie auch der vertikalen Komponente überein zu stimmen – beachtet man jedoch, dass hier Strahlradien mit Strahldurchmessern verglichen werden, wird deutlich, dass die durch die D4 σ -Methode ermittelten Strahlradien doppelt so groß sind, wie die des Herstellers. Eine mögliche, wenn auch unwahrscheinliche, Ursache für diesen Faktor ist Formel (5.16) zu entnehmen. Darin wird der Strahlrand explizit als die doppelte Standardabweichung der zweiten Momente vorgeschrieben – dennoch ist nicht auszuschließen, dass sich die Herstellerangaben lediglich auf den 1 σ -Bereich beziehen.

Tabelle 5.3: Vergleich der Laserstrahlparameter (Angaben bezogen auf eine Entfernung von 50 m)

Lasermodell	Beschreibung	Radien	Spotgröße	Beugungsmaßzahl
		$r_x \times r_y$ [mm ²]	A [mm] ²	$M_x^2 \times M_y^2$
A	modifizierter Gauß-Strahl mit Laserspotgrößen aus Herstellerspezifikationen (1 σ)	$5,0 \times 10,0$	157,1	$6,7 \times 7,7$
B	modifizierter Gauß-Strahl mit Strahlradien aus D4 σ -Methode (2 σ)	$11,5 \times 19,0$	686,4	$25,1 \times 26,2$

Die ISO-konforme D4 σ -Methode baut auf die Berechnung der Varianzen, also der Streuung der Intensitätswerte um den Intensitätsschwerpunkt bzw. Lasermittelpunkt. Diese Methode wurde angewendet, um stark ausschweifende Laserspots (wie sie bei Tachymetern der Baureihe TCRA1101 zu beobachten sind) mit geringen Intensitäten in den Randbereich bemessen zu können. Neben diesem Verfahren zur Festlegung des Strahlrandes existieren jedoch weitere Methoden. Da die Wahl der Definition zur Bemessung erhebliche Auswirkungen auf die ermittelte Strahlbreite haben kann, sollen nachfolgend die weiteren Methoden Erwähnung finden.

Der 1/ e^2 -Radius ist bestimmt durch den radialen Abstand eines Pixels vom Schwerpunkt des Laserspots, bei dem die Intensität auf 1/ e^2 (13,5%) der Maximalintensität abgefallen ist (vgl. Abschnitt 5.2.1.2). Falls die Intensität nach diesem Durchgang erneut ansteigt und wieder die Grenzlinie durchläuft, wird nur der Wert des ersten Durchgangs gezählt. Der berechnete Strahlradius hängt dabei nur von drei Kennzahlen, nämlich den beiden Intensitätsmaxima sowie von einem Schwellwert ab. Streng genommen führt dies bei Verwendung des ersten Pixels, welches diesen Grenzwert unterschreitet, zu einem kreisförmigen Profil. Selbstverständlich kann dies durch Verwendung einer horizontalen und vertikalen Komponente in ein elliptisches Profil überführt werden. Betrachtet man jedoch die Grenzwertunterschreitung in allen radialen Richtungen, führt dies zu einem unförmigen Strahlrand. Die Methode eignet sich zwar nicht zur Vermessung von Laserstrahlen mit mehreren *Peaks* – für unsere Wahrnehmung ist die Definition aber aufgrund des Dynamikumfangs des menschlichen Auges gut geeignet, da wir einen Strahl nur erkennen können, bis er auf ungefähr 1/ e^2 abgeklungen ist (Löffler-Mang, 2012).

Abbildung 5.21 verdeutlicht nochmals für eine explizite Messung in einer Entfernung von 50 m die Größenverhältnisse dreier unterschiedlicher Strahlrandmethoden. Darin abgebildet sind die beiden ellipsenförmigen

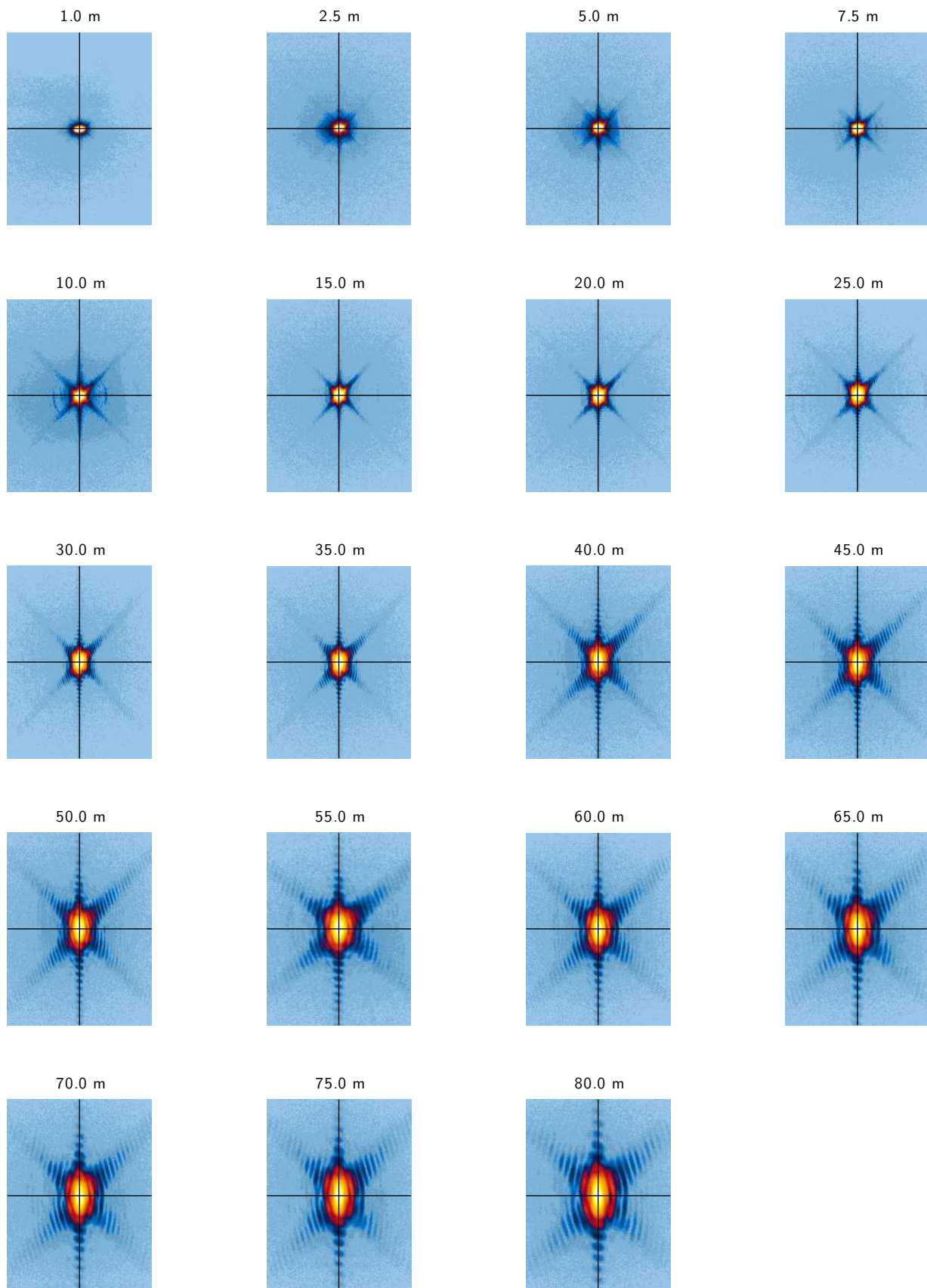


Abbildung 5.19: Indirekte Abbildungen des Laserstrahls auf ein Passpunktfeld im Messbereich von 1 m bis 80 m. Die Dimension der ausgewerteten Bereiche betragen jeweils 150×200 mm.

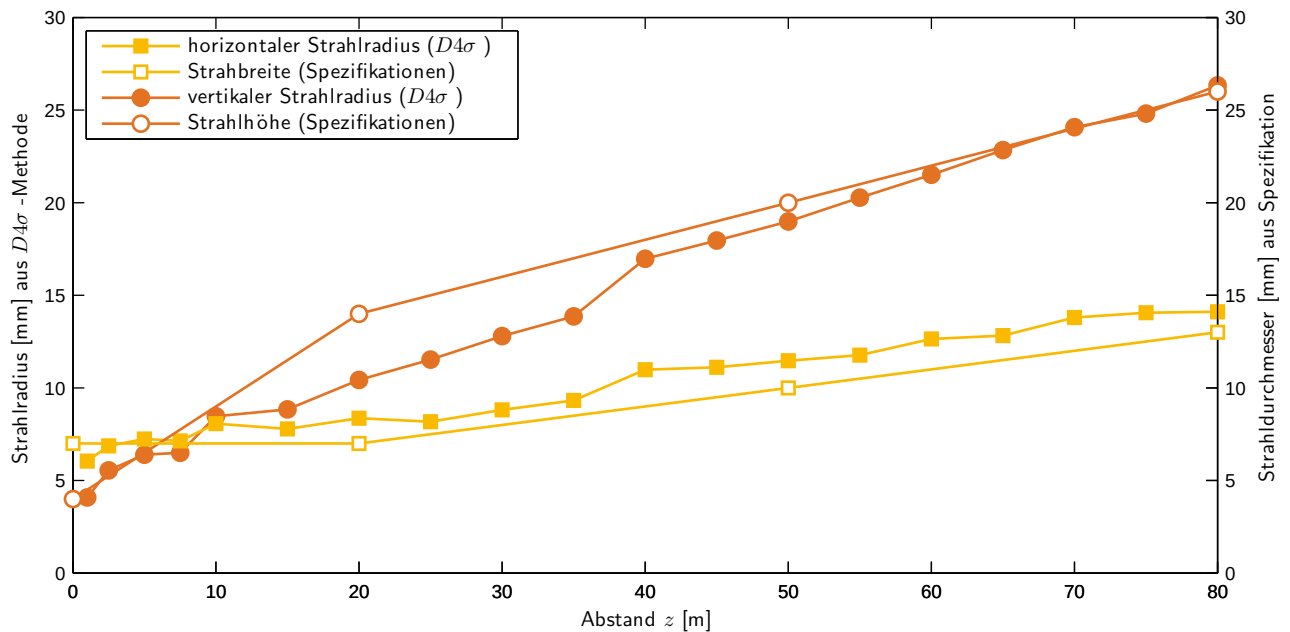


Abbildung 5.20: Ermittelte Strahlradien der berührungslos messenden EDM-Lasers eines Leica TCRA1101 und Gegenüberstellung mit den Herstellerangaben

Strahlränder sowie der unförmige $1/e^2$ -Strahlrand (allerdings inklusive solcher Bereiche, in denen die Intensität den Schwellwert erneut übersteigt), der sich aus dem allgemeinen Strahlrandkriterium des Gauß-Strahls ergibt. Dabei ist festzustellen, dass der Strahlrand auf Basis der $D4\sigma$ -Methode zwischen den Herstellerangaben und dem $1/e^2$ -Bereich liegt.

Ein weiteres Verfahren stellt die Messerschneide-Methode (engl. *knife-edge*) dar. Sie wird aber ausschließlich bei Laserstrahlen angewendet, deren Intensitätsverteilung innerhalb eines kleinen Flächenstücks liegt, d. h. bei Strahlen, deren Intensität sich in einem engen Laserspot bündelt. Zur Berechnung des Radius wird ein Integral vom Maximal- bis zum Nullwert über den Intensitätsverlauf berechnet. Dabei sind zwei Grenzsetzungen als Definition für den Radius möglich: Nach der 10/90-Methode berechnet er sich aus der Distanz von einem Pixel mit 90% der Maximalintensität des Lasers bis zu einem Pixel mit nur 10% der Intensität. Die 20/80-Methode berechnet sich analog mit den Grenzen von 20% und 80% der Maximalintensität. Im Gegensatz zur $D4\sigma$ - und $1/e^2$ -Methode wird anhand dieser Grenzsetzungen des Integrals ein geringerer Bruchteil der Gesamtleistung betrachtet. Die Methode eignet sich somit für Anwendungen, bei welchen nur einen Teil der Gesamtleistung untersucht werden soll.

Zuletzt ist die D86-Methode zu nennen. Sie definiert den Strahldurchmesser mit einem Kreis, der im Zentrum des Laserstrahls liegt und iterativ vergrößert wird, bis 86% der Gesamtintensität des Laserstrahls von der Kreisfläche ausgefüllt werden. Dieser Wert hat dabei eine bestimmte Bedeutung, denn ein Integral über das Intensitätsprofil eines kreisförmigen Gaußstrahls vom Maximum bis zu einem Wert von $1/e^2$ der Maximalintensität umfasst 86% der Gesamtleistung des Lasers. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren ist die D86-Methode nicht abhängig von den Randbereichen des Laserprofils und wird verwendet, wenn die Gesamtleistung des kreisförmigen Lasers bekannt ist.

Im Zuge der Simulationen, welche insbesondere in Abschnitt 5.4.1 erläutert werden, wird sich heraus stellen, dass die tatsächliche Strahlgeometrie, die aktiv in die Distanzmessung eingeht, deutlich unterhalb dieser Radien liegt. Folglich ist eine geometrische Einschränkung der Intensitätsverteilung, z. B. über einen Schwellwert, vorzunehmen, um den realen Laserstrahl in einer Modellumgebung abbilden zu können.

Abschließend ist noch die Entwicklung der Ausrichtung der Halbachsen zu betrachten. Abbildung 5.22 zeigt die nach Formel (5.18) bestimmten Winkelwerte auf, die im vorliegenden Fall zwischen $0,3^\circ$ und $35,3^\circ$ liegen. Damit wäre der Laserstrahl als allgemein astigmatisch zu bezeichnen. Bedenkt man jedoch, dass die maximalen Winkelwerte in einem Entfernungsbereich auftreten, in dem der Laserspot eine geringe numerischen Exzentrizität (in einem Abstand von $z = 9.04$ m weist der Strahl einen kreisförmigen Querschnitt auf) aufweist,

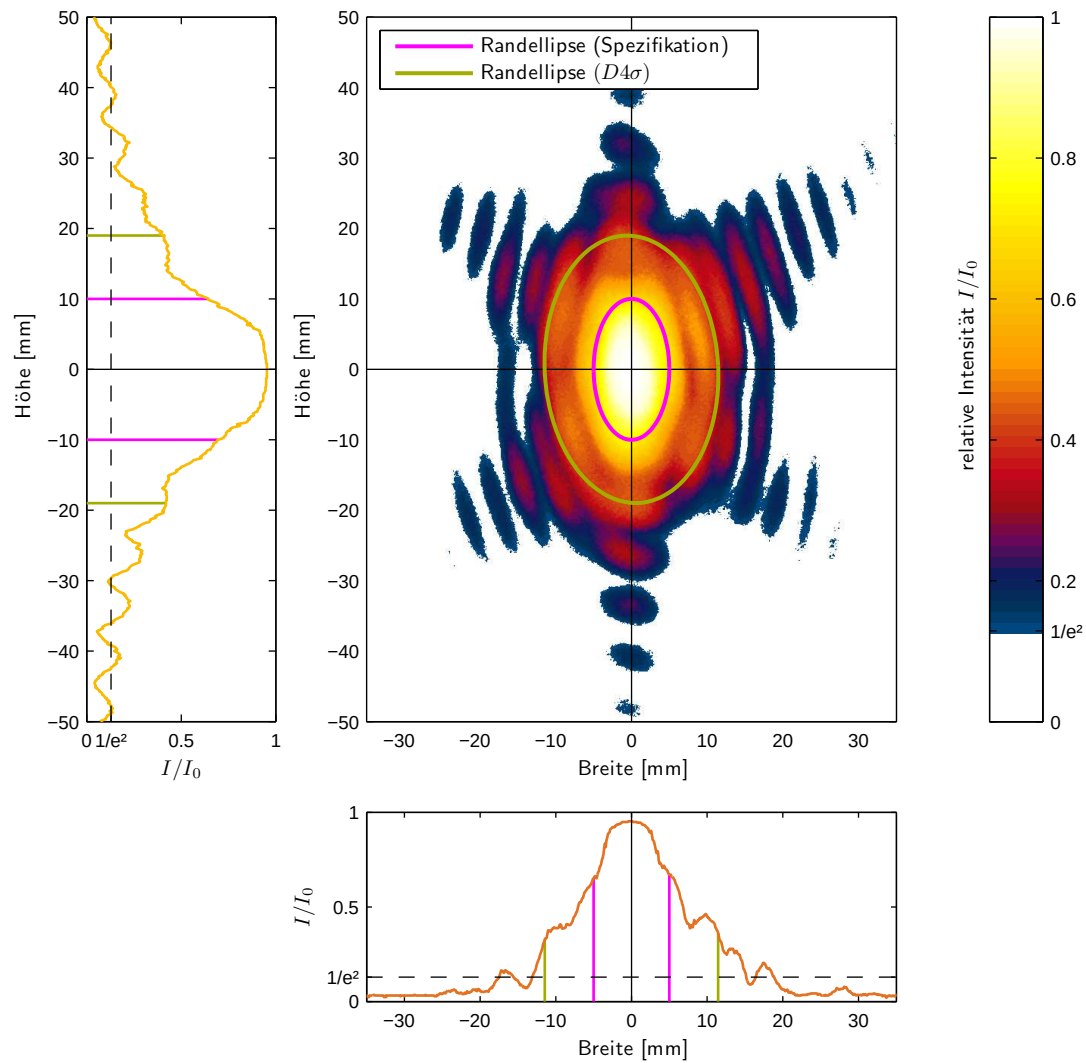


Abbildung 5.21: Strahlradien in einer Entfernung von 50 m ermittelt nach unterschiedlichen Methoden

liegen die verbleibenden Winkelwerte vielmehr zwischen 0° und 10° , was auf einen einfach astigmatischen Laserstrahl hindeutet.

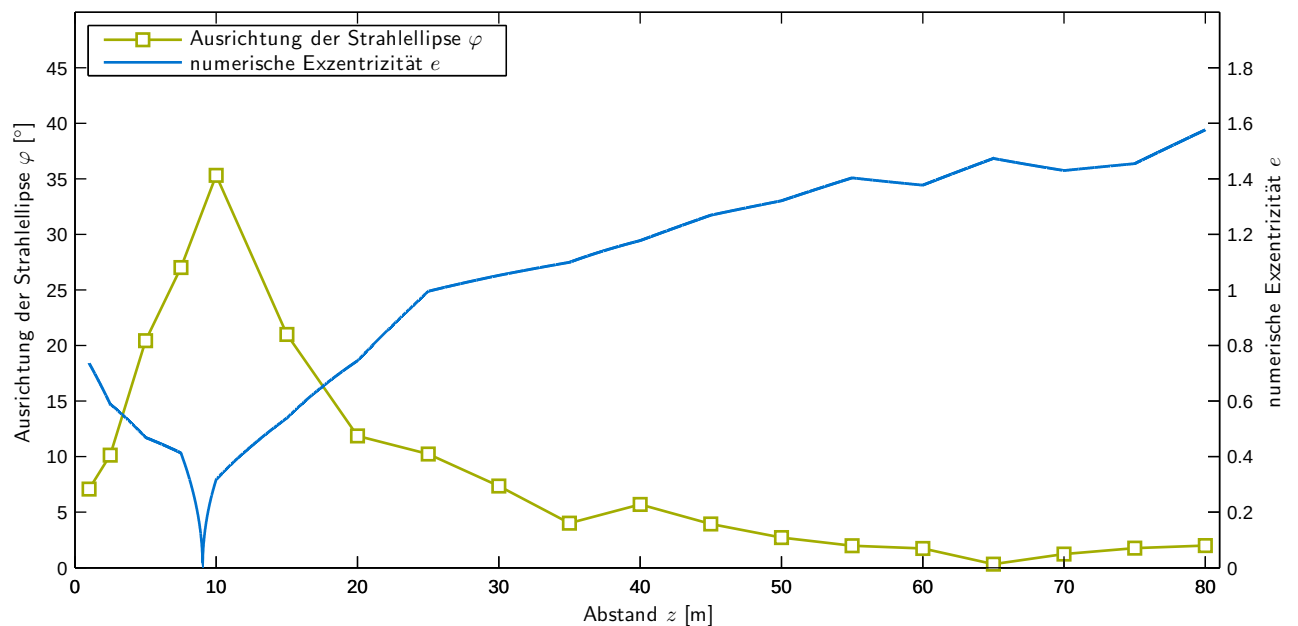


Abbildung 5.22: Ausrichtung der Strahlellipse und die aus den ermittelten Strahlradien resultierende elliptische Form des Strahlquerschnittes

5.3 Simulationsumgebung

Neben den theoretischen und experimentellen Arbeiten zur Charakterisierung eines Laserstrahls aus Abschnitt 5.2 liegt ein Schwerpunkt dieser Arbeit in der numerischen Simulation der Interaktion zwischen Laserstrahl und einer beliebigen Objektoberfläche. Im Zuge dieser Entwicklung entstand eine auf MATLAB basierende Toolbox (Schäfer, 2011a,b), deren Benutzeroberfläche in Abbildung 5.23 zu sehen ist.

Grundlage der Simulationsrechnungen sind die ermittelten dreidimensionalen Intensitätsverteilungen innerhalb einer Messkeule, deren Spezifikationen in der Software hinterlegt werden können. Durch die Auswahl eines EDM-Modells wird zudem das Messverfahren (Pulsmess- oder Phasenvergleichsverfahren) und damit verbunden die Analysemethode der reflektierten Signale, wie sie in Abschnitt 5.3.4 erläutert werden, festgelegt.

Ein weiterer Baustein stellt die Auswahl einer Projektionsoberfläche dar. Diese kann aus digitalisierten Oberflächen oder aus virtuellen Modellierungen entstammen, worauf im Folgeabschnitt 5.3.1 näher eingegangen wird. Die räumliche Anordnung der Testoberflächen sieht schließlich vor, den modellierten Laserstrahl auf einen zuvor definierbaren Punkt treffen zu lassen, womit die Kenntnis eines Sollwertes für die simulierte Distanzmessung sichergestellt ist. Die Positionierung der Oberfläche weist dabei fünf Freiheitsgrade auf, wobei durch zwei Rotationen unterschiedliche Einfallswinkel simuliert werden können. Abbildung 5.24 stellt die Definition der Freiheitsgrade dar. Eine Translation in Entfernungsrichtung (z) ermöglicht die Untersuchung im gesamten Arbeitsbereich des Laserdistanzmessers. Zuletzt ermöglichen zwei Verschiebungen quer zur Laserachse die Simulation von Messergebnissen, wie sie beispielsweise beim Abtasten von Feinstrukturen entstehen: trifft ein Laserstrahl auf ein Objekt, dessen Ausdehnung kleiner erscheint als der Laserspot, können Mischsignale auftreten, die durch die Signalreflexion der unmittelbaren Umgebung des eigentlichen Objektes verursacht werden. Hieraus können Ausrundungen und so genannte Kometenschweife entstehen. Um derlei Effekte und Möglichkeiten zu ihrer Unterdrückung künftig zu untersuchen, wurde aus Blickrichtung des Laserstrahls eine Sichtbarkeitsanalyse (5.3.3) realisiert. Abgeschattete und somit vom Laserlicht nicht beleuchtete Bereiche werden ermittelt und von der Berechnung des reflektierten Signals ausgeschlossen.

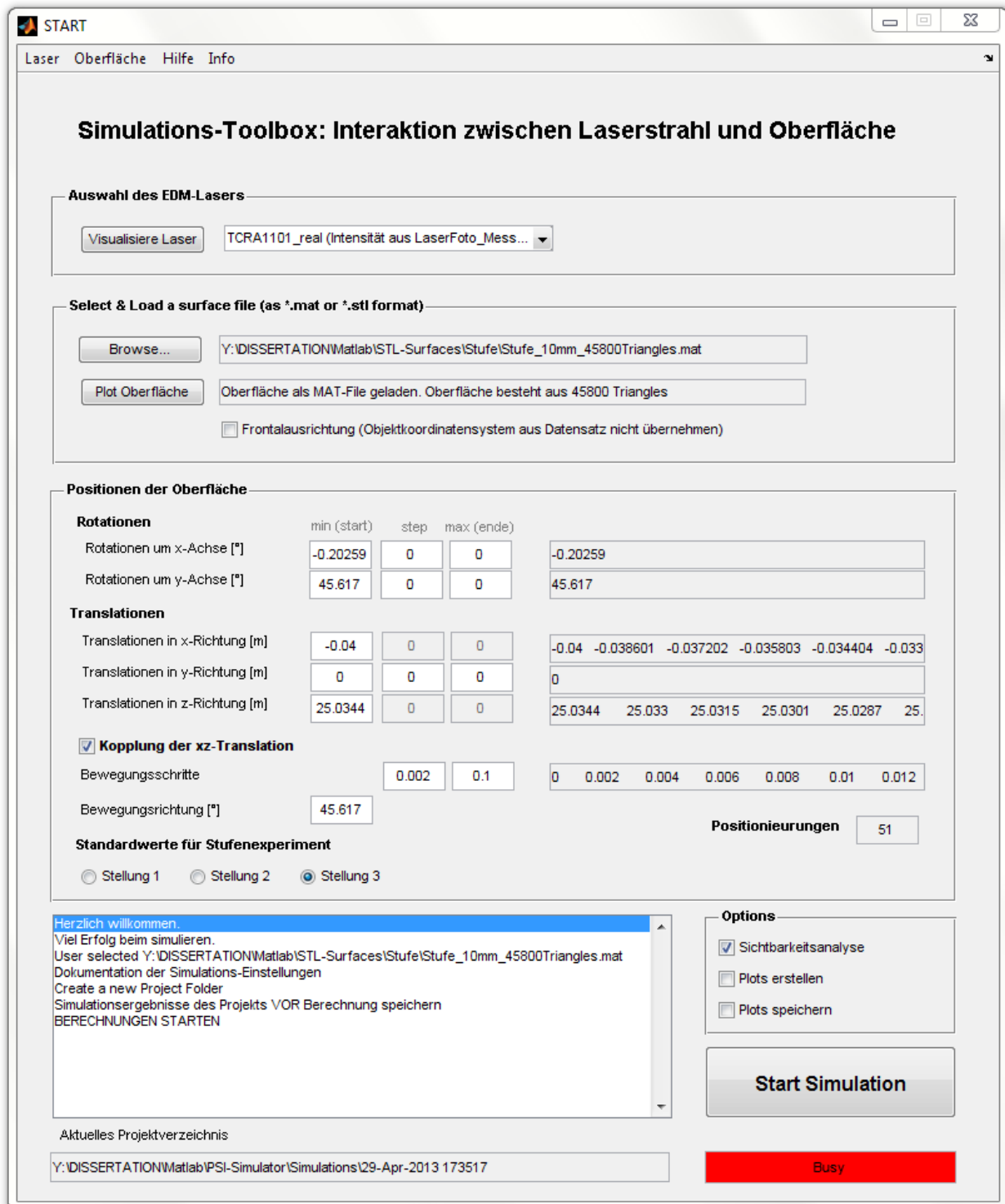


Abbildung 5.23: Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung

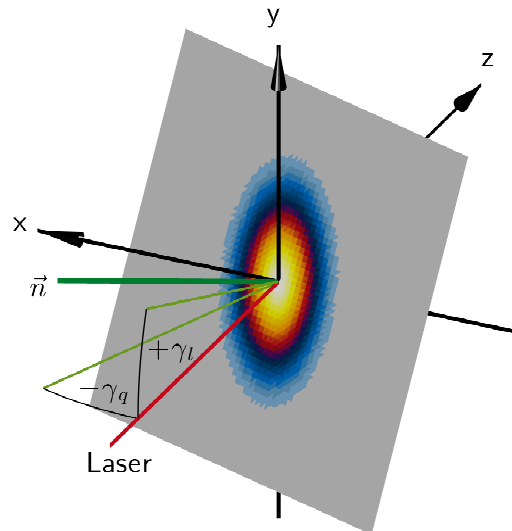


Abbildung 5.24: Freiheitsgrade bei der Positionierung der Testoberflächen

5.3.1 Oberflächenmodell

Zur Simulation reflektierender Oberflächen werden hochauflösende Dreiecksvermaschungen im binären STL-Format (engl. *Surface Tessellation Language*) eingesetzt. Obgleich die Berechnung der theoretischen Intensität nach Formel (5.8) keine Beschränkung der Ortsauflösung beinhaltet, sind die Aufnahmen der indirekten Laserstrahlabbildung auf einen Pixelabstand von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ beschränkt. Aus Gründen der Reduzierung von Rechenzeiten ist im Zuge der Simulationsentwicklung eine weitere Beschränkung erforderlich, so dass Oberflächenmodelle mit einer Dichte von bis zu acht Dreiecken pro mm^2 bzw. einer Dreiecksgröße von $0,125 \text{ mm}^2$ eingesetzt werden können. Dabei können diese Oberflächen reale Gegenstände aus einem für den Nahbereich geeigneten Scanverfahren oder rein virtuelle Modelle darstellen. Somit können beliebige Oberflächen, von einer idealisierten Ebene bis zur detaillierten Oberflächentopographie realer Objekte, einer infinitesimalen Betrachtung unterzogen werden. Abbildung 5.26 zeigt beispielhaft die Erfassung einer Betonoberfläche (vgl. Musterfläche in Abbildung 5.25) mit dem Streifenlichtmesssystem GOM ATOS. Das aus der Digitalisierung gewonnene Modell ist in Abbildung 5.27 dargestellt, welches für Simulationsbetrachtungen in Abschnitt 5.4.3 herangezogen wird.



Abbildung 5.25: Betonoberfläche

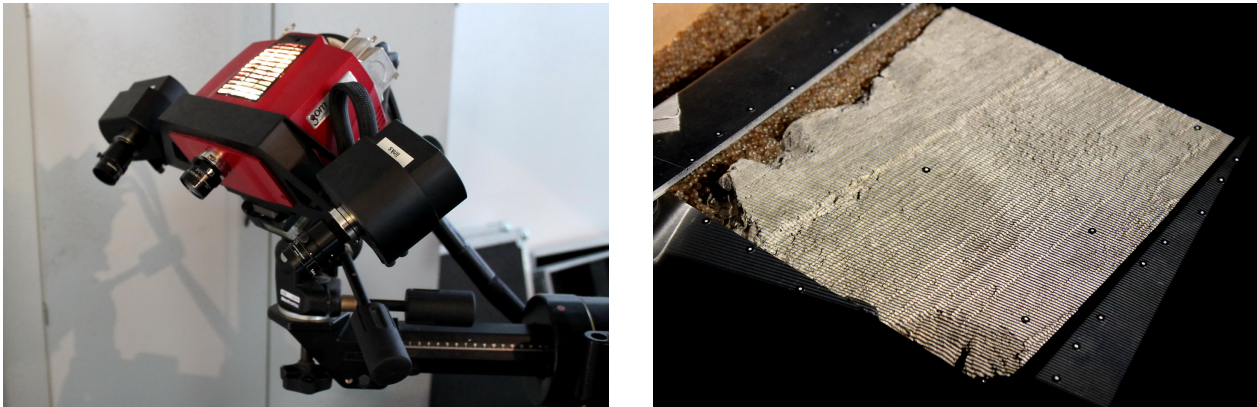


Abbildung 5.26: Oberflächenenerfassung einer Betonoberfläche: Streifenlichtmesssystems GOM ATOS (links) und Streifenlichtprojektion auf die Betonoberfläche (rechts)

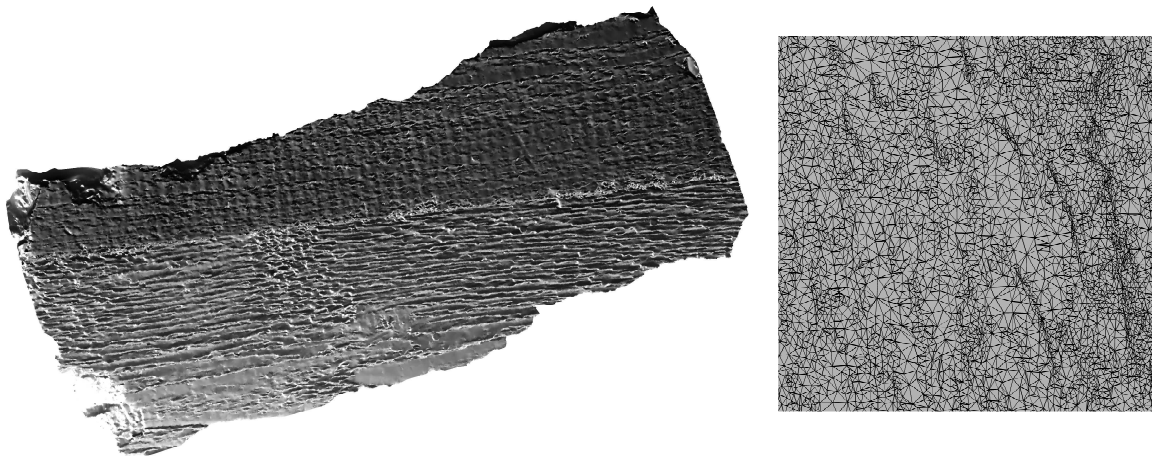


Abbildung 5.27: Ergebnis der Oberflächenenerfassung: Vermaschte Punktwolke der Betonoberfläche (links) und Detail von $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (rechts)

5.3.2 Reflexionsmodell

Primäres Ziel der computergestützten Visualisierung ist oftmals die Simulation einer realen, dreidimensionalen Umgebung. Dabei sind physikalische Gesetze der Strahlenoptik ein wesentlicher Gesichtspunkt. Speziell für die räumliche Beleuchtungssimulation basieren diese Grundsätze auf den Gesetzen der Reflexion, der Brechung und der Transmission. Letztere kommen nur beim Passieren eines Lichtstrahls durch ein Medium zum Tragen, was im Folgenden bei der Beleuchtung von Betonoberflächen keine Bedeutung hat. Auch die als Volumenstreuung bezeichnete Rückstreuung an unregelmäßig verteilten Einschlüssen und Diskontinuitäten in einem Medium werden vernachlässigt, da diese nur bei transluzenten, also teilweise lichtdurchlässigen Körpern, wie z. B. Styropor auftritt (Ingensand u. a., 2003). Der Schwerpunkt liegt somit auf der reinen Oberflächenreflexion an der Grenzfläche zwischen zwei in sich homogenen Medien.

Diese kann in den einfachsten Reflexionsmodellen je nach Richtungsverteilung der reflektierten Strahlung wie aus Abbildung 5.28 zu entnehmen als gerichtete (spiegelnde) Reflexion, als diffuse Reflexion, aber auch als diffuse Reflexion mit Spiegelung ausfallen. Für eine reine Spiegelung gilt das Reflexionsgesetz, bei dem der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Ist jedoch die reflektierende Oberfläche im Vergleich zur Trägerwellenlänge λ rau (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.1.4), dann werden die Einzelstrahlen des Lichtbündels an ihr in alle möglichen Richtungen zurückgeworfen und eine diffuse Reflexion tritt in Erscheinung. Eine in sämtlichen Richtungen des Halbraums gleichmäßig diffus reflektierende Oberfläche wird als Lambertscher Strahler

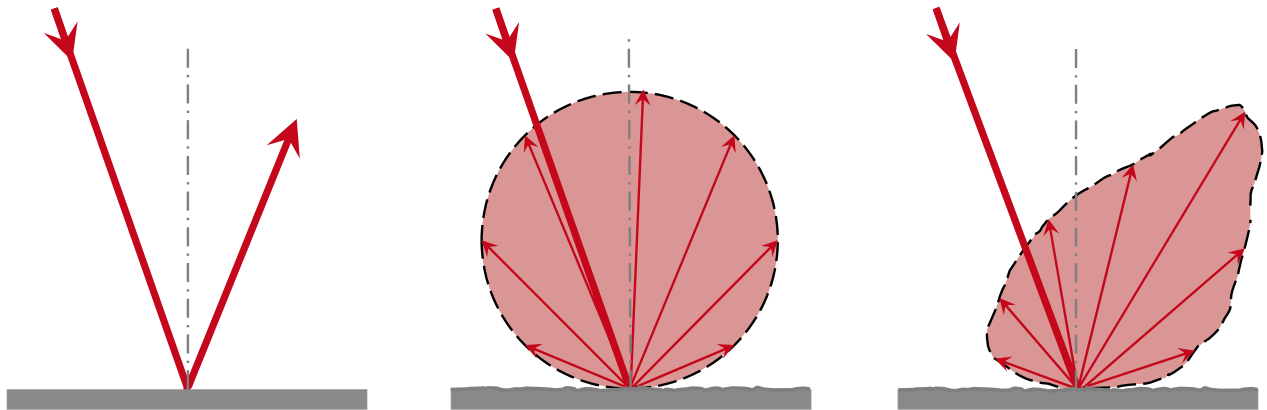


Abbildung 5.28: Reflexionsmodelle: spiegelnde Reflexion (links), diffuse Reflexion (Mitte) und diffuse Reflexion mit Spiegelung (rechts)

bezeichnet. Zwischen diesen beiden Extremen der spiegelnden und diffusen Reflexion liegt das Reflexionsverhalten der meisten natürlichen Oberflächen (Hecht, 2005). Da sich die vorliegende Arbeit explizit mit dem Verhalten der berührungslosen Messung auf Betonoberflächen beschäftigt, kann im Weiteren von einer diffusen Reflexion ausgegangen werden.

Die Reflexion an einer beliebigen natürlichen oder künstlichen Oberfläche lässt sich weder physikalisch noch mathematisch hypothesenfrei modellieren. Ein allgemein anerkanntes Modell hierfür liefert das Lambertsche Kosinusetz, das die Abschwächung aufgrund des Einfallswinkel γ als Quotient der einfallenden (P_t) und reflektierten P_r Energie zu

$$\kappa P_t / P_r = 1 / \cos \gamma \quad (5.19)$$

beschreibt. Die Konstante κ beinhaltet hierbei alle weiteren systematischen Abhängigkeiten wie z. B. Entfernung, Reflektanz und Meteorologie (Ingensand, 2006) und kann für die beschränkte Betrachtung des Einfallswinkels gleich eins angenommen werden.

5.3.3 Sichtbarkeitsanalyse

Um abgeschattete Bereiche und somit vom Laserlicht nicht beleuchtete Oberflächenelemente von der Berechnung des reflektierten Signals auszuschließen, ist eine Sichtbarkeitsanalyse durchzuführen. Eine Sichtbarkeitsanalyse stellt allgemein eine räumliche Analysemethode zur Entscheidungsfindung dar – zum Beispiel bei der Planung von optimalen Standorten für Mobilfunkmasten. Als Datengrundlage sind digitale Oberflächenmodelle erforderlich, welche in einer unregelmäßigen Dreiecksvermaschung oder in einem regelmäßigen Gitteraster vorliegen können (De Floriani u. Migillo, 2003). Ausgehend von einem solchen Oberflächenmodell und einem gegebenen Punkt (z. B. eines potenzieller Standortes inkl. Antennenhöhe h_P) kann über die Berechnung der direkten Verbindungslinien bzw. Sichtlinie (engl. *line of sight*, kurz LOS) festgestellt werden, welche anderen Geländepunkte sichtbar sind und welche nicht. Das Prinzip einer Sichtbarkeitsberechnung soll zunächst im zweidimensionalen Fall eines Geländeprofiles anhand Abbildung 5.29 erläutert und dann auf den dreidimensionalen Fall einer beliebigen im Raum orientierten Oberfläche übertragen werden.

Im zweidimensionalen Fall wird zur Ermittlung der Sichtbarkeit eines Zielpunktes Q berechnet, ob entlang der Profillinie zwischen dem Standort P und dem Zielpunkt ein weiterer Punkt V oberhalb der Verbindungslinie PQ liegt. Ist dies der Fall, so ist die direkte Sichtlinie gestört und der Zielpunkt liegt in einem abgeschatteten Bereich; andernfalls ist der Zielpunkt sichtbar. In der konkreten Umsetzung wird geprüft, ob der Zenitwinkel z_Q zum aktuell überprüften Zielpunkt kleiner (der Punkt ist sichtbar) oder größer (der Zielpunkt ist verdeckt und somit nicht sichtbar) als die Zenitwinkel z_{Si} zu allen Zwischenpunkten des Horizonts ist.

5.3.4 Modellierung der reflektierten Sequenz

Mit der Kenntnis der räumlichen Intensitätsverteilung des Laserstrahls sowie der räumlichen Anordnung der Oberfläche bzw. derer infinitesimalen Oberflächenelemente gelingt es unter Berücksichtigung angenommener Reflexionseigenschaften und Sichtbarkeitseinschränkungen, für jedes Oberflächenelement einen Quotienten abzuleiten, der das Verhältnis zwischen einfallender und reflektierter Intensität auszudrücken vermag. Eine Multiplikation der einfallenden, wenn auch relativen (vgl. 5.2.3), optischen Intensität I mit der Größe eines Oberflächenelementes führt wieder zur Ausgangseinheit eines Lasers – einer (allerdings ebenfalls relativen) optischen Leistung P (vgl. Formel 5.2) und ermöglicht eine Abschätzung der wirksam reflektierten Leistungspakete eines jeden Oberflächenelementes zu einem definierten Zeitpunkt. Denn aufgrund der Zielgeometrie (Abb. 5.32, links) findet eine solche Reflexion nicht an allen Oberflächenelementen simultan, sondern zeitverzögert statt – was zu einer deutlichen Beeinflussung der reflektierten Signalstruktur (Abb. 5.32, Mitte und rechts) führt. Diese Signalstruktur kann als diskrete Oberflächenantwort verstanden werden, wobei das Distanzmessverfahren zunächst keine Rolle spielt: je nach Messverfahren lässt sich das zeitlich gedehnte Signal als Laufzeitverzögerung (im Falle eines Pulsmeßverfahrens) oder als Verschiebungen des Phasenwinkels (im Falle des Phasenvergleichsverfahren) darstellen.

Stellt man nun die Interaktion zwischen einfallendem Laserstrahl und der Oberfläche mit Methoden der Signalverarbeitung systemtheoretisch dar, so entspricht der Vorgang an der Oberfläche der Reaktion eines LTI-Systems (*engl. Linear Time-Invariant*), die ein analoges Eingangssignal $x(t)$ in ein Ausgangssignal $y(t)$ überführt (vgl. Abb. 5.33). Ein solches LTI-System beinhaltet die wesentlichen Eigenschaften, dass

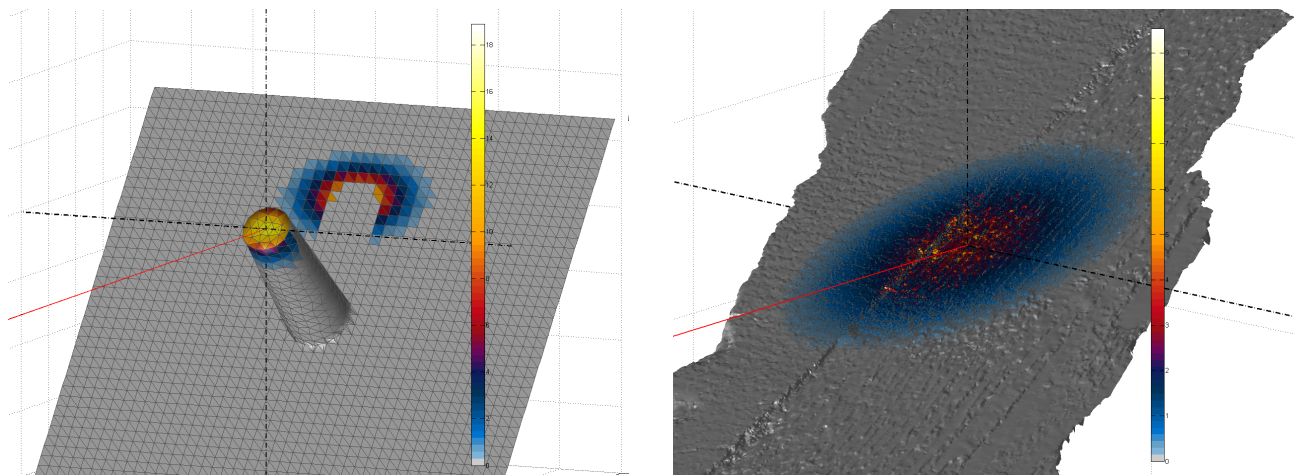


Abbildung 5.31: Beispiele für die Umsetzung der Sichtbarkeitsanalyse bei der Beleuchtung eines fiktiven Modells (links) und eines Bruchstücks einer Betonoberfläche (rechts) durch einen Gauß-Strahl

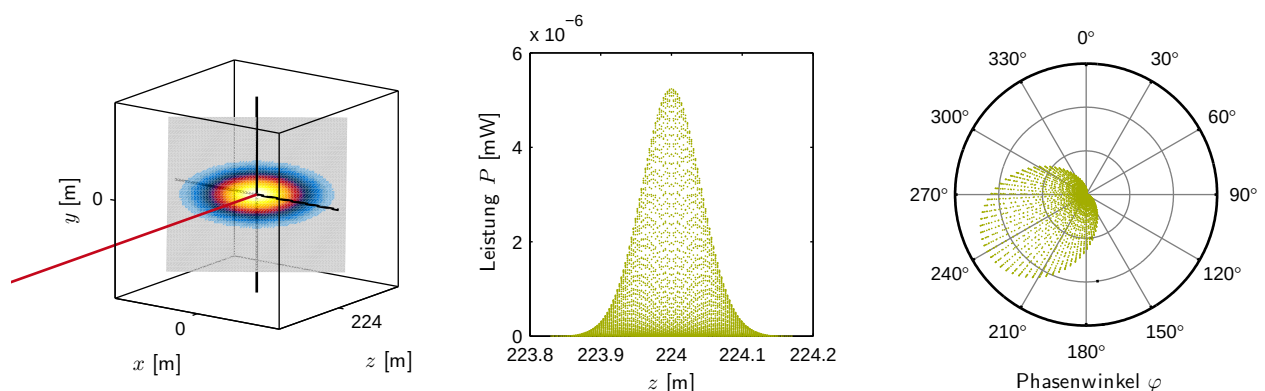


Abbildung 5.32: Von einem elliptischen Gauß-Strahl beleuchtete Zielgeometrie (links) und diskrete Oberflächenantwort ausgedrückt als Puls- (Mitte) und Phasenantwort (rechts)

- eine Zeitverschiebung des Eingangssignals zu einer gleichen Zeitverschiebung des Ausgangssignals führt – das System ist somit zeitinvariant.
- die Summe der von den einzelnen Oberflächenelementen erzeugten Ausgangssignale das Gesamtsignal $y(t)$ ergibt – es gilt das Superpositionsprinzip und entspricht einem linearen System.

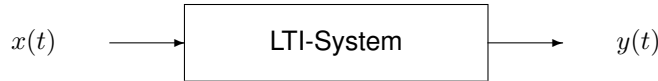


Abbildung 5.33: Eingangs- und Ausgangssignal in einem LTI-System

Für die Beschreibung eines unbekannten LTI-Systems werden spezielle Testfunktionen als Eingangssignal verwendet. Dabei kommt dem Diracstoß $\delta(t)$, einem zeitlich extrem kurzen Puls mit einer sehr hohen Leistung, eine besondere Bedeutung zu, da sich das zu messende Ausgangssignal als Stoß- oder Impulsantwort $h(t)$ des Systems darstellt (Abb. 5.34). Diese wiederum ermöglicht eine vollständige Beschreibung des LTI-Systems.

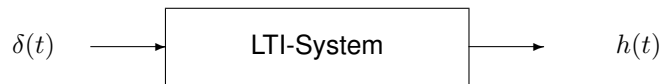


Abbildung 5.34: Stoßantwort als Reaktion des LTI-Systems auf einen Diracstoß

Für den vorliegenden Anwendungsfall der Simulation ergeben sich jedoch zwei wesentliche Unterschiede zu dem beschriebenen Ablauf:

Zunächst kommen an Stelle analoger Signale nun digitale Signale zum Einsatz – es liegen also zeit- und amplitudendiskrete Werte vor, was eine Bezeichnung als LTD-System (*Linear, Time-invariant, Discrete*) erforderlich macht, bei dem dennoch die bisher beschriebenen Grundsätze ihre Gültigkeit behalten. Zur besseren Differenzierung werden Signale in diesem Fall als Sequenz bezeichnet.

Des Weiteren ergibt sich in Bezug auf Abb. 5.34 eine umgekehrte Aufgabenstellung: die zu einem definierten Zeitpunkt gültige Intensitätsverteilung auf der Oberfläche stellt im Sinne eines LTD-Systems die Eingangssequenz bzw. Testfunktion dar. Die resultierende, zeitlich gedehnte Oberflächenantwort kann, wie bereits in Abb. 5.32 dargestellt, über die bekannten Eigenschaften der Zielgeometrie abgeleitet werden. Unbekannt hingegen, und für den Anwender in der Regel unzugänglich, sind die analogen Eingangs- und Ausgangssignale. Die diskrete Eingangssequenz $x(t)$ kann für eine Simulation jedoch modelliert werden: im Falle des Pulsmessverfahren existieren unterschiedliche Modelle zur Detektion von rückgestreuten Pulsen, wie sie z. B. in (Jutzi, 2007) beschrieben sind.

Für das Phasenvergleichsverfahren ist jedoch von einem kontinuierlichen Signal auszugehen, dessen zeitlicher Verlauf im Idealfall von Störeinflüssen und Signalschwankungen frei ist und somit einer harmonischen Schwingung entspricht. Ziel ist folglich die Ermittlung der Ausgangssequenz $y(t)$, welche schließlich an der Empfangseinheit des EDM eintrifft und von dieser ausgewertet wird. Diese ergibt sich aus der diskreten Faltung der Eingangssequenz $x(t)$ mit der Oberflächenantwort $h(t)$ zu

$$y(t) = x(t) * h(t) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau), \quad (5.20)$$

die sich als Summe der Multiplikationen der beiden Sequenzen ergibt, wobei diese zeitlich gegeneinander verschoben werden.

5.3.5 Analyse der reflektierten Sequenz

Da eine Empfangseinheit zwar in der Lage ist, ein Signal als Funktion der Zeit zu registrieren, aber keine ortsauflösenden Informationen erkennen kann (übertragen auf die Simulation bedeutet dies, dass nicht bekannt

ist, welches Leistungspaket von welchem Oberflächenelement stammt), ist die gesamte Ausgangssequenz $y(t)$ nach (5.20) als die Summe aller reflektierten Leistungspakete zu verstehen.

Diese Sequenz gilt es schließlich zu analysieren, um die messtechnische Zielgröße – die Entfernung zwischen Sensor und Objekt – zu bestimmen. Wie in Kapitel 2.3 erläutert, kommen hierzu unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz, deren Analysealgorithmen eine ebenso große Vielfalt mit sich bringen. Zumeist durch Patente geschützt, sind die Details der Messwertgewinnung jedoch nicht oder nur oberflächlich in Erfahrung zu bringen. Um im weiteren Verlauf eine möglichst universale Simulationsumgebung zu implementieren, sind daher gewisse Annahmen zu treffen, welche wiederum in einer Verallgemeinerung vieler Algorithmen, vornehmlich des Phasenvergleichsverfahrens (vgl. Kapitel 2.3.3), münden. Somit ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass sich die nachfolgenden Ausführungen nicht an einer existierenden technischen Umsetzung orientieren, sondern lediglich eine realitätsnahe Analyse, wie sie aus der Fachliteratur und Patentschriften (Stutz u. a., 2012; Seeger, 2007) abgeleitet werden kann, angestrebt wird.

Zur Bestimmung von Phasenunterschiede werden nach Joeckel u. a. (2008) folgende Messtechniken angewendet: die analoge Phasenmessung, die Phasenmessung mit variabler Modulationsfrequenz, die digitale Phasenmessung sowie schließlich die Phasenmessung aus Intensitätsmessungen (vgl. Abbildung 5.35).

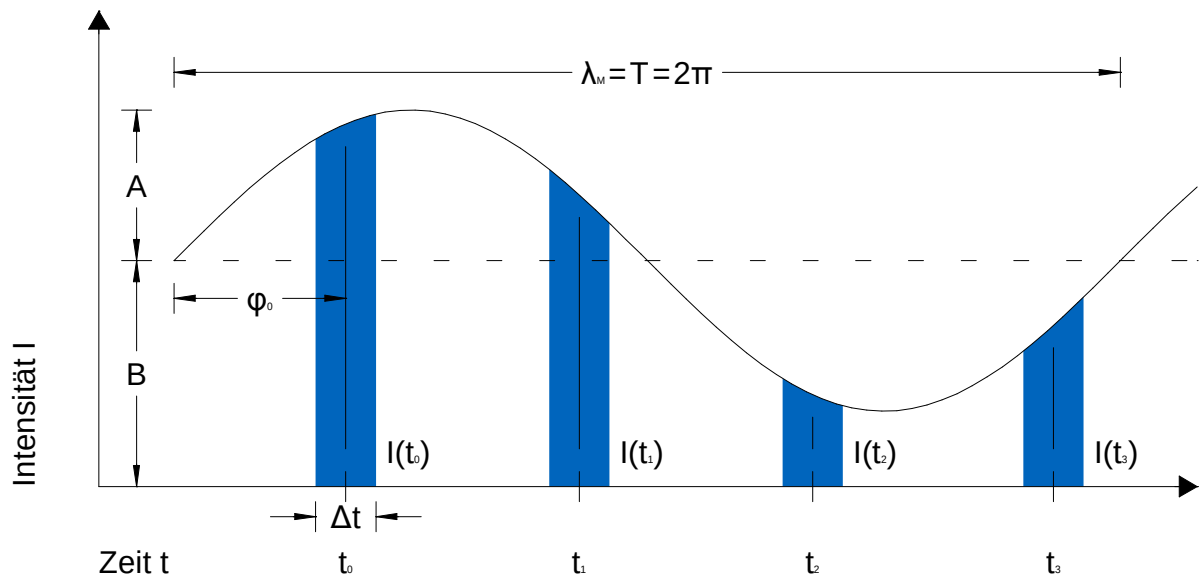


Abbildung 5.35: Bestimmung der Phasenlage aus vier Intensitätsmessungen nach Joeckel u. a. (2008)

Die Intensität wird dabei nicht kontinuierlich ausgewertet, sondern zu vier äquidistanten Zeitpunkten bzw. minimalen Zeitintervallen t_1 bis t_4 gemessen. Die Ausschnitte sind um jeweils ein Viertel der Schwingungsdauer zeitversetzt. Aus diesen punktuellen Intensitätsmessungen lässt sich ein sinusförmiges Signal rekonstruieren, für dessen Amplitude

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(I(t_1) - I(t_3))^2 + (I(t_2) - I(t_4))^2} \quad (5.21)$$

gilt. Der Offset ergibt sich aus dem Mittelwert der Intensitätsmessungen zu

$$B = \frac{1}{4} \cdot (I(t_1) + I(t_2) + I(t_3) + I(t_4)) \quad (5.22)$$

und schließlich der Phasenwinkel zu

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{I(t_1) - I(t_3)}{I(t_2) - I(t_4)}\right). \quad (5.23)$$

Um die Phasendifferenz zwischen ausgesandtem und empfangenem Signal zu erhalten, müssen die Phasenwinkel an beiden Signalen ermittelt und eine Differenz gebildet werden.

Eine weitere Möglichkeit, die aufgrund der rechnerischen Lösbarkeit innerhalb der Simulationsumgebung implementiert wurde, beruht auf dem Superpositionsprinzip. Hierbei ergibt sich das Gesamtsignal $Y(t)$ aus der Summe von Einzelsignalen, die von jedem Oberflächenelement als harmonische Schwingung reflektiert werden (s. Abb. 5.36). Die Überlagerung von Schwingungen gleicher Frequenzen ergibt wieder eine Schwingung der gleichen Frequenz, woraus sich die empfangene Modulationswelle

$$Y(t) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot \sin(2\pi f t + \varphi_k) \quad (5.24)$$

aus der Superposition der n Einzelwellen ergibt. In der komplexen Amplituden-/Zeiger-Darstellung kann dies durch

$$\begin{aligned} A e^{i\varphi} &= \sum_{k=1}^n a_k e^{i\varphi_k} \\ &= \sum_{k=1}^n a_k (\cos\varphi_k + i \sin\varphi_k) \end{aligned} \quad (5.25)$$

ausgedrückt werden. Der Phasenwinkel ergibt sich hierbei aus dem Quotienten des Imaginär- und Realteils zu

$$\varphi_0 = \arctan\left(\frac{\operatorname{Re} e^{i\varphi}}{\operatorname{Im} e^{i\varphi}}\right). \quad (5.26)$$

Auch hier gilt für die Berechnung von Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen ausgesandter Referenzwelle und der Summe der reflektierten Einzelwellen, dass für beide resultierenden Schwingungen ein Phasenwinkel ermittelt und schließlich eine Differenz gebildet werden muss.

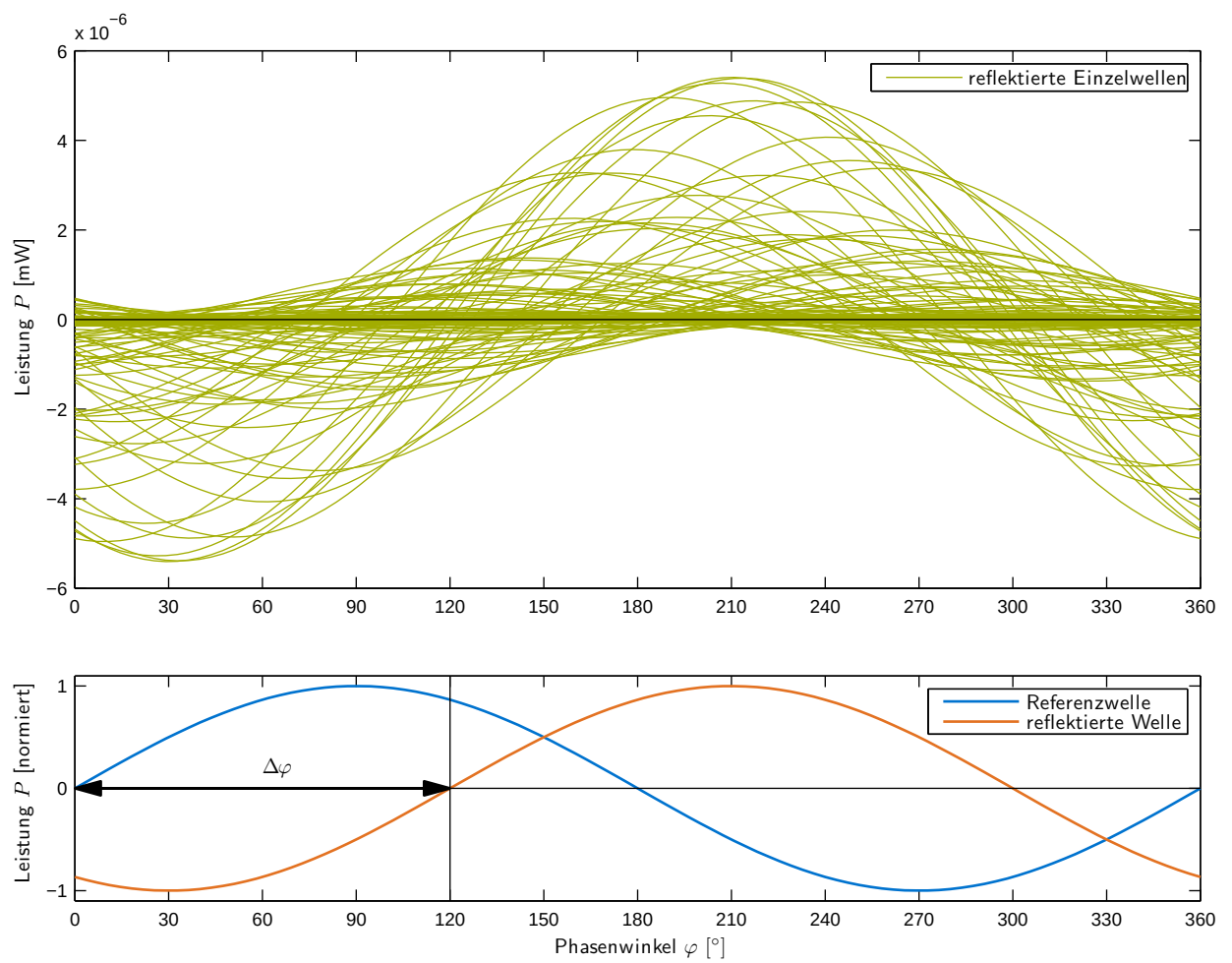


Abbildung 5.36: Harmonische Einzelschwingungen aus Oberflächenantwort (oben) und reflektierte Modulationswelle aus Superposition der Einzelwellen nebst Referenzwelle (unten)

5.4 Simulationsergebnisse

Dieser Abschnitt widmet sich unterschiedlichen Szenarien, die mit Hilfe der entwickelten Simulationsumgebung berechnet wurden. Die wesentlichen Aspekte der durchgeführten Simulationen haben zum Ziel, eine etwaige Abhängigkeit der Streckenmessung vom Einfallswinkel zu ermitteln und gegebenenfalls eine Korrektur daraus abzuleiten. Zunächst werden jedoch Mischsignale (vgl. Kapitel 5.1.3) in Anlehnung an (Kampmann u. a., 1988; Richter u. Juretzko, 2007) und (Schaer u. a., 2007) an einer Kante simuliert, um eine Verifikation der Simulationsumgebung vorzunehmen.

5.4.1 Verifikation am Stufenmodell

Vor der Durchführung von Simulationsrechnungen ist zunächst der Nachweis zu erbringen, dass die in den Abschnitten 5.2 und 5.3 beschriebene Modellumgebung in der Lage ist, aus realen Messungen entstandene Daten zu simulieren. Eine solche Verifikation wird im Folgenden an einem Stufenmodell exemplarisch durchgeführt und diskutiert. Etwaige Abweichungen lassen erste Rückschlüsse auf den tatsächlich wirksamen Laser zu und ermöglichen eine Anpassung der Modellrechnung.

Als Testoberfläche dienen zwei parallele Ebenen, die mit einem Versatz von 10 mm eine Stufe bilden. Die Oberfläche wurde im Sinne eines hohen Reflexionsgrades, aber zur Minimierung von Reflexionsmaxima, weiß und matt lackiert. Aus einer Entfernung von ca. 25 m wird ein fest ausgerichteter Laserstrahl eines Tachymeters TCRA 1101plus auf die Testoberfläche ausgerichtet und zur berührungslosen Distanzmessung eingesetzt. Abbildung 5.37 zeigt die Projektion des Laserspots im Moment einer mittigen Anzielung in einer Stellung, die einen Abschattungsbereich mit sich führt. Zusätzlich ist die gesamte Einheit für den Versuchsaufbau auf einen verschiebbaren Schlitten montiert (vgl. Abb. 5.38), wodurch sich eine lineare Bewegung mit hoher Präzision und Auflösung realisieren lässt. Die sukzessive Verschiebung der Testoberfläche bewirkt dabei ein Überstreichen des Laserspots über die Flächen und die Kante, wodurch in den Resultaten der bekannte Kanteneffekt (vgl. Kapitel 5.1.3) zu erwarten ist. Der schematische Ablauf dieser Verschiebung ist Abbildung 5.39 zu entnehmen.

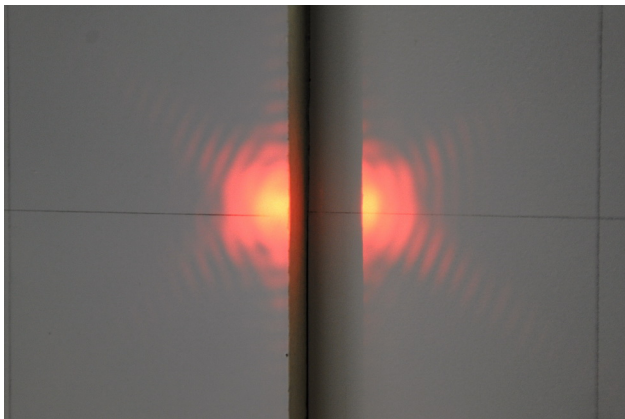


Abbildung 5.37: Laserspot mit Abschattungsbereich an der Kante des Stufenmodells

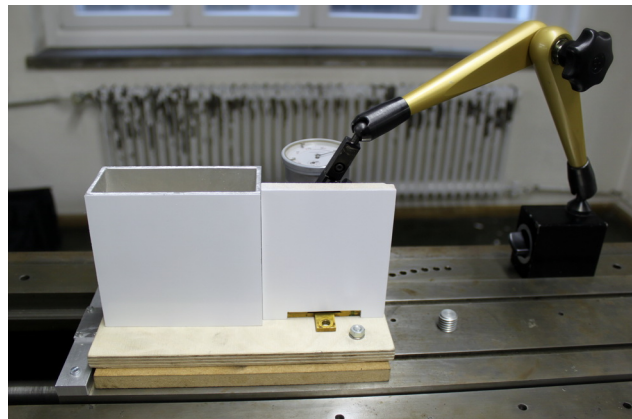


Abbildung 5.38: Stufenmodell montiert auf einem Verschiebeschlitten mit Messuhr

Die realen Messreihen beginnen bei einer Position, die den Laserstrahl etwa 40 mm links von Kante auf die vordere Ebene treffen lässt und endet etwa 40 mm rechts von der Stufe. Die vorgenommenen Verschiebungsschritte betragen in den unkritischen Bereichen 5 mm und im Übergangsbereich, wo der augenscheinliche Laserspot auf mindestens zwei Teilflächen wahrnehmbar ist, 1 mm. Zu den unterschiedlichen Positionen auf der Verschiebebahn werden jeweils sieben Distanzmessungen durchgeführt und gemittelt.

Die Messdatenerfassung erfolgt, wie aus Abb. 5.40 ersichtlich, bei drei unterschiedlichen Ausrichtungen der Stufe gegenüber dem Laserstrahl, um auch die Funktionalität der Sichtbarkeitsanalyse verifizieren zu können. Die tatsächlichen Ausrichtungen und somit Bewegungsrichtungen der Stufen ergaben sich durch eine externe

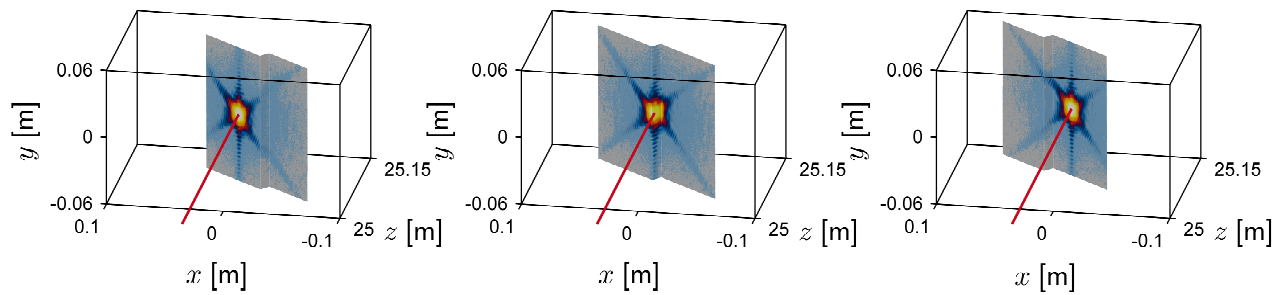


Abbildung 5.39: Simulierte Laserstrahlen am Stufenmodell an drei ausgewählten Positionen

Einmessung des Versuchsaufbaus jeweils in der Horizontalen zu $+3^\circ$ (im Weiteren als frontale Ausrichtung bezeichnet), -39° (keine Abschattung vorhanden) und schließlich $+46^\circ$ (mit zu berücksichtigenden Abschattungsbereichen). Eine Verkipfung der Testoberfläche gegenüber der Vertikalen wurde dabei vermieden (vgl. Tab. 5.4).

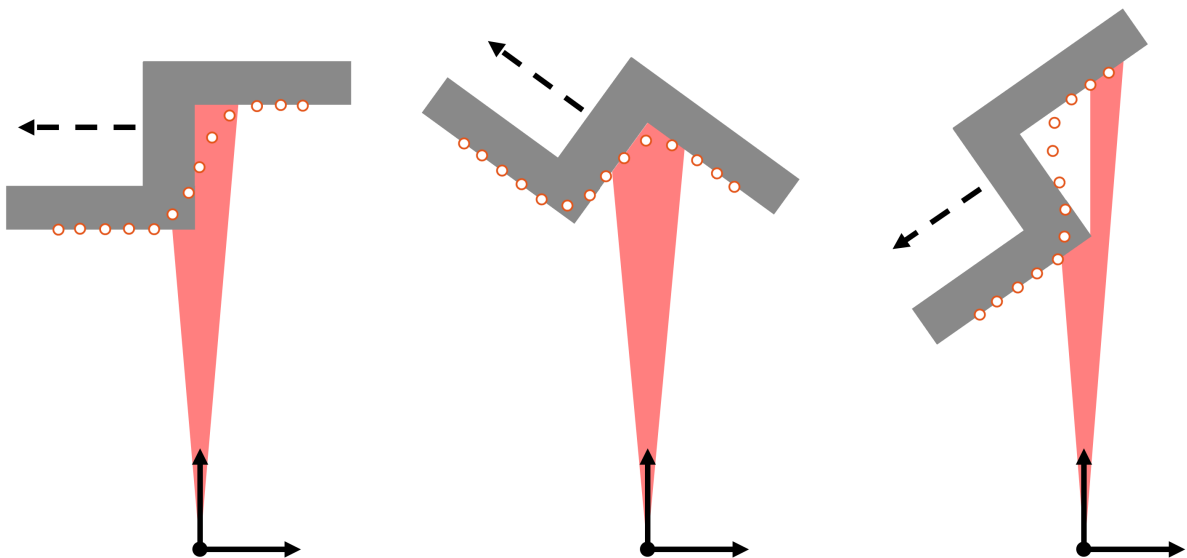


Abbildung 5.40: Konfiguration des Stufenmodells mit drei unterschiedlichen Ausrichtungen

Tabelle 5.4: Ausrichtungen der Stufe gegenüber dem Laserstrahl

Stellung der Stufe	Messdistanz [m]	Einfallswinkel (horizontal) [°]	Einfallswinkel (vertikal) [°]
1	24,99	3,33	-0,20
2	25,08	-39,46	-0,20
3	24,99	45,62	-0,20

Die Simulation dieser drei Messreihen erfolgte mit den Einstellwerten aus Tabelle 5.4, wobei die Translationen von 1 bzw. 5 mm parallel zum Verschiebeschlitten erfolgen. Diese sind im Rahmen der Simulation auf die im Ursprung des Lasers gelagerten Koordinatenachsen zu überführen. Als digitales Oberflächenmodell wurde das Objekt mit *Geomagic* mit den Sollmaßen $12 \times 14 \times 1 \text{ cm}^3$ nachgebildet und liegt als virtuelle Dreiecksvermaschung bestehend aus 137400 Dreiecksmaschen vor. Dies führt zu einer durchschnittlichen Größe eines Dreiecks von $0,13 \text{ mm}^2$ bei einer Bildauflösung des Lasers von $0,1 \text{ mm}$.

Durchgeführt wurden die Simulationen mit jeweils vier unterschiedlichen Lasermodellen (A bis D, s. Tab. 5.5), aus der sich nach Abschluss der Verifikation der zutreffendste Kandidat ergeben soll. Vor einer Diskussion der Ergebnisse, seien nachfolgend die verwendeten Lasermodelle kurz charakterisiert:

Lasermodell A verwendet einen modifizierten Gauß-Strahl mit den Radien, die vom Hersteller angegeben sind. Zur Gegenüberstellung mit den nach der D4 σ -Methode ermittelten Strahlradien wurde Lasermodell B eingeführt. Dabei beschränkt sich die Methode auf die Übernahme der geometrischen Kenngrößen Strahlradien und Beugungsmaßzahlen – die Laserintensitätsverteilung basiert nach wie vor auf der Idealverteilung innerhalb eines Gauß-Strahls. Da davon auszugehen ist, dass der aktive Bereich des realen Laserspots weder durch Modell A noch Modell B beschrieben werden kann, verwenden die Modelle C und D daher die aus den indirekten Abbildungen ermittelten Intensitätsverteilungen. Somit stellen diese beiden Modelle keine Gauß-Strahlen dar und eine Beugungsmaßzahl kann nicht bestimmt werden. Um eine Abgrenzung des Strahlrandes vergleichbar den Lasermodellen A und B zu erzielen, werden zwei Schwellwerte von 25 % und 60 % eingeführt, die zu vergleichbaren *Footprints* wie bei A und B führen.

Tabelle 5.5: Zusammenstellung modellierter Laserstrahlen (Angaben bezogen auf eine Entfernung von 50 m)

Lasermodell	Beschreibung	Radien $r_x \times r_y$ [mm ²]	Spotgröße A [mm] ²	Beugungsmaßzahl $M_x^2 \times M_y^2$
A	modifizierter Gauß-Strahl mit Laserspotgrößen aus Herstellerspezifikationen (1 σ)	5,0 $\times$ 10,0	157,1	6,7 $\times$ 7,7
B	modifizierter Gauß-Strahl mit Strahlradien aus D4 σ -Methode (2 σ)	11,5 $\times$ 19,0	686,4	25,1 $\times$ 26,2
C	Intensitätsverteilungen aus indirekter Abbildung (Schwellwert 25%)	12,0 $\times$ 21,0	791,7	nicht bestimmbar
D	Intensitätsverteilungen aus indirekter Abbildung (Schwellwert 60%)	5,0 $\times$ 11,0	172,7	nicht bestimmbar

Die Resultate der Simulationen sind den Abbildungen 5.41 bis 5.43 zu entnehmen. Die jeweils oberen Abbildungen stellen die gemessenen bzw. vier simulierten Streckenmesswerte der Lasermodelle A bis D entlang des Verschiebewertes sowie die Soll-Geometrie dar. Die unteren Abbildungen stellen schließlich die Abweichungen der jeweiligen Simulationen zu den tatsächlich gemessenen Streckenmesswerten dar.

Abbildung 5.41 zeigt die Ergebnisse der 1. Stellung. Durch die frontale Ausrichtung zum Laserstrahl erscheint die Soll-Geometrie als klare Bruchkante mit einer Höhe von 10 mm zwischen der vorderen und hinteren Ebene. Die berührungslosen Messungen beinhalten die zu erwartenden Mischsignale, die zu einem verschmierten Übergang zwischen den beiden Frontalebenen führen. Der Bereich, in dem die Mischsignale auftreten, erstreckt sich über eine Wegstrecke etwa 20 mm. Weitere Abweichungen von der Soll-Geometrie liegen im Bereich weniger als 1/10 Millimeter und spiegeln das zufällige Messrauschen bzw. die hohe Präzision wieder. Für die 2. Stellung (Abbildung 5.42) ergibt sich für die Soll-Geometrie keine klare Kante mehr, sondern ein linearer Übergangsbereich. Dieser kommt zustande, weil hier die dritte Teilfläche, nämlich die Stufenseite selbst angemessen wird. Dabei ergeben sich zwei getrennte Übergangsbereiche mit geringen Streckenverfälschungen aufgrund der Mischsignale. Zwischen diesen Bereichen besteht die Möglichkeit, dass der aktive Bereich des Laserspots ausschließlich die Seitenfläche beleuchtet. Aufgrund der Ausrichtung von -39° projiziert sich die Stufe als Versatz von nunmehr 13 mm in der Distanzänderung. In der 3. Stellung des Stufenmodells (Abbildung 5.43) beträgt der tatsächliche Versatz in der Distanzänderung aufgrund der Ausrichtung von 45° schließlich 14 mm. Der beinhaltete Abschattungsbereich reduziert die Anzahl der beleuchteten Teilflächen wieder auf zwei und führt zu einem gemeinsamen Übergangsbereich mit deutlich größeren Streckenverfälschungen bedingt durch die Mischsignale.

Betrachtet man die Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Strecken, so wird schnell deutlich, dass die beiden Lasermodelle B und C mit Abweichungen von 2 bis 4 mm nicht in der Lage sind, die realen Messwerte abzubilden. Die Begründung liegt, wie in Abschnitt 5.2.3.4 bereits angesprochen und in Tabelle 5.5 gelistet, in den als zu groß angesetzten Laserspots. Dies deutet darauf hin, dass die nach ISO bestimmten Radien zwar korrekte Werte bezüglich der Intensitätsverteilung liefern, aber dass diese nicht dem wirksamen Laserspot zur berührungslosen Distanzmessung entsprechen. Die beiden Lasermodelle können daher für weitere Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Wie aus allen drei Darstellungen hervorgeht, ist das theoretische Lasermodell A hingegen in der Lage, die Messwerte weitestgehend zu reproduzieren. Die Abweichung gegenüber den Messwerten beträgt in den Über-

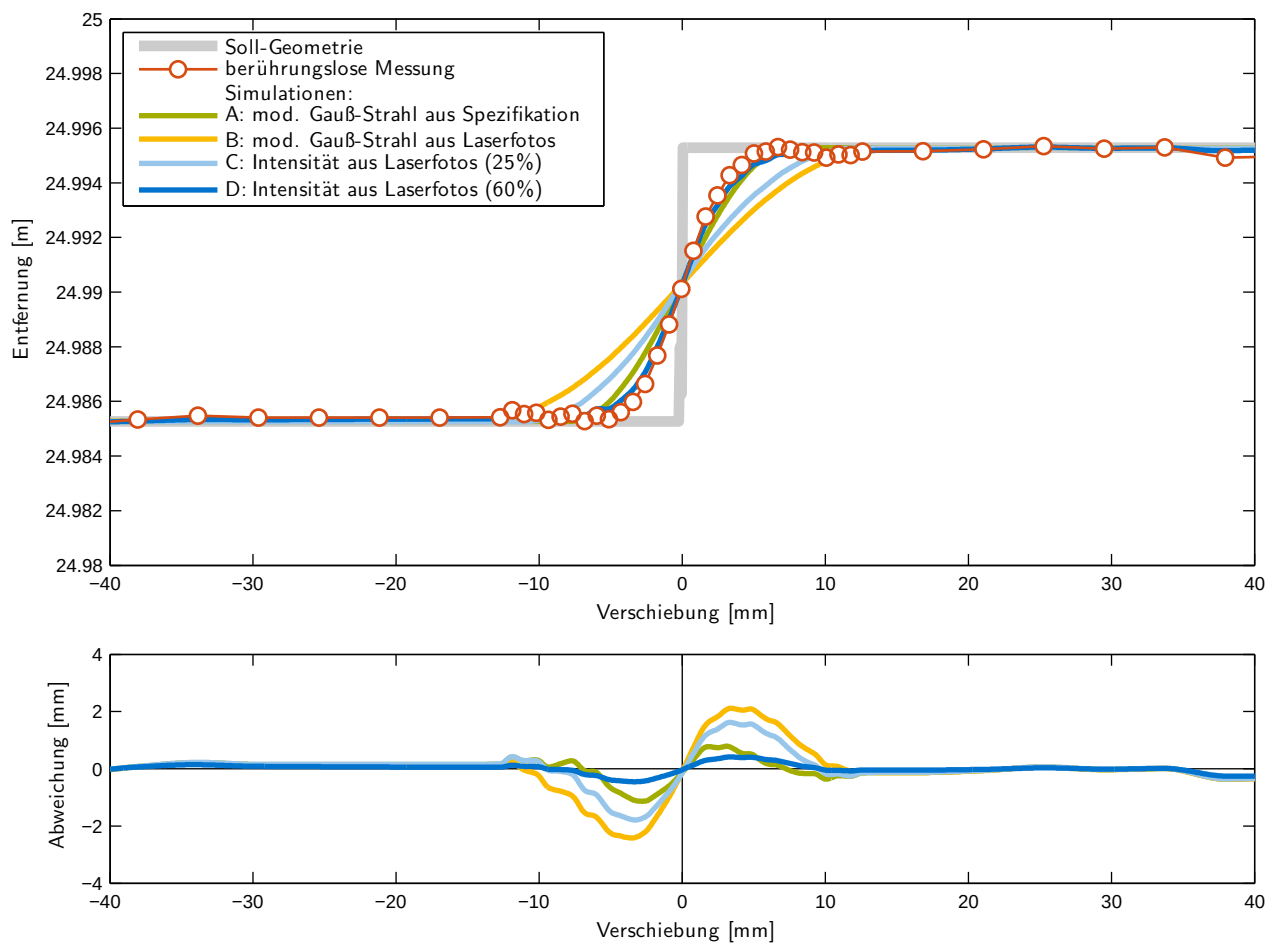


Abbildung 5.41: Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell bei frontaler Ausrichtung (Stellung 1 bei 3°)

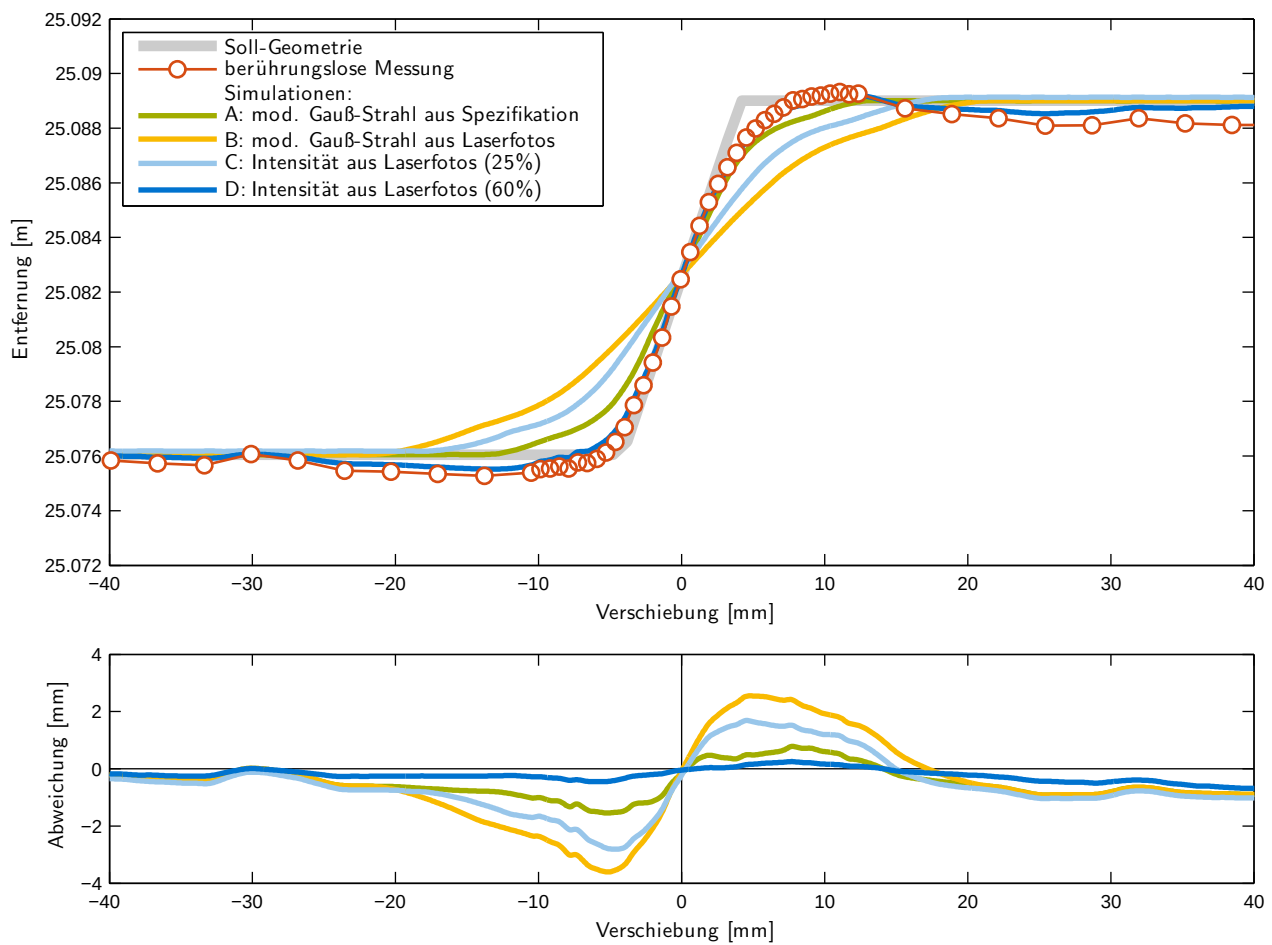


Abbildung 5.42: Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell (Stellung 2 bei -39°)

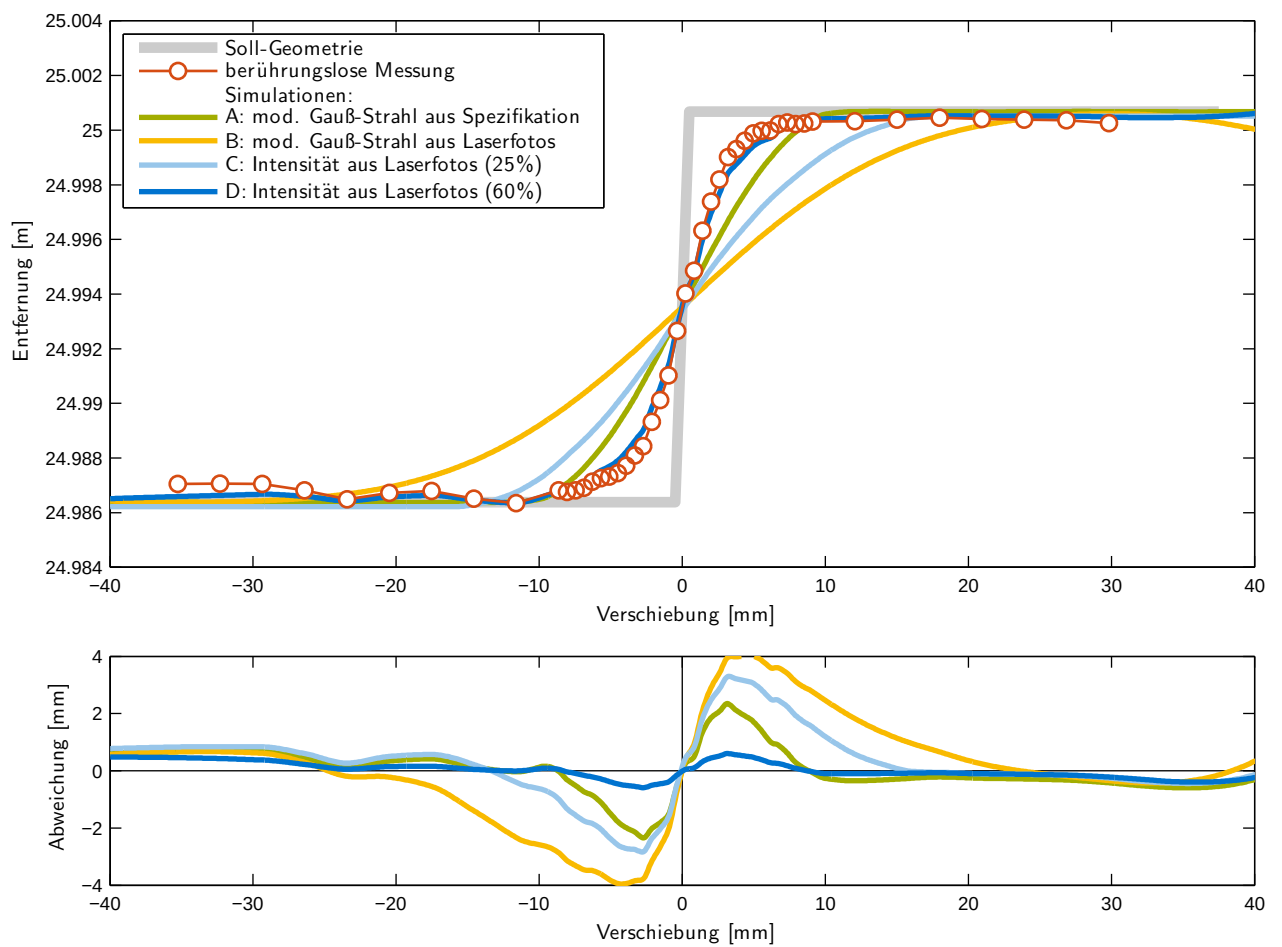


Abbildung 5.43: Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell (Stellung 3 bei 45°)

gangsbereichen aber dennoch stellenweise bis zu 2,2 mm. Dies weist darauf hin, dass zwar die Laserspotgröße adäquat gewählt wurde, aber die Annahme der idealen Intensitätsverteilung innerhalb des modifizierten Gauß-Strahls ebenfalls nicht ausreicht, um eine realitätsnahe Simulation zu bewerkstelligen.

Unter weitestgehender Beibehaltung der Laserspotgröße werden bei den Simulationen mit Lasermode D die Abweichungen von den realen Messwerten weiter reduziert: Diese betragen für die Stellungen 1 und 2 lediglich 0,1 bis 0,2 mm, für Stellung 3 nur 0,4 mm. Dabei können zum einen die Herstellerangaben bezüglich Laserspotgröße bestätigt werden, zum anderen wird der gewinnbringende Einfluss der Berücksichtigung von aus CCD-Aufnahmen ermittelten Intensitätsverteilungen deutlich. Auch wenn sich diese Verifikation auf drei Fallbeispiele an einem Stufenmodell beschränkt, kann mit dieser Vorgehensweise nachgewiesen werden, dass Lasermode D die besten Resultate erzielt und daher für weitere Untersuchungen in Betracht kommt.

5.4.2 Einfluss des Einfallswinkels an einer idealen Ebene

Der Einfluss des Einfallswinkels wurde in Kapitel 5.1.5 erwähnt. Inwieweit sich diese Theorie unter idealen Bedingungen bestätigen lässt, soll anhand nachfolgender Simulation überprüft werden. Hierzu wird der modifizierte Gauß-Strahl (Lasermode A) mit einer idealisierten Intensitätsverteilung auf eine Ebene projiziert. Die Einfallswinkel sind hierbei durch eine horizontale und vertikale Verkipfung der Ebene bewerkstelligt.

Abbildung 5.44 stellt die Abweichungen zu den Sollwerten in unterschiedlichen Entfernungen dar. Dabei fällt zunächst auf, dass die Abweichungskurven symmetrisch zur frontalen Ausrichtung verlaufen. Daraus lässt sich schließen, dass es keine Rolle spielt, in welche Richtung die Verkipfung bzw. Verdrehung erfolgt. Ebenso ist eine grundsätzliche Verkürzung der Strecken zu erkennen. In Abschnitt 5.1.5 wurde dieser Effekt aufgrund der unterschiedlichen Größe der beleuchteten Teilflächen seitlich der Zielachse prognostiziert. Dieser Effekt nimmt mit zunehmender Entfernung bzw. bei konstantem Divergenzwinkel im Fernfeld und einer damit einhergehenden Vergrößerung des Laserspots zu.

Die Größenordnung liegt jedoch insgesamt im Mikrometerbereich und somit weit unterhalb einer relevanten Dimension. Dennoch sind die erwarteten Effekte grundsätzlich zu erkennen und stützen somit die genannte Theorie. Verbleibende Offsets und wechselhafte Abweichungen in den extremen Randbereichen der Verkipfung, in denen unter normalen Umständen ohnehin keine Messung erfolgen könnte, sind durch numerische Effekte zu erklären. Der Einfluss des Einfallswinkels an der Idealebene ist in diesem Fall schlussfolgernd als vernachlässigbar einzustufen.

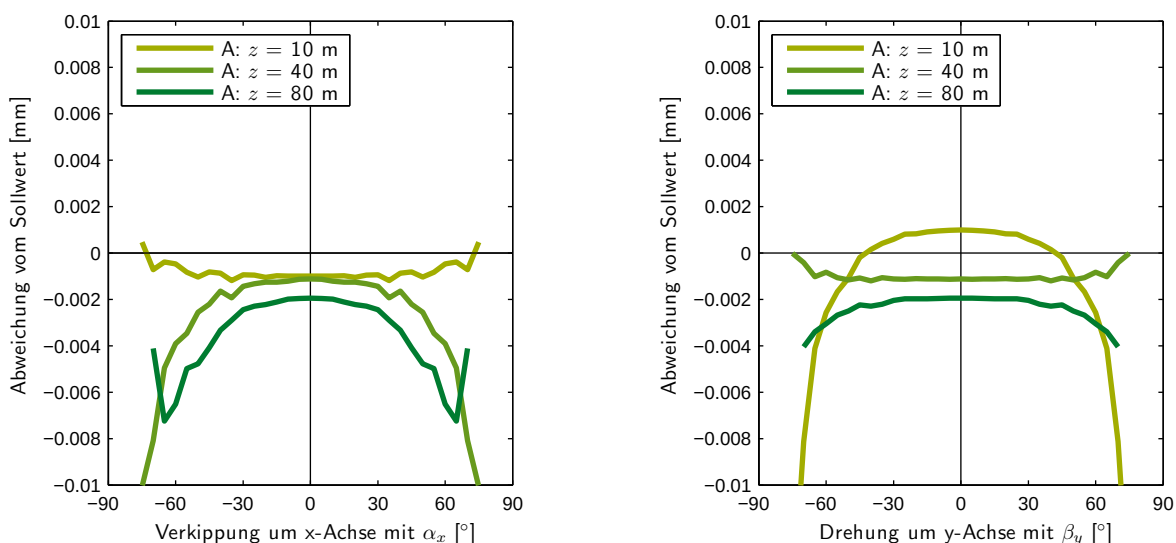


Abbildung 5.44: Simulierte Distanzmessungen eines modifizierten Gauß-Strahls (Lasermode A) auf eine ideale Ebene. Links: Rotation um die vertikale x-Achse, Rechts: Rotation um die horizontale y-Achse

Ein deutlich signifikanteres Ergebnis erhält man, wenn man auch hier von der idealen Intensitätsverteilung auf eine reale Intensitätsverteilung übergeht. Für Lasermodell D wurde die identische Versuchsreihe durchgeführt und in Abbildung 5.45 dargestellt. Zwar liegt auch hier die Abweichung im Nahbereich (hier 10 m) nahe Null, aber mit zunehmender Entfernung bzw. Laserstrahlaufweitung steigt der Einfluss an. Die Größenordnung liegt im größeren Entfernungsbereich von 80 m bereits im Millimeterbereich ab einem Einfallswinkel von 45° . Auffällig ist zudem, dass sich in dieser Simulationsreihe keine Achsensymmetrie, sondern vielmehr eine Punktsymmetrie einstellt. Dies deutet darauf hin, dass, wie bereits in den Abbildungen 5.16 und 5.17 zu erkennen, eine ungleichmäßige Verteilung der Intensitäten im Laserprofil das Streckenmessergebnis stark beeinflusst und die eigentliche Ursache für den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel, Messentfernung und Streckenmesswert darstellt.

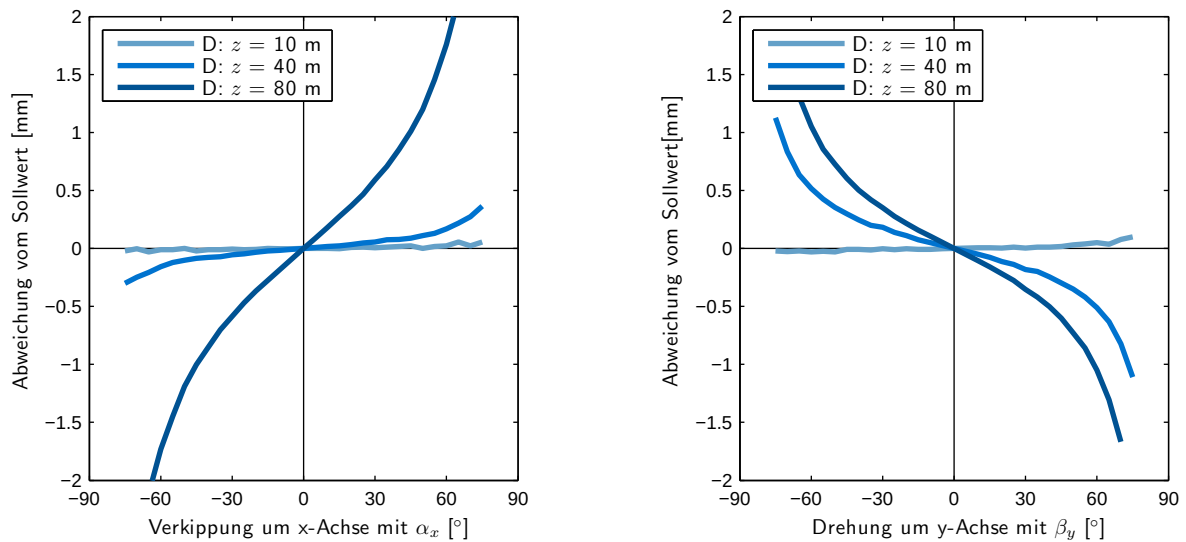


Abbildung 5.45: Simulierte Distanzmessungen des Lasermodells D auf einer ideale Ebene. Links: Rotation um die vertikale x-Achse, Rechts: Rotation um die horizontale y-Achse

Eine weitere Darstellung der Simulation ist durch Abbildung 5.46 gegeben. Hierin wird ein zusätzliches Entfernungprofil mit einer Auflösung von 1 m dargestellt. Die beiden Diagramme sind nach Rotationsachse getrennt voneinander zu betrachten: dargestellt sind die jeweils positiven Verkippungen um die Horizontalachse (oben) und Verdrehungen um die Vertikalachse (unten). Bis zu einer Distanz von etwa 37 m liegen die simulierten Abweichungen unterhalb 0,5 mm, nehmen dann aber mit Ausnahme von Teilbereichen zwischen 50 und 60 m bis zu einem Betrag von 1 bis über 2 mm zu. Es kann für diesen Bereich nicht ausgeschlossen werden, dass die Ursache hierfür in der Qualität der Laserfotografien begründet liegt – generell ist aber auch hier eine Zunahme der Abweichungen mit zunehmenden Einfallswinkeln zu verzeichnen. Die Abweichungen treten wieder mit umgekehrtem Vorzeichen auf, so dass sich bei einer positiven Verkippung eine Verkürzung und bei der Verdrehung eine Verlängerung der simulierten Distanzen ergeben.

5.4.3 Einfluss des Einfallswinkels an einer Betonoberfläche

Die vorgestellten Simulationsrechnungen belegen, dass die Simulationsumgebung in der Lage ist, einen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Messentfernung, Einfallswinkel und einer resultierenden Streckenabweichung zu reproduzieren. Weiter stellt sich die Frage, inwieweit auch realitätsnahe Oberflächen in die Simulation eingebunden werden können. Beispielhaft wird hierzu die beschriebene Simulationsreihe mit dem bereits in Abbildung 5.25 dargestellten Bruchstück einer Betonoberfläche der Hochbrücke Freimann (vgl. Kapitel 6) erstellt. Die hochauflösend eingescannte Oberfläche ist in den Abbildungen 5.27 und 5.47 nochmals im Detail dargestellt und weist dabei eine Streuung von ca. 1 mm um eine mittlere Ebene auf und lässt die Spuren der ursprünglichen Holzverschalung deutlich erkennen. Sie weist an der Kante zweier Schalungsbretter eine beinahe 2 mm hohe Stufe auf und stellt somit eine charakteristische Textur dar, die nur bedingt als zufällig zu bezeichnen ist.

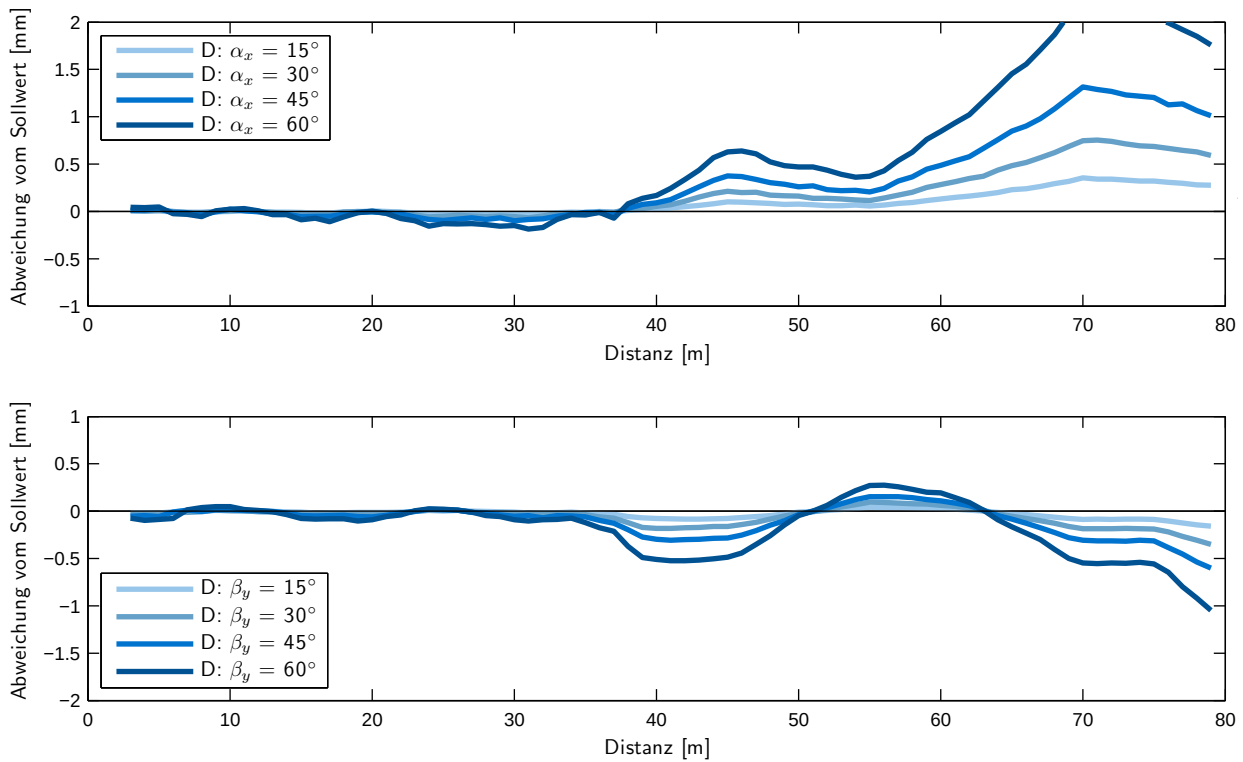


Abbildung 5.46: Simulierte Distanzmessungen des Lasermodells D auf einer ideale Ebene (Entfernungsprofil).
Oben: Rotation um die vertikale x-Achse, Unten: Rotation um die horizontale y-Achse

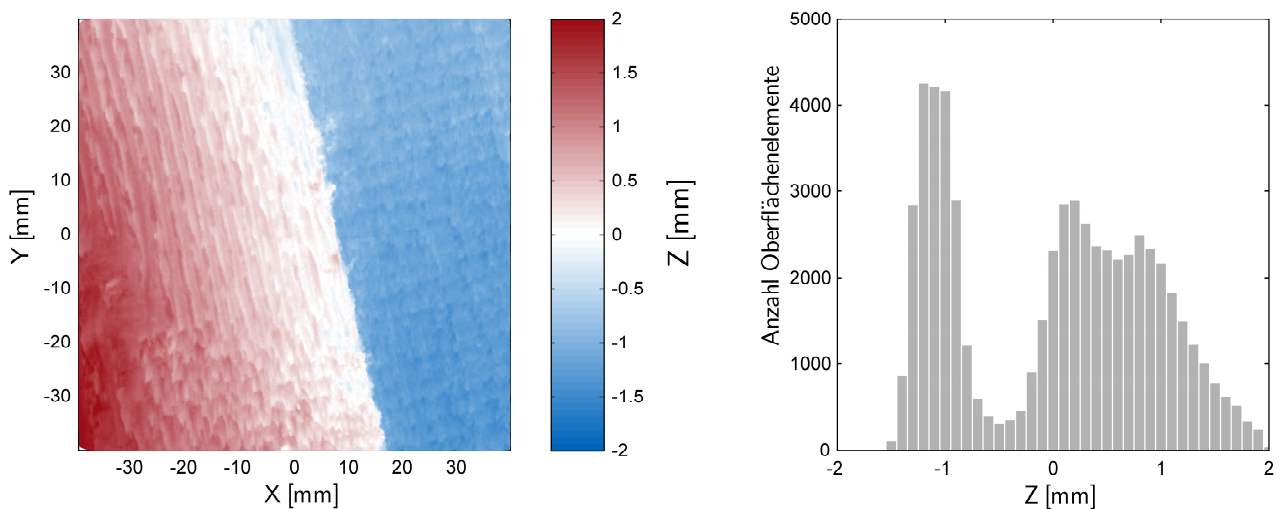


Abbildung 5.47: Vermaschte Punktwolke der Betonoberfläche auf einem Ausschnitt von 40 mm × 40 mm (links) und zugehörige Häufigkeitsverteilung der orthogonalen Abstände zu einer mittleren Ebene (rechts)

Abbildung 5.48 zeigt wiederum einen deutlichen Zusammenhang zwischen Auftreffwinkel und einer resultierenden Streckenabweichung. Bei senkrechtem Einfall liegen keine Abweichungen vom Sollwert vor, wohingegen diese bei zunehmend flachen Auftreffwinkeln auch für kurze Distanzen Beträge von ca. 1 mm annehmen können.

Dabei fällt auf, dass sich in diesem Beispiel die Abweichungen bei der Verdrehung um die y-Achse nicht symmetrisch auswirken, was dem Umstand der asymmetrischen Oberflächentopographie geschuldet ist. Somit überlagern sich erwartungsgemäß die Effekte Auftreffwinkel und Oberflächenrauheit. Selbstverständlich sind diese Ergebnisse nur wenig repräsentativ, da sie in erster Linie vom Anzielpunkt abhängig sind. Sie liefern aber Erkenntnisse für eine Genauigkeitsabschätzung beim Einsatz berührungslos messender Verfahren. Weiters zeigt die Simulation das Potenzial der Simulationsumgebung hinsichtlich der Untersuchung weiterer Oberflächenproben.

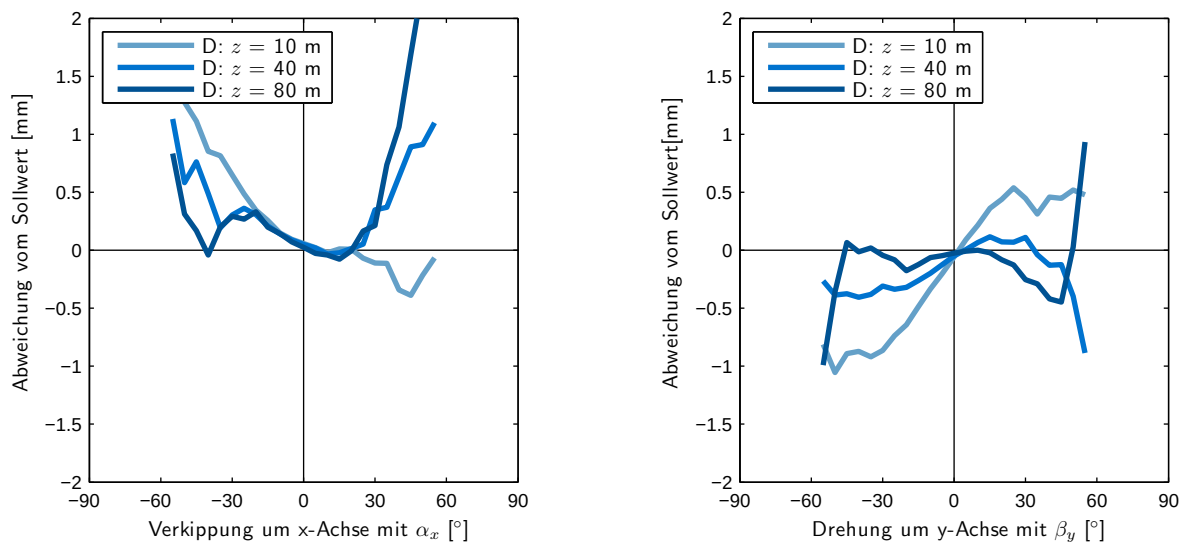


Abbildung 5.48: Simulierte Distanzmessungen des Lasersmodells D auf einer Betonoberfläche. Links: Rotation um die vertikale x-Achse, Rechts: Rotation um die horizontale y-Achse

Kapitel 6

Entwicklung eines Mess- und Auswerteverfahrens zur Brückenüberwachung

Aus den bisherigen Kapiteln ist abzuleiten, dass in Abhängigkeit der Aufgabenstellung und unter Berücksichtigung aller gewonnenen Erkenntnisse das berührungslose, tachymetrische Scanning durchaus für geodätische Überwachungsaufgaben geeignet ist. Im Zuge der Restnutzungsphase und eines anschließend geplanten Rückbaus einer Hochbrücke war die Entwicklung eines Messkonzeptes zur flächenhaften Überwachung einer Brückenunterseite aus Beton mit einer Gesamtfläche von rund 20.800 m² gefragt. Das folgende Kapitel befasst sich daher mit der praktischen Umsetzung einer innovativen Überwachungsaufgabe, wie sie erstmals von Penka u. a. (2005) und Schäfer u. a. (2006) vorgestellt wurde. Als Demonstrationsbauwerk wird die inzwischen durch einen Neubau ersetzte Hochbrücke Freimann der Bundesautobahn (BAB) 9 zwischen München und Nürnberg/Berlin heran gezogen.

6.1 Projektvorstellung Hochbrücke Freimann

6.1.1 Objektbeschreibung

Die A9 zwischen Berlin und München ist eine zentrale Verkehrsader im Bundesautobahnnetz, die in Bayern die beiden Metropolregionen Nürnberg und München als sechsstreifig ausgebaute Autobahn verbindet. Die A9 schließt im Norden der Landeshauptstadt unmittelbar an den Mittleren Ring an. Der Flughafen (Franz-Josef-Strauß), das neue Fußballstadion (Allianz-Arena) und die Entwicklungsregionen im Norden der Stadt werden so über die A9 von der Innenstadt aus erschlossen. Vor dem Autobahnende befindet sich die Hochbrücke Freimann, die mit einer Länge von 585 m die Autobahn über die stark frequentierte, überirdisch verlaufende U-Bahn Linie U6, den Eisenbahn-Nordring für den Güterverkehr vom Münchner Containerbahnhof in Richtung Süden sowie den Frankfurter Ring führt (s. Abbildung 6.1). Damit sind neben der Autobahn selbst drei weitere bedeutende Verkehrswege berührt. Im Bereich der Brücke befinden sich zudem Anschlussrampen für die Ein- und Ausfahrt zur Autobahn. Die umgangssprachliche Bezeichnung *Tatzelwurm* verdeutlicht die komplexe Gesamtsituation, in die das Bauwerk eingebunden ist.

Während zum Zeitpunkt des Baus der Brücke zwischen 1958 und 1960 die gesamte Verkehrsbelastung im Bereich dieses Verkehrsknotens bei ca. 20.000 Kfz/Tag lag, beträgt heute der durchschnittliche tägliche Verkehr allein auf der Autobahn ca. 100.000 Fahrzeuge pro Tag, wobei über die Aus- und Einfahrt der Anschlussstelle ca. 40.000 Fahrzeuge die Autobahn verlassen bzw. auf die A9 auffahren (Fiedler u. a., 2008).

Der Brückenüberbau der Hochbrücke Freimann war als einteiliger Überbau, der als mehrzelliger Spannbeton-Hohlkasten mit vorgespannten Längs- und Querträgern hergestellt wurde, konzipiert. Aufgrund umfangreicher, durch Tausalze ausgelöste, Korrosionsschäden (s. Abschnitt 6.1.2) am eingebauten Spannstahl und Betonstahl war die dauerhafte Standsicherheit des Brückenüberbaus nicht mehr gegeben. Da jedoch eine Erneuerung des Bauwerks gegenüber einer grundhaften Gesamtinstandsetzung die wirtschaftlichere und günstigere Lösung darstellte, wurde ein Rückbau mit anschließendem Neubau zweier getrennter Brückenbauwerke geplant (ABD, 2010).

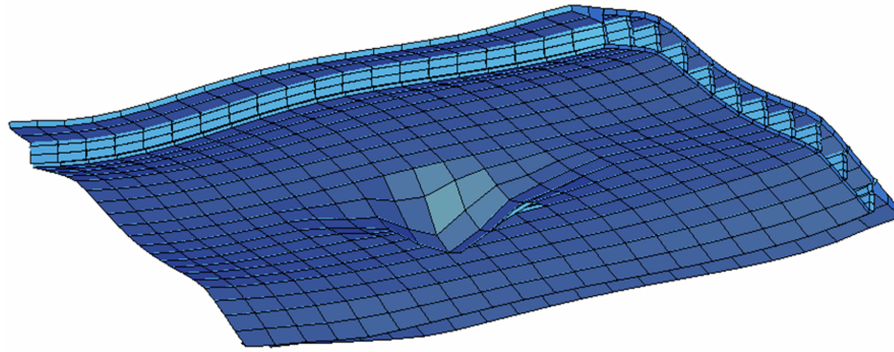


Abbildung 6.2: Simulation der Verformung aufgrund eines Schadens (Penka u. a., 2005)

durch die Hohlräume zwischen den Stegen kriecht und die Bausubstanz beurteilt. Nach einer Schätzung würde eine vollständige Inspektion jedoch drei Monate in Anspruch nehmen. Somit war eine wirtschaftlichere Methodik zu entwickeln, um einen möglichen Schaden frühzeitig erkennen zu können. Ebenso ergab die Simulation, dass jedoch ein Steifigkeitsverlust des Steges durch das Ablösen der Platte zu zusätzlichen Verformungen an der Plattenunterseite führt. In der Berechnung treten in der Mitte der Ausbeulung Verformungsdifferenzen von 1,3 bis 8 mm auf, wobei größere Werte bei einer Schädigung in Feldmitte als beim Schadensbild im Stützenbereich vorhanden sind. Abbildung 6.2 zeigt überhöht die rechnerisch ermittelten Verformungen in Feldmitte bei einem Ausfall der Schubdügel an zwei Innenstegen über eine Länge von ca. 10 m.

6.2 Geodätische Überwachung während der Restnutzungsphase

6.2.1 Grundkonzept und Anforderungen an die Ingenieurgeodäsie

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Simulationsrechnungen wurde ein Messverfahren gesucht, mit dem vertikale Verformungsdifferenzen der Plattenunterseite zwischen den Messepochen flächendeckend und berührungslos mit einer Standardabweichung < 2 mm bestimmt werden können. Dabei sollten die zu erwartenden temperaturbedingten Brückenbewegungen berücksichtigt und ein weitestgehend automatisiertes Messverfahren angestrebt werden, um das Konzept bei Bedarf zu einem kontinuierlich messenden Monitoringsystem erweitern zu können.

Deuten im Anschluss an die Messungen die ermittelten Verformungen auf einen möglichen Schaden hin, so ist jener Bereich visuell zu kontrollieren, ob tatsächlich ein Schaden am Bauwerk vorliegt. Von dieser Vorgehensweise ist eine Reduktion der zeitintensiven visuellen Inspektionen aller Brückenbereiche in regelmäßigen Zeitintervallen und somit ein wirtschaftliches Einsparpotenzial zu erwarten.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen im Labor und an der Brücke hat sich gezeigt, dass mittels spezieller Messanordnungen und Auswertestrategien auf der Basis der berührungslosen Distanzmessung die Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen möglich ist, wobei die wissenschaftliche Erklärung der aufgetretenen Phänomene nach den Erfahrungen aus der Praxis erfolgte. Abbildung 6.3 zeigt die grundlegende Messanordnung des Verfahrens innerhalb eines Brückenfeldes. Hierin werden, ausgehend von einem hochpräzisen Grundlagnetz, aus einem zuvor digitalisierten CAD-Plan Objektpunkte in einem Raster von ca. $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ mit einem motorisierten Servotachymeter automatisch angefahren und dreidimensional erfasst (s. a. Abbildung 6.5). Werden diese Punkte zu unterschiedlichen Epochen wiederholt gemessen, lässt sich aus den vertikalen Differenzen der identischen Punkte auf einen eventuellen Schadensfall schließen – insbesondere, da der zu erwartende Schaden mehrere Objektpunkte einschließt und sich in einem Differenzbild der Höhenkomponente als beulenartige Struktur zu erkennen gibt.

Es ist jedoch zu beachten, dass horizontale Gleitlager eine durch Temperatureinflüsse hervorgerufene Brückenbewegung zulassen. Somit befindet sich der physikalisch homologe Punkt E2 in der Folgeepoche, unabhängig von Schadensfällen, an einer von E1 verschiedenen Position. Diese Translation gilt es über 72 fest an der

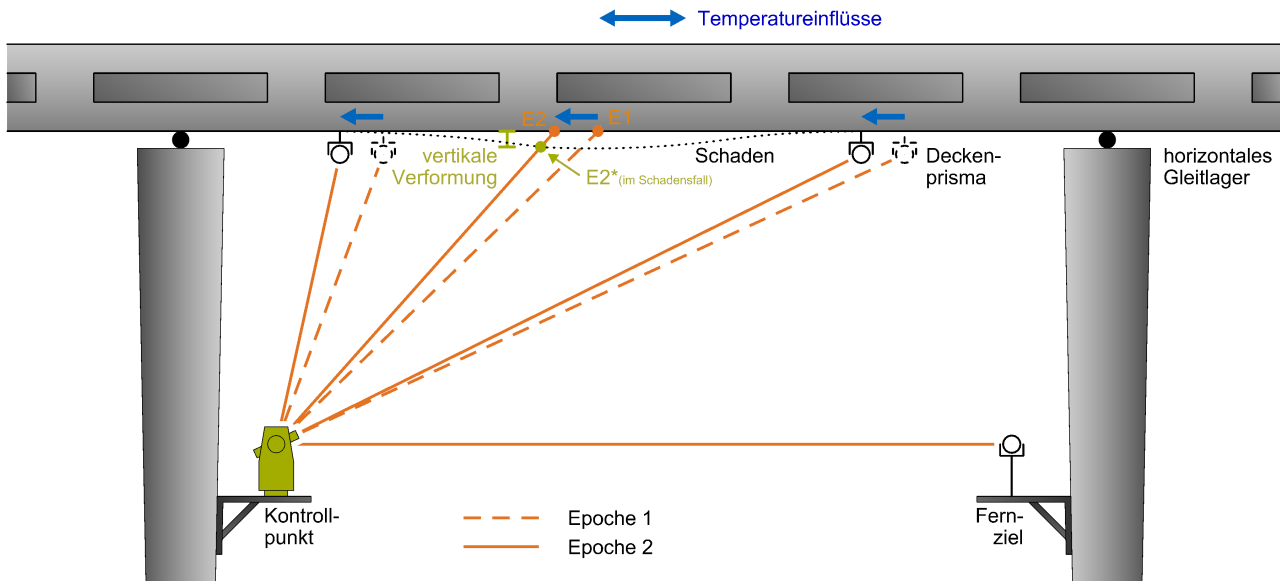


Abbildung 6.3: Geodätisches Überwachungskonzept für die Hochbrücke Freimann

Brückendecke installierte Prismen (Deckenprismen) zu bestimmen und zu berücksichtigen. Die Vorgehensweise hierfür wird in Abschnitt 6.2.2 ausführlich dargestellt und diskutiert. In Abbildung 6.4 sind die an der Decke montierten Prismen als helle Punkte durch die Reflexion des Kamerablitzes zu erkennen. Zudem zeigt die Abbildung den anschließenden Scanvorgang für die Erfassung der Objektpunkte.



Abbildung 6.4: Deckenprismen an der Brückenunterseite (links) und berührungslose Messung der Objektpunkte von einem Konsolenstandpunkt aus (rechts)

Für die Vermessung der Objektpunkte ist vorab ein stabiles Festpunktfeld zu schaffen, in das vorrangig die massiven Brückenpfeiler als Beobachtungsstandpunkte mit einbezogen sind. Diese weisen nachweisbar keine nennenswerten Deformationen auf und bieten von der Innenseite aus ideale Sichtlinien auf die Brückenunterseite. Abbildung 6.5 ist die Netzkonstellation inklusive Fehlerellipsen und der feldweisen Aufteilung der Objektpunkte zu entnehmen.

An insgesamt 22 dieser Pfeiler werden eigens gefertigte Aluminiumkonsolen montiert, die zum Schutz vor Vandalismus so konzipiert sind, dass sie nur für die Dauer der Messepoche installiert werden müssen. Der schrittweise Aufbau dieses temporären Festpunktfeldes ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

Für eine reproduzierbare Wiederherstellung der Netzknoten in den Folgeepochen sorgt eine permanent montierte Grundplatte und Passstifte. Um geringe Fertigungsungenauigkeiten zu eliminieren, sind Konsolen und Dreifüße indessen durchnummeriert und können in jeder Epoche derselben Grundplatte zugeteilt werden. Der

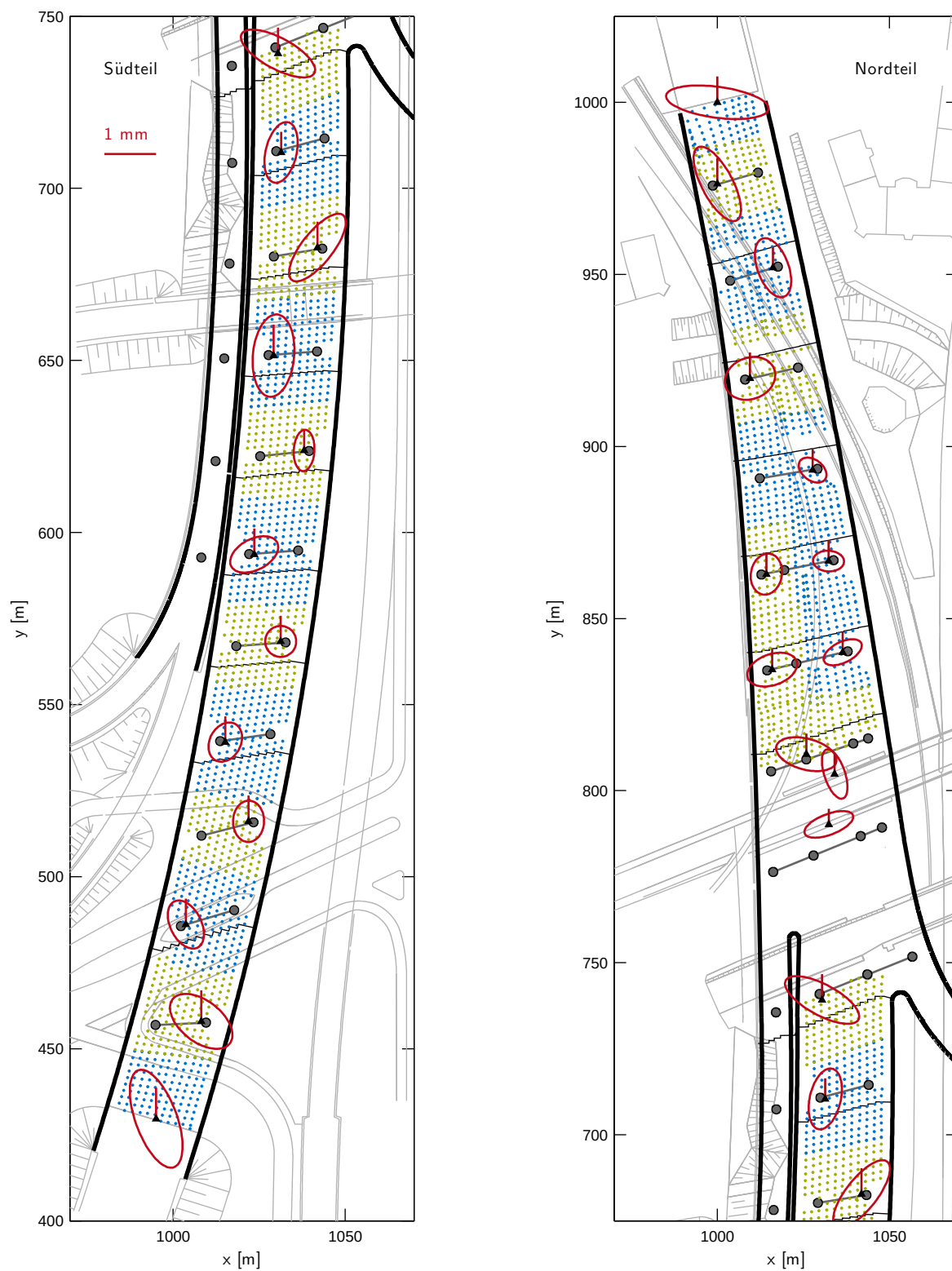


Abbildung 6.5: Grundlagenetz mit Fehlerangaben und berührungslos erfasste Objektpunkte der Überwachungsmessungen an der Hochbrücke Freimann. Die farbliche Unterscheidung der Objektpunktbereiche stellt die Beobachtungsbereiche eines Instrumentenstandpunktes dar.

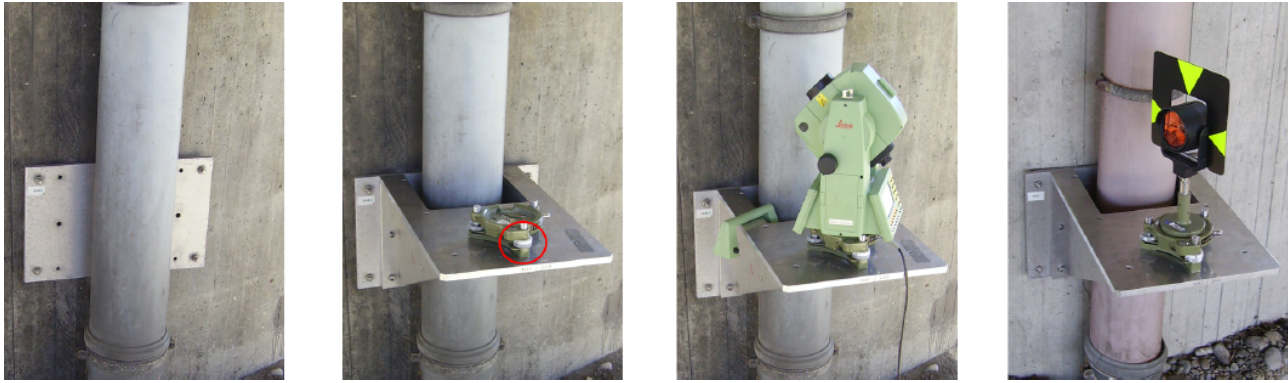


Abbildung 6.6: Aufbau des temporären Festpunktfeldes (von links nach rechts): Grundplatte, Konsole mit Zwangszentrierung und blockierter Dreifußschraube, Instrumentenstandpunkt, Netzpunkt als Fernziel zur Stationierung

Dreifuß ermöglicht eine Zwangszentrierung in der Lage auf wenige Zehntelmillimeter. Zudem ist eine Dreifußschraube mit einem Kunststoffring blockiert, sodass das Gerät lediglich über zwei Dreifußschrauben horizontalisiert werden kann. Befindet sich diese blockierte Dreifußschraube stets an derselben Position, so ist auch eine Wiederherstellung der Instrumentenhöhe gewährleistet. Zunächst kann demnach bei den Instrumentenstandpunkten von einem bekannten Standpunkt ausgegangen werden, dessen Orientierungsunbekannte durch die Beobachtung mehrerer Fernziele gelöst werden kann. Im Zuge einer Weiterentwicklung des Messkonzeptes ist eine Umstellung auf einen Stativaufbau als Beobachtungsstandpunkt und folglich eine Freie Stationierung zu realisieren. Abschnitt 6.3 erläutert die hierfür notwendigen Schritte.

6.2.2 Berührungslose Messung identischer Punkte an beweglichen Oberflächen

Die berührungslose Messung auf statischen Oberflächen erlaubt eine Reproduzierbarkeit der anzuzielenden Objektpunkte, sofern die Fernrohrausrichtung von einem Festpunkt zu den Objektpunkten eine identische Ausrichtung in Bezug zum Koordinatensystem aufweist. Bei der Deformationsmessung an Brücken kann nicht von einem solchen statischen Fall ausgegangen werden, da sich das Bauwerk aufgrund äußerer Einflüsse (natürliche und nutzungsbedingte Umgebungsbedingungen wie Wind, Temperatur und Verkehr) in den Folgeepochen unter Umständen an einer leicht veränderten Position befindet.

Windkräfte sind für die meisten Stahlbetonbrücken aufgrund der Bauart von untergeordneter Bedeutung und spielen nur bei hohen, schlanken Brücken mit freistehenden Pfeilern eine entscheidende Rolle bei den Verformungen des Bauwerks (Brühwiler u. Menn, 2003). Zum Einschätzen des Verkehrseinflusses an der Hochbrücke Freimann wurde eine rechnerische Simulation durchgeführt und dem tatsächlichen Verkehrsfluss gegenüber gestellt. Dabei konnten nach Penka u. a. (2005) keine bedeutenden Auswirkungen festgestellt werden, welche das Messvorhaben an der Brückenunterseite beeinträchtigen könnten. Aufgrund von Temperaturänderungen kommt es jedoch zu einer erheblichen Expansion (Ausdehnung) oder Kontraktion (Verkleinerung) des gesamten aus Stahlbeton gefertigten Brückenüberbaus. Global betrachtet entspricht dies einer Maßstabsänderung; lokal betrachtet, z. B. abschnittsweise in jedem Brückenfeld, gleicht die Auswirkung einer vorwiegend translativen Bewegungskomponente. Diese Lageänderung resp. Verschiebung Δl eines Punktes nimmt mit zunehmenden Abstand zur fixen Einspannung zu (vgl. Abbildung 6.7) und kann nach Zilch u. a. (2005) durch

$$\Delta l = \Delta T \cdot \alpha_T \cdot l \quad (6.1)$$

abgeschätzt werden. Zwischen der ersten und zweiten Epoche herrschte eine durchschnittliche Temperaturdifferenz von $\Delta T = 3,1^\circ\text{C}$. Mit einem angenommenen mittleren Wäremeausdehnungskoeffizient von Stahlbeton von $\alpha_T = 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. Geht man davon aus, dass sich die Brücke entlang ihrer eigenen Längsachse ausdehnt, ergibt sich für einen Punkt am südlichen Brückenlager mit einer Entfernung von ca. $l = 315 \text{ m}$ zur fixen Einspannung eine theoretische Verschiebung von $\Delta l = 9,8 \text{ mm}$. Die ermittelte Verschiebung aus den Mess-

werten beträgt in Längsrichtung $\Delta l = 8,6 \text{ mm}$ und deckt sich somit gut mit dem theoretischen Wert (Schäfer u. a., 2006).

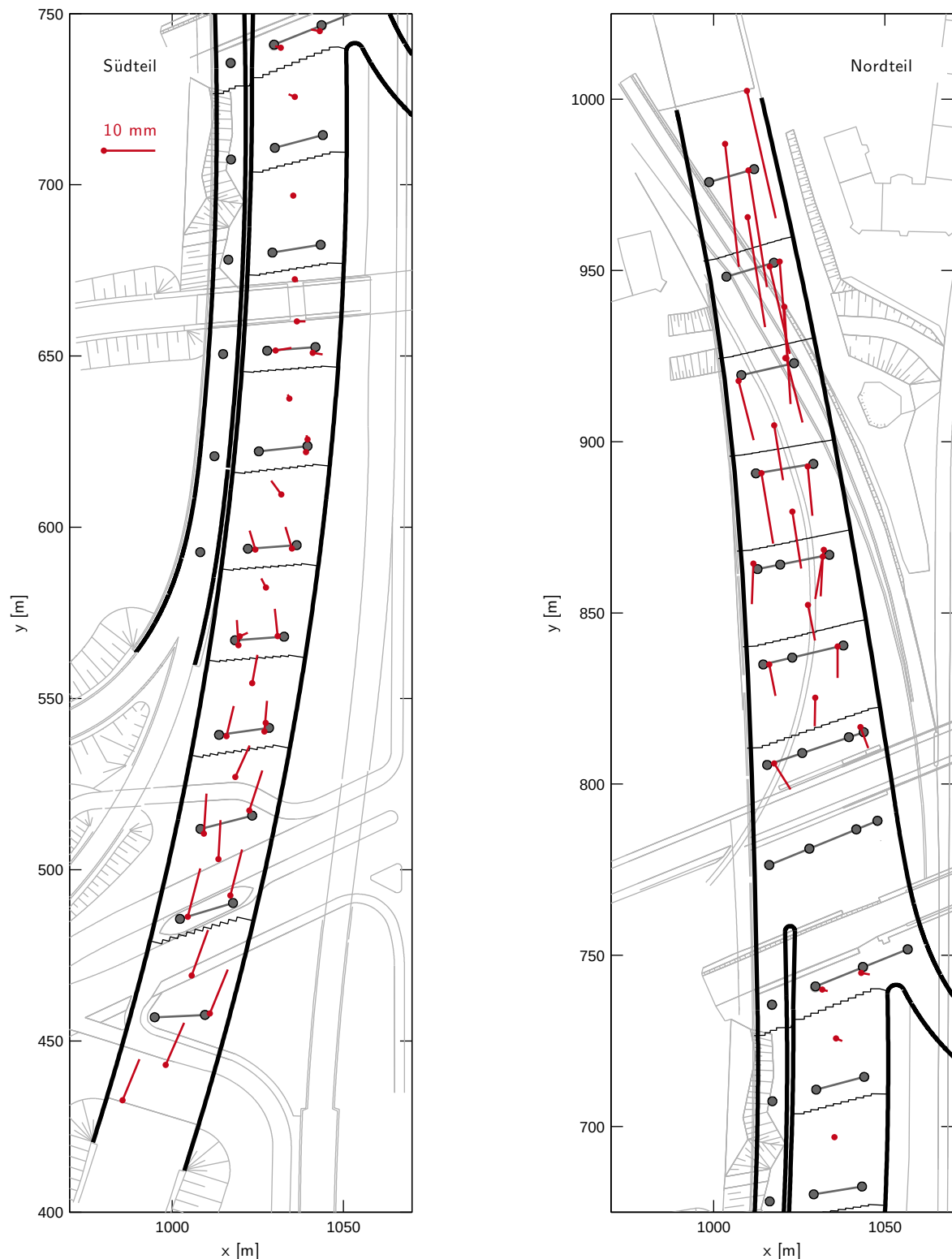


Abbildung 6.7: Die horizontalen Bewegungsanteile der Deckenprismen geben Aufschluss über die temperaturbedingte Expansion (Ausdehnung) oder Kontraktion (Verkleinerung) des gesamten aus Stahlbeton gefertigten Brückenüberbaus

Bei allen im Frühjahr und Herbst durchgeführten Messepochen wurde auf ähnliche Temperaturverhältnisse geachtet, weshalb die Temperaturdifferenz in dem gezeigten Beispiel klein ist und in Folge dessen die Ausdehnungen bzw. Verschiebungsbeträge gering gehalten werden können. Werden allerdings für die Überwachung

der Deformationen während der Rückbauphase auch Epochen außerhalb der geplanten Beobachtungszeiten erforderlich, so können durchaus Temperaturdifferenzen von 30°C auftreten. Wird nun für dasselbe Prisma am südlichen Brückende die Verschiebung berechnet, so erhält man bereits einen Wert von 94,5 mm. Damit soll gezeigt werden, dass Verschiebungen der Brückendecke in der Größenordnung von zehn Zentimetern durchaus möglich sind und aus diesem Grund eine Berücksichtigung dieses Einflusses vor Ort für die Erfassung physikalisch identischer Punkte unerlässlich ist.

Wie bereits aus Abbildung 6.3 und dessen Erläuterung hervorgeht, werden neben nicht-kooperativen Objektpunkten direkt auf der Betonoberfläche zusätzliche Retroreflektoren verwendet, um daraus die temperaturbedingten Bewegungsanteile der Brücke ableiten zu können. Diese horizontalen Bewegungsanteile stellen keine Verformung im betrachteten Sinne dar und sind von den tatsächlichen Deformationen zu unterscheiden.

6.2.3 Messablauf und Auswertung

Die epochenweise Erfassung der Netzpunkte, Deckenprismen und der über 3600 Objektpunkte erfolgt mit einem als GEOBASIC-Applikation entwickelten, vollautomatisierten Messprogramm. Der Vorteil einer GEOBASIC-Applikation liegt darin, dass diese direkt auf den Sensor aufgespielt werden kann. Eine Steuerung über einen mobilen PC entfällt daher; und somit wird die Anforderung an eine komfortable und mobile Hardware für den Außendienst erfüllt. Die nachfolgenden Ausführungen behandeln den grundsätzlichen Messablauf – weitere Einzelheiten zu GEOBASIC und der automatischen Tachymetersteuerung sind in (Köbler, 2007) zu finden.

Für die Messroutine sind pro Instrumentenstandpunkt lediglich eine Standpunktdatei und eine Objektpunktdatei mit den entsprechenden Punktnummern und Koordinaten erforderlich. Die insgesamt 22 Standpunkte, die für die vollständige Erfassung der zu überwachenden Oberfläche notwendig sind, sind aus einer Raumausgleichung bereits bekannt; die einzelnen Objektpunkte entstammen dem in einem CAD-Plan definierten Raster. Um ungünstige Objektpunkte (z. B. solche, die auf Betonierfugen, Einstiegsklappen von Kontrollgängen oder auf die an der Brückendecke installierte Straßenbeleuchtung fallen) auszuschließen, besteht bei erstmaliger Nutzung der Applikation die Möglichkeit die Sollposition der Bezugsepoche nochmals zu korrigieren. Nach der Kontrolle der einzelnen Objektpunkte werden diese gespeichert, und stehen der Applikation für alle weiteren Messepochen zur Verfügung.

Ein Messzyklus (s. a. Abb. 6.8) an einem Standpunkt beginnt mit der Eingabe der Standpunktnummer und mindestens einer Fernzielnummer. Der Anwender wird angehalten, das gewählte Fernziel grob anzuvisieren, wobei die anschließende Feinpositionierung des Fernrohrs über die automatische Zielerkennung (engl. *automatic target recognition*, ATR) erfolgt. Mit der Messung der Fernziele wird der Tachymeter im Bezugssystem orientiert und die horizontale Nullrichtung des Tachymeter so angepasst, dass der Richtungswinkel der Ablesung des Horizontalwinkels entspricht. Aus den Messwerten der Fernziele werden Abweichungen zu deren Sollkoordinaten berechnet, und geben Auskunft über die Güte der Einpassung in das Grundlagnetz. Liefert die Messung kein zufriedenstellendes Ergebnis, können bei Bedarf (und sofern vorhanden bzw. sichtbar) weitere Fernziele verwendet werden.

Nach Abschluss der Orientierungsphase wird das Fernrohr automatisch auf die vorgesehenen Deckenprismen ausgerichtet und erneut mit Hilfe der ATR feinpositioniert. Durch polares Anhängen werden die aktuellen Koordinaten der Deckenprismen bestimmt und mit den Koordinaten der Nullmessung verglichen. Die über eine 2D-Ähnlichkeitstransformation dieser beiden Datensätze ermittelten Transformationsparameter geben Auskunft über die temperaturbedingte Translation bzw. Maßstabsänderung des momentan unter Beobachtung stehenden Brückenfeldes. Diese Transformationsparameter werden vor Ort verwendet, um die nachfolgenden Objektpunktkoordinaten den aktuellen Bedingungen anzupassen – es erfolgt also eine Neuberechnung der homologen Objektpunkte, um die physikalische Identität in beiden Epochen sicherzustellen. Diese werden mit aktualisierten Horizontal- und Vertikalwinkelwerten durch das Fernrohr automatisch angefahren und berührungslos gemessen. Abschluss des Messzyklus bildet eine erneute Messung der Fernziele zur Überprüfung der Stabilität des Instrumentenstandpunktes.

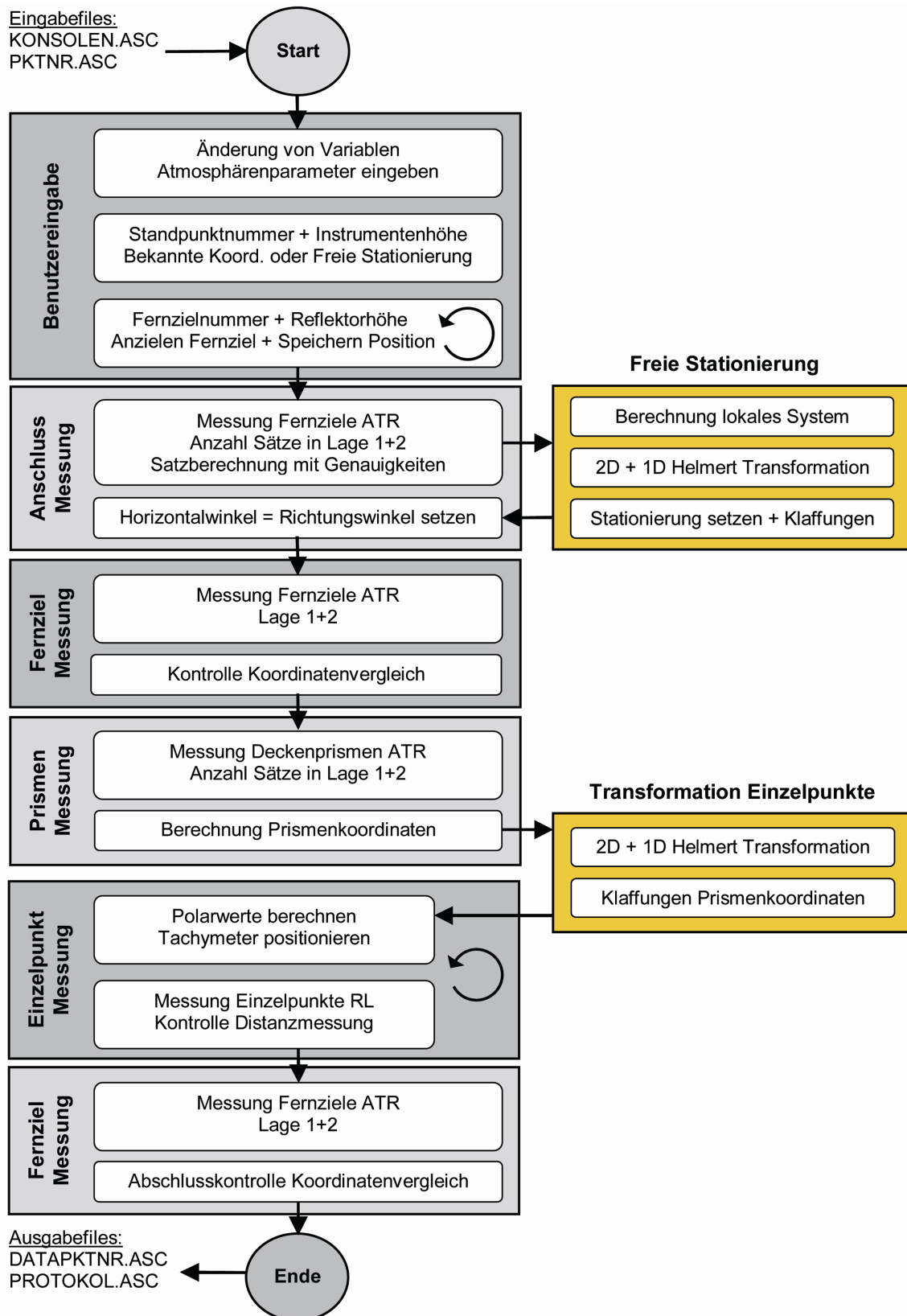


Abbildung 6.8: Ablaufschema der Mess- und Berechnungsprozesse der GEOBASIC-Applikation Freimann (Köbler, 2007)

Zur Erhöhung der inneren Genauigkeit (vgl. Abschnitt 4.3.4) und Minimierung verkehrslastbedingter Einflüsse wird jeder der ca. 3600 Objektpunkte insgesamt 15-fach (3 Messdurchläufe à 5 Einzelmessungen) gemessen. Um die durch die Divergenz des Laserstrahls hervorgerufenen Fehlereinflüsse (schleifende Schnitte führen zu einer stärkeren Verformung der Impulsantwort des Messsignals, vgl. hierzu insbesondere Abschnitt 5.1.5) zu minimieren, werden von einem Standpunkt aus vorwiegend Punkte gemessen, deren Einfallswinkel weniger als 70 gon beträgt.

Der Zeitaufwand für die Messung eines Standpunktes mit durchschnittlich 165 Messpunkten beträgt inklusive Konsolenmontage und Instrumentenaufbau etwa 90 Minuten. Für die Abwicklung der gesamten Messepoche mit 22 Standpunkten werden dabei 33 Arbeitsstunden benötigt. Beim simultanen Einsatz von zwei Tachymetern kann das Brückenbauwerk somit binnen zwei Arbeitstagen vollständig erfasst werden.

Aus der gemessenen Punktwolke einer Epoche wird ein Höhenmodell berechnet. Liegen Messungen aus zwei Epochen vor, so gibt die Differenz dieser zwei Höhenmodelle Aufschluss über vertikale Veränderungen der Brückendecke. Diese vertikalen Deformationen sind ausschlaggebend für das Auffinden der lokalen Schadensbilder. Diese Vorgehensweise entspricht daher im weitesten Sinne einem punktbasierten Ansatz (vgl. Kap. 3.1.1) zur Ableitung von Deformationen.

6.2.4 Brückengeometrie

Bereits nach der Nullmessung liegen zahlreiche Daten vor, die erste Erkenntnisse für das Bauwerk liefern. Abbildung 6.9 stellt beispielhaft die Oberflächengeometrie für Feld 11 zum Zeitpunkt der Nullmessung dar. Darin ist zu erkennen, dass sich aufgrund des abschnittsweisen Bauens an der Koppelfuge zwischen zwei Bauabschnitt eine deutliche Abweichung von bis zu 3 cm gegenüber der Referenzfläche (hier einer ausgleichenden Ebene) einstellt. Aus Sicht der Bauprüfung und -überwachung stellt sich die Frage, ob solche Bereiche potenzielle Schwachstellen verkörpern und mit besonderer Aufmerksamkeit zu überwachen sind.

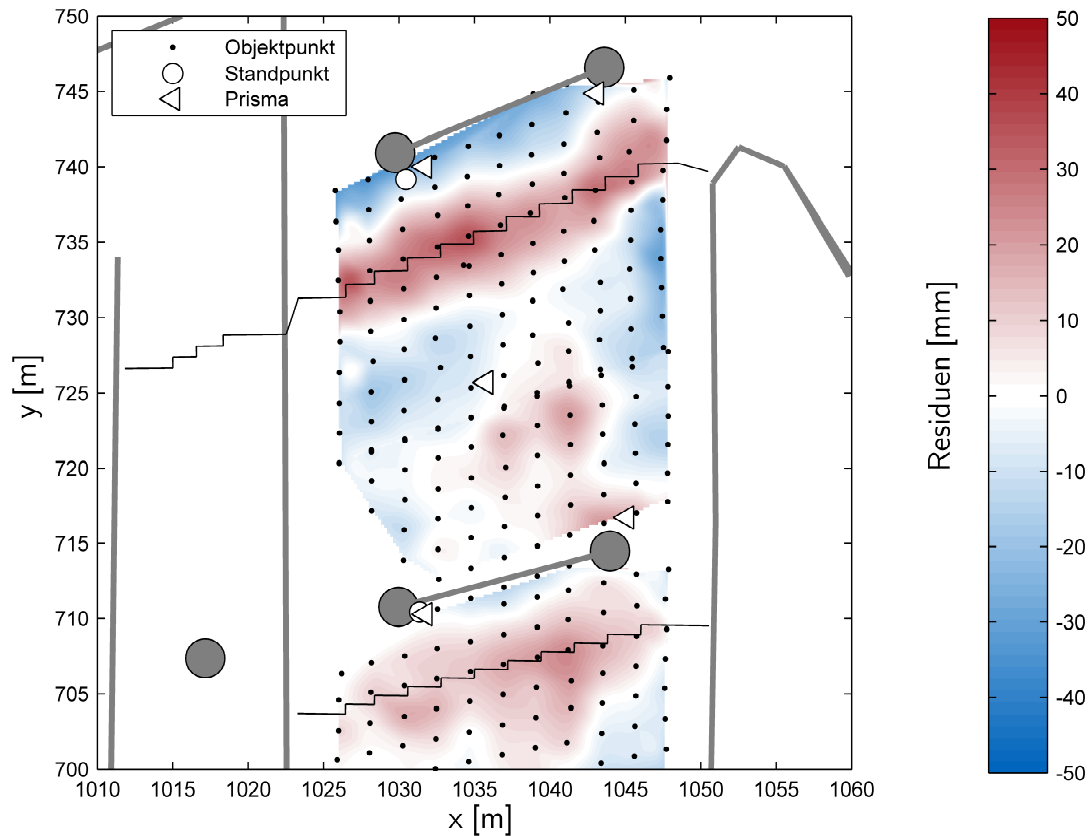


Abbildung 6.9: Lokale Betrachtung der Brückengeometrie und Identifikation möglicher Schwachstellen (Feld 11)

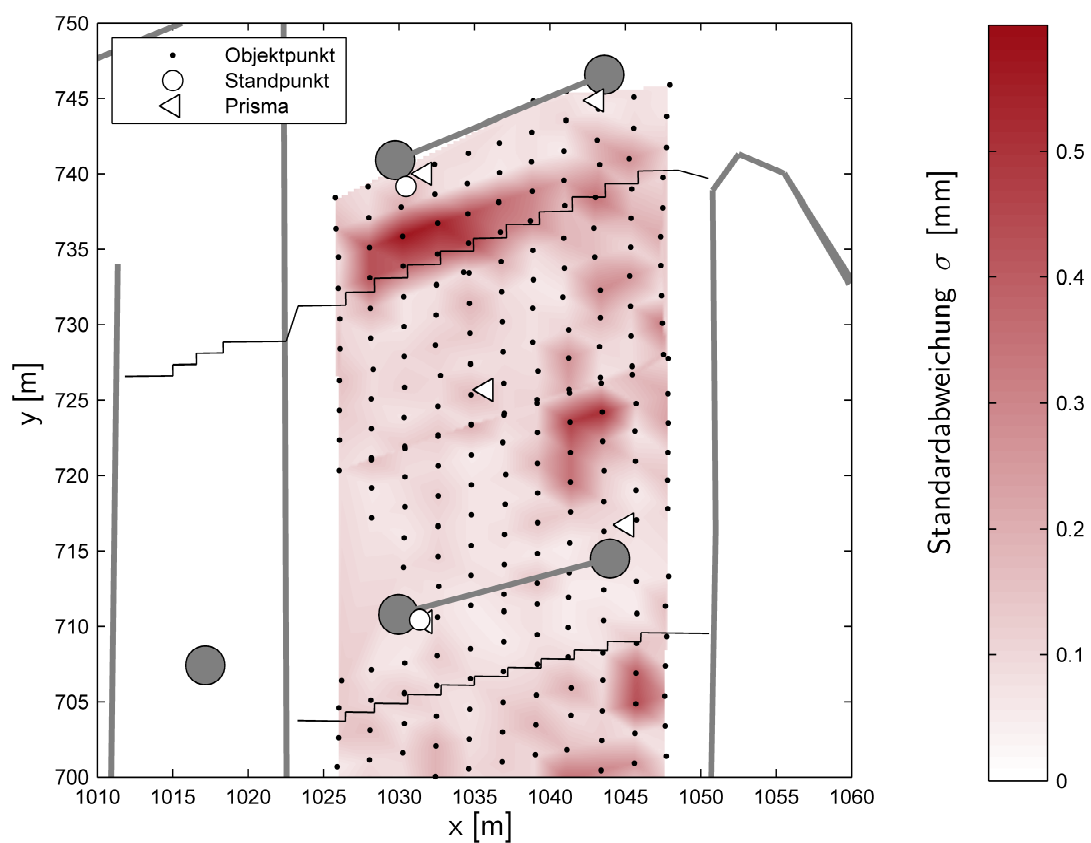


Abbildung 6.10: Messrauschen (Standardabweichung) aus 15 Einzelmessungen (Feld 11)

Ein Indiz hierfür ist zudem Abbildung 6.10 zu entnehmen. Hierin sind die zugehörigen Standardabweichungen (Präzision) der Höhenkomponente aus 15 Einzelmessungen dargestellt, die in weiten Bereichen einen Wert kleiner 0,2 mm erzielen. Die erhöhte Standardabweichung im linken Koppelfugenbereich deutet jedoch darauf hin, dass die links verlaufende Abfahrtsrampe, welche monolithisch mit dem Haupttragwerk verbunden ist, zu einem erhöhten Einfluss der Verkehrslast in Form von Schwingungen und folglich zu einem erhöhten Messrauschen führt. Zur Kontrolle dieser Beobachtung wurden an der Koppelfuge Glasmarken angebracht, die bei den Folgeepochen überprüft werden.

Neben solchen lokalen Betrachtungen ist auch eine Auswertung der gesamten Brückentopographie möglich. So lässt sich die Brückenunterseite beispielsweise als Polynomfläche n -ter Ordnung beschreiben, um aus der genäherten Topographie für beliebige Stand- und Objektpunkte jeweils die zu erwartenden Messentfernungen und vorherrschenden Einfallswinkel zu ermitteln. Diese Kenngrößen sind für eine Beurteilung der Ergebnisse bedeutsam und können zur Korrektur von Streckenabweichung aufgrund der Interaktion zwischen Laserstrahl und Betonoberfläche (vgl. 5.4.3) herangezogen werden.

Die Topographie der Brückenunterseite, bzw. die Höhenverteilung h an den Stellen x und y wird für eine ausreichende Näherung als Polynomfläche 3. Ordnung durch

$$\begin{aligned} h = f(x, y) &= p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 \\ &= [1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad xy \quad y^2 \quad x^3 \quad x^2y \quad xy^2 \quad y^3] \cdot p^T \end{aligned} \quad (6.2)$$

beschrieben. Die zehn Polynomkoeffizienten p_{00} bis p_{03} lassen sich aus der Gesamtheit der Objektpunkte im Zuge einer Ausgleichsrechnung schätzen.

Abbildung 6.11 zeigt diese Abweichungen zwischen dem durch die reflektorlose Messung entstandenen digitalen Oberflächenmodell und der Näherungsfläche. Diese liegen über das gesamte Bauwerk im Bereich von ± 30 mm mit deutlich erkennbaren Extrema, z. B. an Koppelfugen oder Reparaturstellen. Geringere Abweichungen wären nur mit Polynomen höherer Ordnung zu erzielen gewesen, welche jedoch nicht praktikabel gewesen wäre – zur Ermittlung der am Objektpunkt $\vec{x}_0$ auftretenden Einfallswinkel in Längs- und Querrichtung kann diese Approximation mit hinreichender Genauigkeit herangezogen werden. Hierzu sind die partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial f}{\partial x} = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 2x \quad y \quad 0 \quad 3x^2 \quad 2xy \quad y^2 \quad 0] \cdot p^T \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad x \quad 2y \quad 0 \quad x^2 \quad 2xy \quad 3y^2] \cdot p^T$$

zu bilden, die dabei die Komponenten für den Gradienten der Flächenfunktion darstellen:

$$\nabla f = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (6.4)$$

Ist f in $\vec{x}_0$ differenzierbar, erlaubt diese Gradientendarstellung eine Richtungsableitung von f an der Stelle $\vec{x}_0$ eines zu messenden Objektpunktes. Die Richtungsableitung in eine beliebige Richtung $\vec{a}$ ergibt sich aus dem Skalarprodukt des Gradienten von f mit dem Einheitsvektor der Richtung zu

$$\frac{\partial f}{\partial \vec{a}}(\vec{x}_0) = \nabla f(\vec{x}_0) \cdot \frac{\vec{a}}{|\vec{a}|}. \quad (6.5)$$

Daraus lässt sich ein Tangentenvektor an f bei $\vec{x}_0$ in Richtung $\vec{a}$ der Form

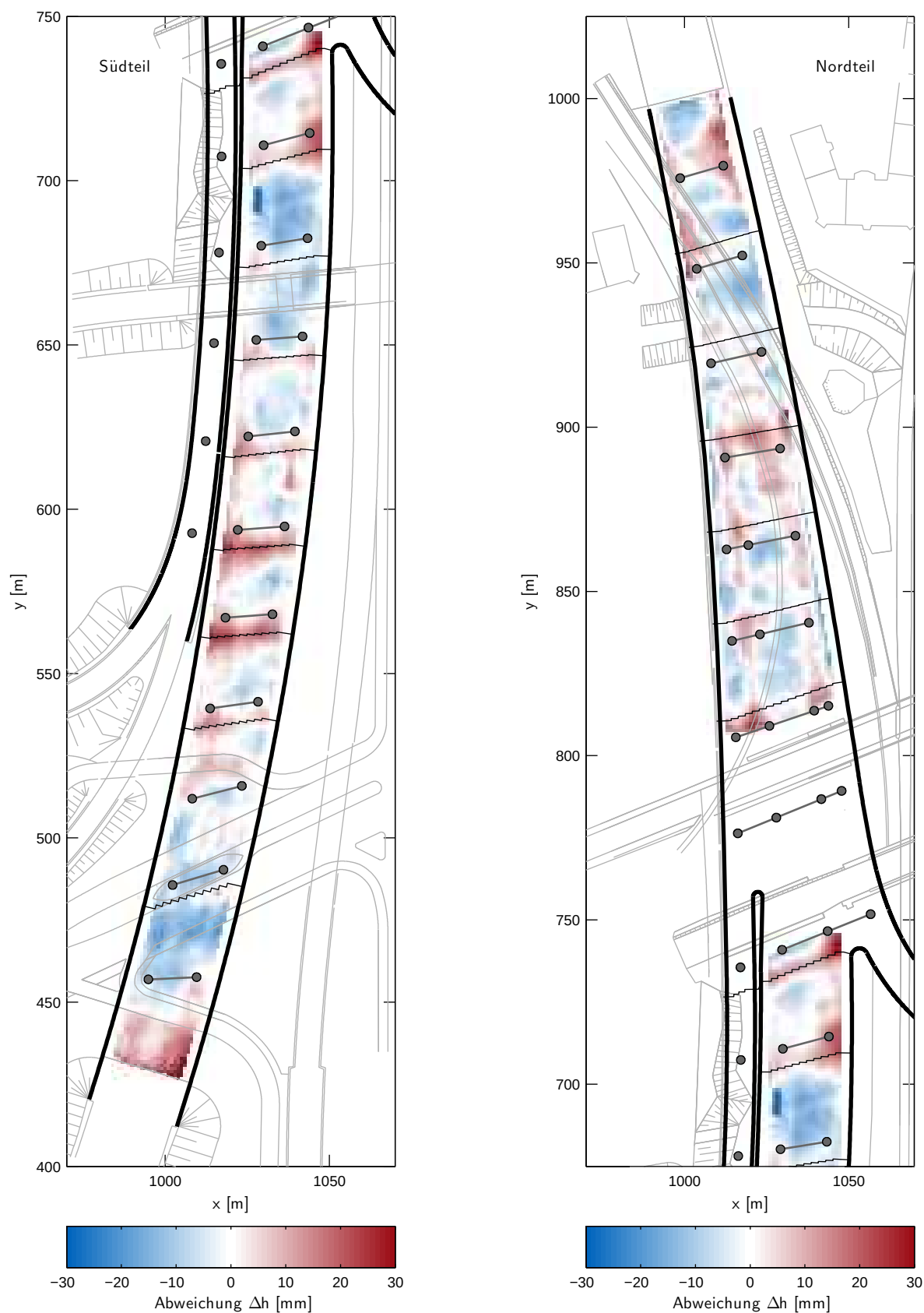


Abbildung 6.11: Darstellung der Topographie der Brückenunterseite als Abweichungen von einer Polynomfläche 3. Ordnung

$$\vec{t} = \frac{1}{|\vec{a}_0|} \begin{pmatrix} a_x & a_y & \nabla f(\vec{x}_0) \cdot \vec{a} \end{pmatrix}^T \quad (6.6)$$

erstellen. Für die Anwendung eines richtungsabhängigen Korrekturmodells sind speziell die Horizontalkomponenten der Längs- und Querrichtung bezüglich des vom Instrumentenstandpunkt $\vec{s}$ einfallenden Laserstrahls $\vec{r} = \vec{x}_0 - \vec{s}$ am Objektpunkt $\vec{x}_0$ von Interesse.

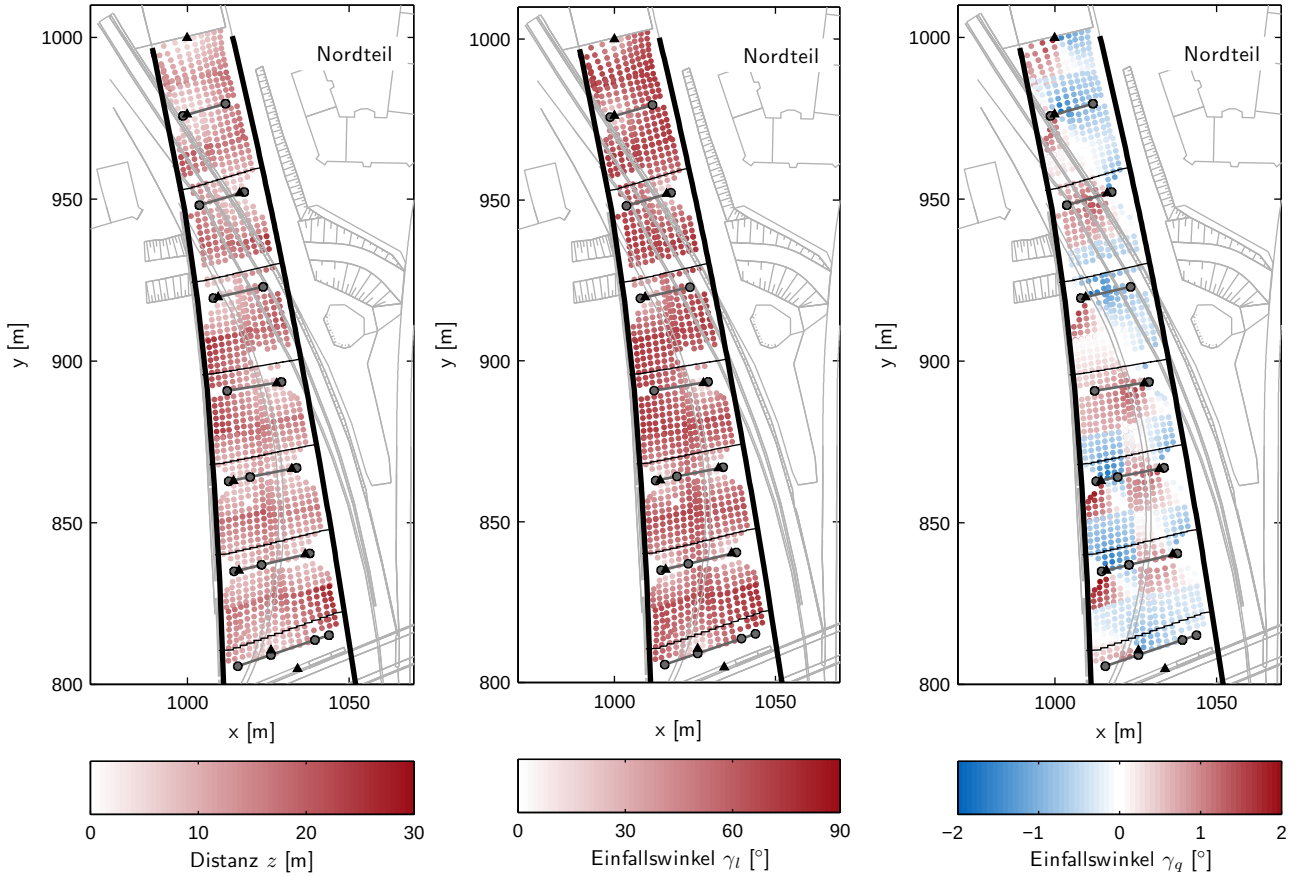


Abbildung 6.12: Aus der Brückengeometrie ermittelte Zielweiten und Einfallswinkel des Messstrahls auf der Betonoberfläche in Blickrichtung sowie quer hierzu (nördlicher Brückenteil)

Für diese Richtungen gilt

$$\vec{a}_l = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{a}_q = \begin{pmatrix} -r_y \\ r_x \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

mit den zugehörigen Tangentenvektoren entlang der Näherungsfläche

$$\vec{t}_l = \frac{1}{|\vec{r}|} \begin{pmatrix} r_x & r_y & \nabla f(\vec{x}_0) \cdot \vec{a}_l \end{pmatrix}^T$$

$$\vec{t}_q = \frac{1}{|\vec{r}|} \begin{pmatrix} -r_y & r_x & \nabla f(\vec{x}_0) \cdot \vec{a}_q \end{pmatrix}^T \quad (6.8)$$

Schließlich lassen sich die benötigten Einfallswinkel als Schnittwinkel zwischen einfallendem Laserstrahl $\vec{r}$ und den beiden Tangentenvektoren durch

$$\cos \gamma_l = \frac{\vec{t}_l \cdot \vec{r}}{|\vec{t}_l| \cdot |\vec{r}|} \quad \text{und} \quad \cos \gamma_q = \frac{\vec{t}_q \cdot \vec{r}}{|\vec{t}_q| \cdot |\vec{r}|} \quad (6.9)$$

bestimmen. Abbildungen 6.12 und 6.13 stellen neben den Messdistanzen auch die aus 6.9 ermittelten Einfallswinkel dar.

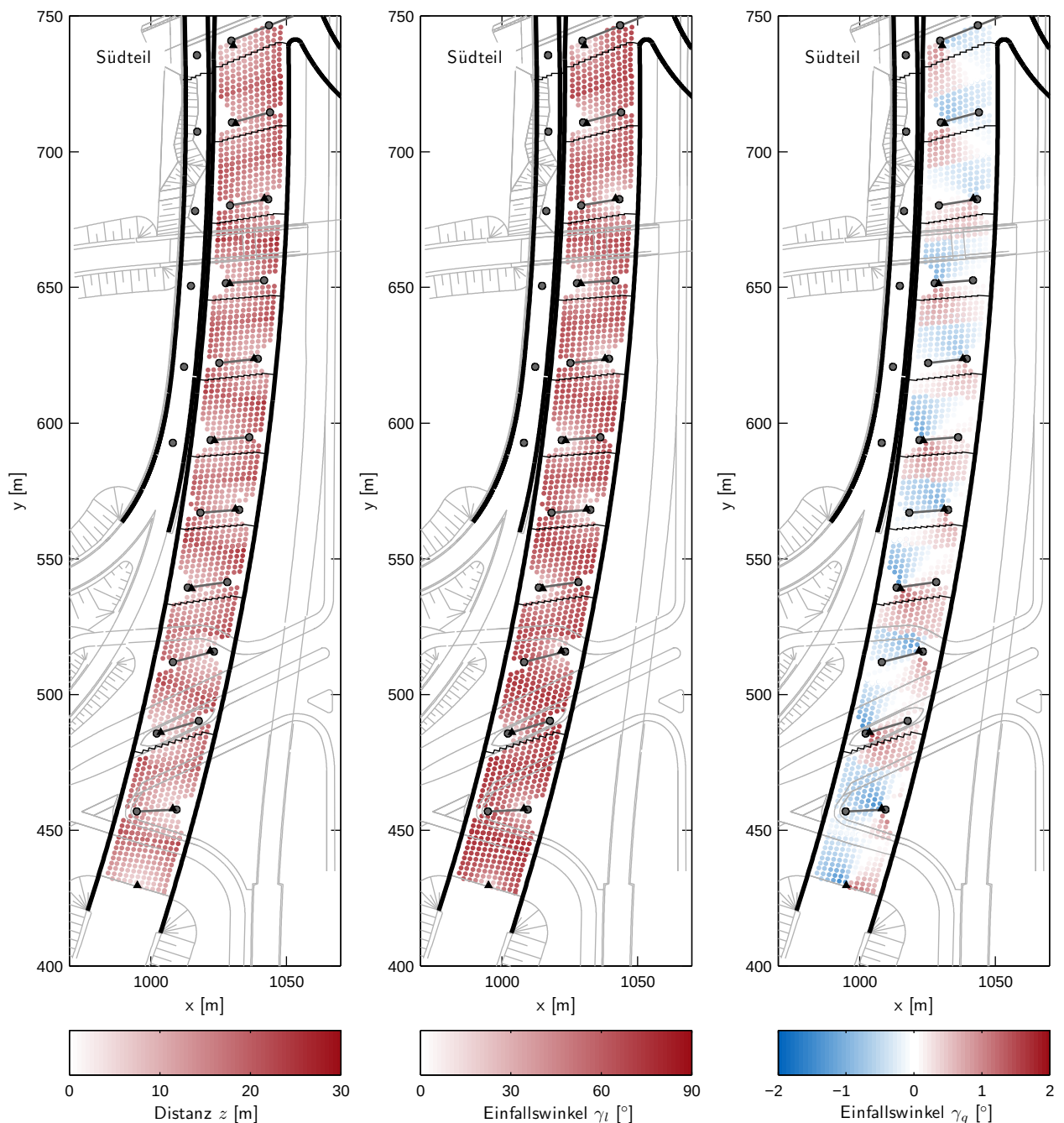


Abbildung 6.13: Aus der Brückengeometrie ermittelte Zielweiten und Einfallswinkel des Messstrahls auf der Betonoberfläche in Blickrichtung sowie quer hierzu (südlicher Brückenteil)

6.2.5 Resultate und Fazit

Die Resultate der Höhenänderung der reflektorlos gemessenen Objektpunkte zwischen Epoche 5 und der Nullmessung sind in Abbildung 6.14 und detailliert für die Brückenfelder 5 bis 7 in Abbildung 6.15 dargestellt. Diese Darstellungen dienen einer einfachen visuellen Beurteilung im Hinblick auf eine mögliche Schädigung des Brückenbauwerks.

In gesamten Beobachtungsareal liegen die ermittelten Höhenänderungen im Bereich von $\pm 2,5$ mm und damit durchaus stellenweise über den zu erwartenden Schädigungsszenarien. An den Übergängen von zwei Standpunkten sind verbleibende Sprünge des Höhenniveaus in einer Größenordnung von max. 0,5 mm zu erkennen, die jedoch auf eine verbleibende Unzulänglichkeit der Höhenbestimmung des Instrumentenhorizonts zurückzuführen sind – ein Abgleich benachbarter Felder erfolgte aufgrund eines zu geringen Überlappungsbereiches nicht. Dennoch sind keine für das Versagen der Schubdügel und einer damit einhergehenden Ablösung der Bodenplatte charakteristischen Beulenstrukturen in den Feldmitten zu erkennen.

Natürlich gehen alle Betrachtungen von korrekt kalibrierten Instrumenten aus. Schon kleine Abweichungen, z. B. durch eine Änderung der Additionskonstante nach einem Instrumentenservice oder gar -wechsel, würden das Deformationsbild verfälschen. Ein Anzeichen für das Vorhandensein eines solchen Kalibrierungsmangels sind dann Scheindeformationen in der Betonoberfläche, welche sich in Wahrheit nicht bilden können. Zum Erkennen dieser Artefakte können die Erkenntnisse aus 4.4 herangezogen werden, die die charakteristischen Erscheinungsbilder zahlreicher Instrumentenfehler vorab simulieren.

Die ersten fünf Epochen über einen Zeitraum von 2,5 Jahren haben gezeigt, dass das vorgestellte Monitoringkonzept für die rechtzeitige Erkennung des möglichen Schadens an der Hochbrücke Freimann geeignet ist. Mit der regelmäßigen Überwachung des Brückenbauwerks, einhergehend mit Inspektionen, wurde sichergestellt, dass die Tragfähigkeit bis zum Rückbau gewährleistet werden konnte. Die Möglichkeit der reflektorlosen Messung mit programmierbaren Servotachymetern erlaubt es, die gesamte Brücke möglichst wirtschaftlich und mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen.

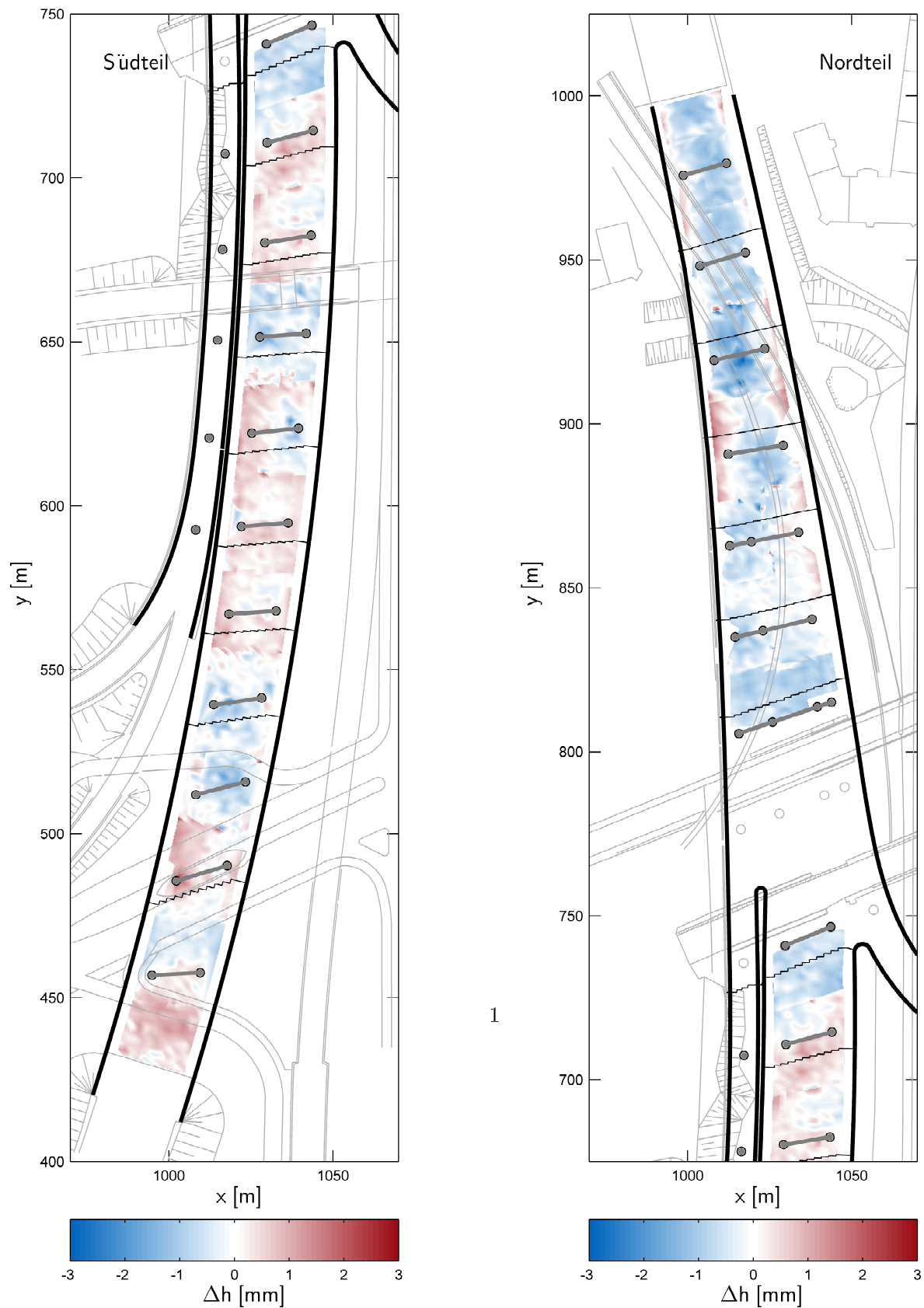


Abbildung 6.14: Höhendifferenzen der Epochen 5-1 im gesamten Beobachtungsbereich

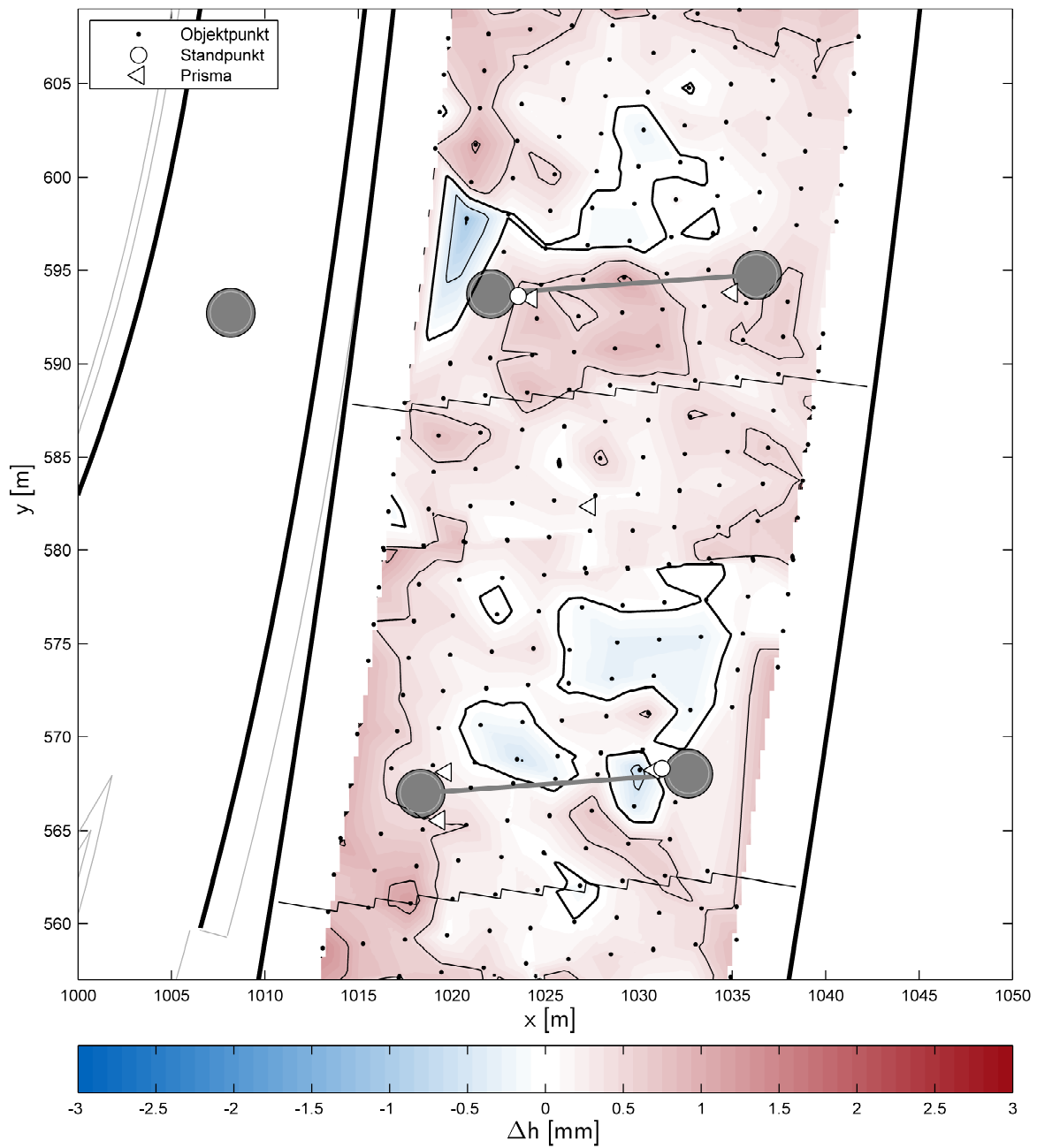


Abbildung 6.15: Detaildarstellung der Höhendifferenzen der Epochen 5-1 in den Feldern 5 bis 7 (Isolinienabstand 0,5 mm)

6.3 Weiterentwicklung des Konzeptes im Zuge der Rückbauphase

Neben der bestehenden Überwachungsaufgabe der Hochbrücke Freimann wurde das Verfahren auch zur Überwachung von Deformationen während des schrittweisen Rück- und Neubaus der Brücke eingesetzt. Eine nähere Erläuterung der Bauweise sind (ABD, 2010) und (Zilch u. a., 2009) zu entnehmen. Dabei waren Modifizierungen des bisherigen Monitoringkonzeptes erforderlich, welche nachfolgend erläutert werden:

Bei einem möglichen Verlust der bisher verwendeten Standpunktkonsolen mit bekannten Koordinaten sowie Einschränkungen der Sichtverhältnisse durch den Einbau von unterstützenden Jochen wurde die Software des entwickelten Messsystems auf die Möglichkeit der freien Standpunktwahl adaptiert (Kößler, 2007). Somit kann das Messinstrumentarium gegebenenfalls auch unabhängig von den bisherigen Standpunkten von beliebigen Stativaufstellungen aus agieren. Dabei werden die Standpunktkoordinaten in einer Freien Stationierung mit Hilfe eines erweiterten Grundlagenternetzes ermittelt.



Abbildung 6.16: Provisorische Abstützung des Überbaus für die Trennung des Überbaus in zwei Hälften und den Rückbau

Für die Genauigkeitserwartung der Deformationsmessung im regulären Betrieb gelten weiterhin die Messunsicherheiten von 2 mm resultierend aus der berührungslosen Distanzmessung. Im Falle der Deformationsmessung von frei gewählten Standpunkten ist jedoch aufgrund der als geringer einzuschätzenden Stabilität von Stativen im Vergleich zu den Aluminiumkonsolen sowie einer gewissen Messunsicherheit der Tafelhöhe (Stativaufbau über Anschlusspunkte) mit weiteren Messunsicherheiten zu rechnen. Demzufolge werden die Messunsicherheiten für die Lage aus der freien Stationierung und Orientierung mit $\leq \pm 1,5$ mm und für die Höhe aus der freien Stationierung und Tafelhöhe mit $\leq \pm 1,5$ mm spezifiziert.

Um auch für diese geänderten Verhältnisse den Einfluss des Einfallswinkels auf die Streckenmessung an einer Betonoberfläche korrekt berücksichtigen zu können, wurden im Vorfeld eine vollständige Messepoche

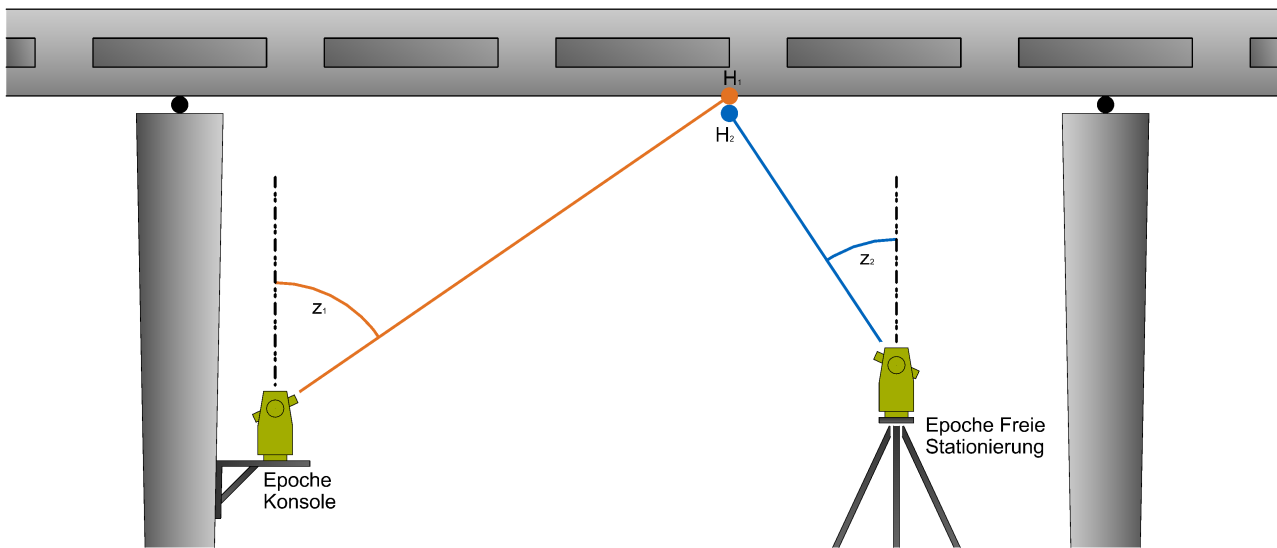


Abbildung 6.17: Messanordnung bei der redundanten Aufnahme der Oberflächengeometrie durch eine Epoche mit bisheriger Aufnahme von Konsolenstandpunkten aus und einer zweiten Epoche, aufgenommen von frei wählbaren Standpunkten

sowohl planmäßig und in gewohnter Art und Weise als auch zeitnah ($\Delta t = 30 \text{ min}$) eine weitere Epoche von frei gewählten Standpunkten mit der erweiterten Software durchgeführt. Eine entsprechende Messanordnung ist Abbildung 6.17 zu entnehmen. Die redundante Messepoche der in diesem Zeitraum als unverändert anzunehmenden Oberflächengeometrie der Bodenplatte dient somit der Verifikation des weiterentwickelten Messsystems, liefert darüber hinaus aber auch weitere Erkenntnisse in Hinblick auf die geometrische Messkonfiguration.

Abbildung 6.18 zeigt für ein Standpunktpaar (Konsolenstandpunkt an Brückenpfeiler und Freie Stationierung in Brückenfeldmitte) die scheinbare Höhendeformation, die sich aus der redundanten Aufnahme der Oberflächengeometrie ergibt. Die gewonnenen Erkenntnisse bei dieser Vergleichsmessung ohne vorherige Korrekturen bezüglich des Auftreffwinkels legen nochmals die Vermutung nahe, dass dieser Einfluss eine signifikante Auswirkung auf die Resultate hat.

Um den Einfluss näher spezifizieren zu können, werden hierzu für alle Einzelpunkte eines Feldes die Differenzen der Zenitwinkel ($Z_2 - Z_1$) der zwei Epochen gegenüber den entsprechenden Höhendifferenzen ($H_2 - H_1$) aufgetragen. Die Verteilung der Werte für die Einzelpunkte spiegelt eine in Abbildung 6.19 dargestellten Systematik wider, welche durch die Berechnung einer ausgleichenden Gerade

$$\Delta h = 0.0482 \cdot \Delta z - 0.0093. \quad (6.10)$$

weiter verdeutlicht wird. Diese Gleichung lässt sich auch in anderen Brückenfeldern aufstellen und führt zu nahezu identischen Resultaten. Die Gleichung führt zu einer Höhenabweichung von knapp 1 mm bei einem Zenitwinkelunterschied von 20 gon und zeigt, dass die scheinbaren Höhendifferenzen zwischen zwei Epochen gemessen von zwei unterschiedlichen Standpunkten vereinfacht durch einen Zusammenhang von unterschiedlichen Zenitwinkel zu beschreiben sind. Die Geradengleichung bietet dabei insbesondere bei Unkenntnis der Oberflächengeometrie oder der Intensitätsverteilung innerhalb des Laserstrahlquerschnitts eine vereinfachte Möglichkeit, eine nachgewiesene Abhängigkeit von Streckenmessabweichung und Auftreffwinkel zu berücksichtigen.

Der Vorteil für Praxisanwendungen liegt darin, diese Abhängigkeit ohne vorherige Bestimmung im Feld und somit am realen Objekt zu ermitteln. Nichtsdestotrotz kann bei dieser Herangehensweise nicht von einem korrekt kalibrierten Instrumentenpark abgesehen werden. Die Anwendung der mit Gleichung (6.10) beschriebenen Korrektur führt schließlich zu einem Resultat, das frei vom Einfluss der Zielgeometrie und Einfallswinkel ist. Ein

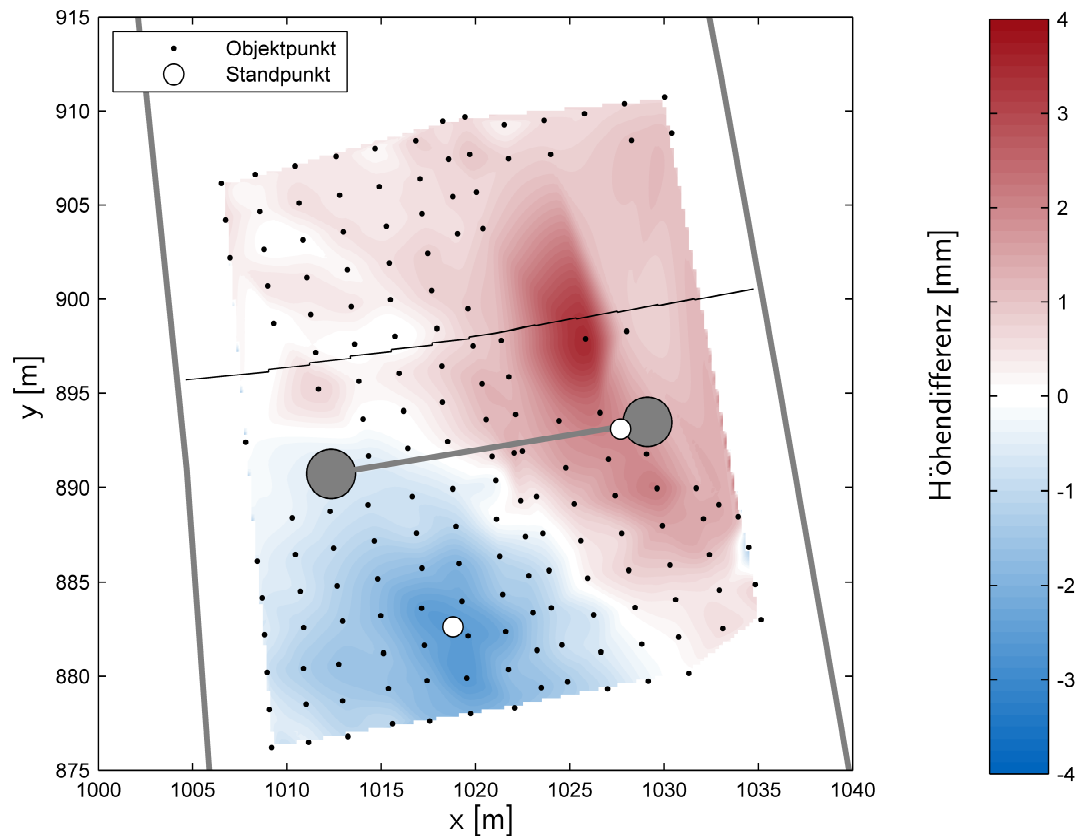


Abbildung 6.18: Darstellung der unkorrigierten Höhendifferenzen der redundanten Aufnahme eines Brückenfeldes

solch bereinigtes Deformationsbild ist Abbildung 6.20 zu entnehmen. Die verbliebenen Abweichungen liegen in diesem Brückenfeld bis auf zwei Messpunkte unterhalb eines Millimeters und spiegeln somit die tatsächlich erzielbare Genauigkeit des Messverfahren wider. Insgesamt konnten so auch für das weiterentwickelte Messkonzept im Zuge der Rückbauphase die geforderten Messgenauigkeiten eingehalten werden und das Überwachungskonzept bis zum vollständigen Rückbau erfolgreich fortgesetzt werden.

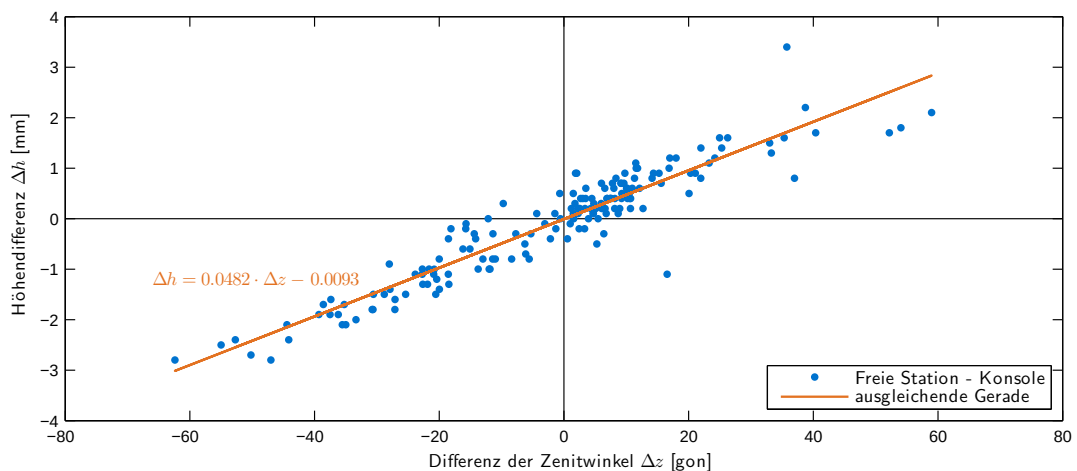


Abbildung 6.19: Der Vergleich zwischen zwei zeitgleich aufgenommenen Epochen von unterschiedlichen Standpunkten (Freie Stationierung und Konsolenstandpunkte) zeigt eine lineare Abhängigkeit der Höhendifferenzen von der Differenz der Zenitwinkel

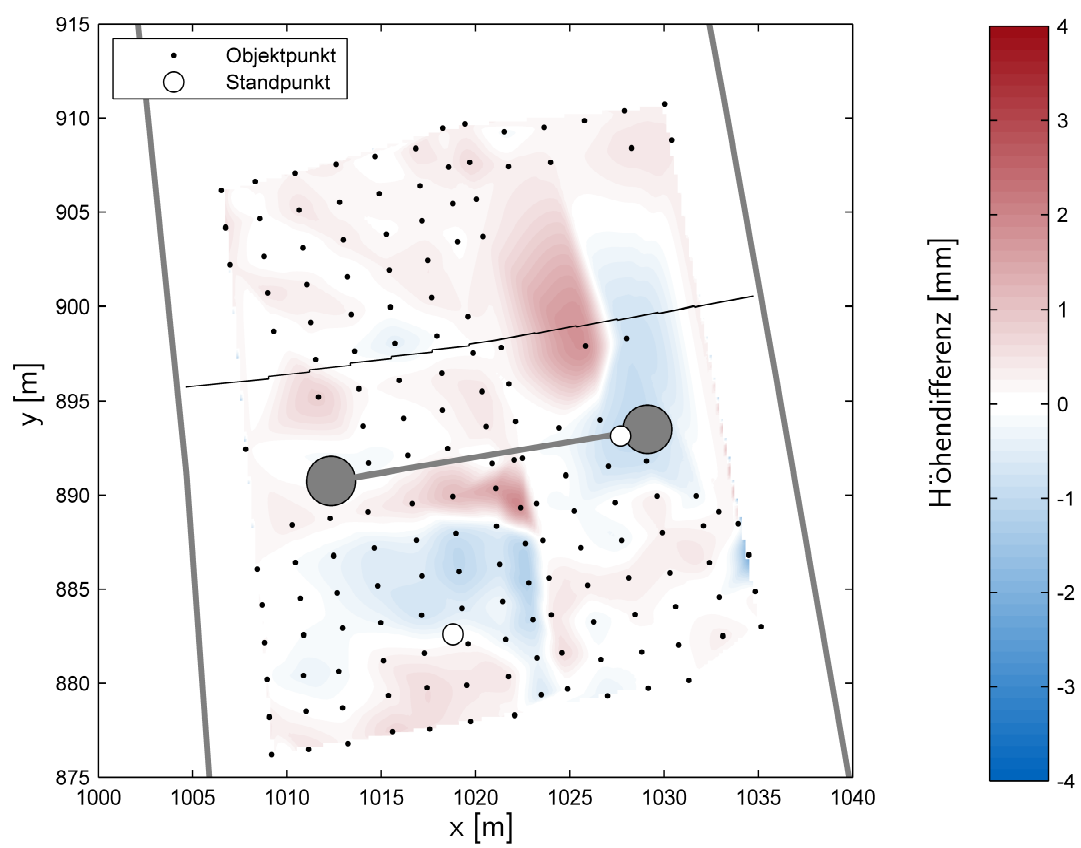


Abbildung 6.20: Darstellung der korrigierten Höhendifferenzen der redundanten Aufnahme eines Brückenfeldes

Kapitel 7

Ausblick

Die vorliegende Arbeit widmete sich in ihrem Schwerpunkt dem vielseitig beobachteten Einfluss der Einfallsgeometrie zwischen Laserstrahl und Oberfläche bei der berührungslosen Distanzmessung. Dabei wurden zwei Methoden entwickelt, auf deren Basis eine Korrektur der Distanzen möglich ist: Zum einen erfolgte dies über eine bildbasierte Bestimmung von Intensitätsverteilungen innerhalb eines Laserstrahlquerschnittes in Kombination mit Simulationen der Interaktion des Laserstrahls mit naturnahen Oberflächen. Zum anderen wurde ein Korrekturmodell aus redundanten Messungen einer Brückenüberwachung unter realen Bedingungen abgeleitet – hierbei werden insbesondere die Konstellationsunterschiede der Messkonfiguration herangezogen, was zu einer weniger aufwändigeren und somit deutlich pragmatischeren Lösung führt. Die vorgestellten Resultate führten zu einem erfolgreichen Projektabschluss einer geodätischen Überwachung einer Autobahnhochbrücke während der Restnutzungs- und Rückbauphase.

Aus wissenschaftlicher Sicht wurde mit dem ersten Ansatz in Kapitel 5 eine Simulationsumgebung geschaffen, welche grundsätzlich die Analyse von reflektierten Messsignalen ermöglicht. Dies erfolgte hier insbesondere für das Messprinzip des Phasenvergleichsverfahrens eines Tachymeters – als künftige Forschungsschwerpunkte kommen hier nach Einbindung weiterer Messprinzipien und Gerätetypen die Berücksichtigung der zeitlichen Signalstruktur hinsichtlich Frequenz- und Intensitätsstabilität sowie die Berücksichtigung der Reflektanz der Oberfläche, welche bis dato nur in einer einheitlichen Farbgebung simuliert wurde, und die Abhängigkeit der Distanzkorrektur weiterer Rauheitsstufen in Frage.

Wie auch von Holst u. Kuhlmann (2016) festgestellt, unterliegt die Ingenieurgeodäsie im Bereich der Mess- und Auswertetechnik einem steten Wandel, der die Deformationsmessung in den letzten Jahren von der Beobachtung einiger repräsentativer Objektpunkte hin zur flächenhaften Abtastung von Oberflächen führte. Neben den Herausforderungen der Messtechnik und der damit erforderlichen Abspaltung von möglichen systematischen Messabweichungen von tatsächlichen Objektdeformationen spielen künftig weitere Modellierungsaspekte eine besondere Rolle: Unabhängig von der Auswertestrategie zählen hierzu die Schätzung und Quantifizierung von räumlichen Korrelationen zwischen Aufnahmepunkten und Objekt. Die Verknüpfung von Messkonfiguration und Abschätzung der tatsächlich erreichten Objektpunktgenauigkeit sind hierbei als Baustein zu verstehen, welche künftig – analog zur strengen Deformationsanalyse – eine belastbare Aussage über signifikante oder nicht signifikante Punktbewegungen ermöglichen soll.

Darüber hinaus ist auch weiterhin mit einem technologischen Fortschritt der Messtechnologien zu rechnen. Als aktuelle und zukunftsweisende Messverfahren seien hier die Sensorfusion von schnell scannenden mit bildgebenden Tachymetern sowie der Einsatz von klassisch-terrestrischen oder gar kinematisch-terrestrischen Laserscannern, aber auch die bodengestützte Radarinterferometrie genannt.

Aktuelle Entwicklungen auf dem Markt der klassischen Tachymetrie lassen erkennen, dass die Hersteller auf die zusätzliche und simultane Erfassung und Nutzung von Bildinformationen während der Richtungs- und Streckenmessung setzen. Als bildgebende Tachymetern können inzwischen zahlreiche Instrumente, wie Leica TS15, Trimble VX (Spatial Station) und Topcon Imaging Station, genannt werden. Je nach Modell und Bildqualität wird das Messbild einerseits für Dokumentationszwecke – z. B. zur Dokumentation, welcher Objektpunkt sich beim Auslösen der Messung im Fadenkreuz befand oder zur graphischen Überlagerung mit CAD-Elementen – verwendet, andererseits kann das Bild aber auch aktiv in den Messprozess integriert und für die Auswertung auf Basis der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt werden. Dazu zählen Anwendungen wie die nahtlose Aneinanderreihung georeferenzierter Bilder, die damit verbundene Möglichkeit der Rissdokumentation, die automatische Erkennung und das Wiederauffinden definierter oder nicht signalisierter Punkte,

Formen oder Texturen sowie die simultane Beobachtung zahlloser Objektpunkte. Voraussetzung für hochpräzise Anwendungen ist sicherlich eine koaxiale Anordnung der Kamera im optischen Strahlengang, um auch kleine Parallaxenfehler zu vermeiden und die optischen Vergrößerungsmöglichkeiten des Tachymeterfernrohrs anstelle der digitalen Zoomfunktionen zu nutzen.

Mit der Leica MultiStation MS50 und MS60 sind nun auch erste Instrumente erhältlich, die neben der hochauflösenden koaxialen Okularkamera zusätzlich über ein leistungsfähiges Scanmodul mit Messraten von bis zu 1000 Punkte pro Sekunde verfügen. Die Kombination eines georeferenzierten bildgebenden Verfahrens und eines polaren Messsystems für Massenpunkte ermöglicht damit weitere Einsatzmöglichkeiten (Wasmeier u. Wagner, 2016) – beispielsweise eine Effizienzsteigerung der in Kapitel 6 beschriebene Überwachungsaufgabe. So könnten in diesem Fall die temperaturbedingten Bewegungsanteile des Brückenüberbaus auch ohne Deckenprismen bestimmt werden und die Messung der reflektorlos bestimmten Objektpunkte schneller und mit verringertem Messpunktabstand erfolgen.

In Hinblick auf den Einsatz terrestrischer Laserscannersysteme sind insbesondere die hohen Erfassungsraten und die damit einhergehende Steigerung der Punktdichte von Interesse. Zur Umsetzung der in dieser Arbeit beschriebenen Überwachungsaufgabe entfiel die Entscheidung jedoch zugunsten eines tachymeterbasierenden Scannens, da mit dieser Technologie nach wie vor ein geringeres Messrauschen zu erwarten ist, das sich durch Mehrfachmessungen gar reduzieren bzw. kontrollieren lässt. Zwar führte seither die Weiterentwicklung terrestrischer Laserscanner zu einer deutlichen Reduzierung des Messrauschens von ca. 6 mm auf 3 mm und etablierte Filteralgorithmen tragen auch hier zu einer Rauschreduzierung bei – dennoch verbleiben insbesondere bei der Georeferenzierung zu Messkugeln oder anderweitige Zielmarkierungen gewisse Messunsicherheiten. Die für Überwachungsaufgaben erforderliche Präzision einer Standpunktbestimmung innerhalb eines spannungsfreien Festpunktfeldes ist auch beim Einsatz leistungsfähiger Laserscanner nicht zu vergleichen mit einer tachymetrischen Satzmessung auf Prismen – auch in Hinblick auf Reichweite und der damit beschränkten Anzahl der zur Verfügung stehenden Fernziele.

Nichtsdestotrotz, weist das terrestrische Laserscanning besonderes Potenzial auf: Für eine vollständige Bestandserfassung mit terrestrischen Laserscannern ist es erforderlich, jeden Objektpunkt einmalig anzusteuern und zu erfassen. Diese Anforderung wird durch die gängige Strahlablenkung (vgl. Kap. 2.4) der Laserscanner berücksichtigt. Dabei können bei zahlreichen Systemen eine oder gar beide Rotationen um die Steh- oder Kippachse unterdrückt werden. Somit lässt sich der Messstrahl auf reine Profilmessungen oder gar kontinuierliche Beobachtung eines Einzelpunktes begrenzen. Die hohen Messraten des TLS werden in diesem Fall in hohe Wiederholungsraten umgewandelt – es findet demnach eine Herabsetzung der räumlichen Auflösung zugunsten der zeitlichen Auflösung statt (Kutterer u. a., 2009). Aus aufeinanderfolgenden Profilen werden dabei Zeitreihen generiert, auf deren Grundlage sich Deformationsbeträge ableiten oder wesentliche Kenngrößen, wie z. B. Eigenfrequenzen, herleiten lassen. In einer solchen Messkonfiguration lassen sich demnach bereits heute dynamische Verformungen von Bauwerken erfassen, wobei die aus der Objektbewegung resultierende Kinematik eine weitere Facette des kinematischen TLS (k-TLS) darstellt.

Das eigentliche k-TLS hat jedoch seine Wurzeln in der Nutzung (inzwischen unterschiedlichster) mobiler Trägerplattformen – sog. *Mobile-Mapping*-Systemen. Als Beispiel seien hierfür die Erfassung des Straßen- oder Schienenraumes mit Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h genannt. Die aus der Bewegung der Plattform resultierende Kinematik erfordert dabei sehr hohe Erfassungsraten sowie die Stützung der Georeferenzierung durch weitere Sensoren wie z. B. GNSS- und INS-Systeme. Für örtlich begrenzte und nicht mit Kraftfahrzeugen oder Zügen befahrbare Regionen existieren bereits Produkte, die auf schiebbaren Mobilen oder Rucksacklösungen basieren. Zur Erfassung der Trajektorie können hier auch Tachymeter eingebunden werden, die eine gesteigerte Präzision der Georeferenzierung – auch in Innenräumen, ermöglichen. Auch wenn sich die Anwendung in diesen Fällen bisher auf der Kartierung im Genauigkeitsbereich von wenigen Zentimetern beschränken, besteht zumindest eine denkbare Vision in Hinblick auf Überwachungsaufgaben in Anlehnung an die in Kapitel 6 dargestellte Aufgabenstellung.

Auch die Radartechnologie, welche in der Navigation zur Detektion und Ortung von Schiffen und Flugobjekten dient und als bildgebendes Messverfahren traditionell der Fernerkundung zuzuordnen ist und hier seit langem sowohl flugzeug- also auch satellitengetragen zur Erdbeobachtung eingesetzt wird, ist inzwischen auch als bodengebundene Ausführung erhältlich. Analog zu allen bisher erwähnten Verfahren ermöglicht auch ein bodengebundenes interferometrisches Radar die berührungslose und flächenhafte Erfassung von Überwa-

chungsobjekten bzw. deren Veränderungen. Als wesentlicher Unterschied ist jedoch zu nennen, dass Radarsysteme grundsätzlich nur Änderungen in Blickrichtung des Sensors detektieren können – in Bezug auf polare Messsysteme entspricht dies zunächst dem Verzicht auf die Winkelinformation und eine Beschränkung auf die Änderung der Entfernungsinformation. Bei Kenntnis der Geometrie des überwachten Objekts ist es jedoch anschließend möglich, diese Änderungen in die relevanten Komponenten, z. B. in eine Bauwerksachse oder eine Vertikalkomponente, zu projizieren (Neuner u. Heunecke, 2012).

Die Bestimmung von Entfernungsänderungen erfolgt über einen Phasenvergleich, wobei die Signalstruktur durch eine Frequenzmodulation (vgl. auch Kapitel 2.3.6) erzeugt wird. Das Messprinzip wird im Falle der bodengebundenen interferometrischen Radarsysteme IBIS der in Italien ansässigen Firma IDS als *Stepped-Frequency Continuous Wave*, kurz SFCW bezeichnet. Dabei werden die Informationen aller Objektpunkte innerhalb des Messsignals gleichzeitig erfasst und quasi als Mittelwert behandelt. Die Auflösung einer Zelle in Entfernungsrichtung, dem sog. *Range Bin* beträgt, je nach System, über die gesamte Messentfernung konstant ca. 50 cm. Änderungen innerhalb einer solchen Zelle können jedoch mit einer Präzision von 0,01 mm bis zu einer Entfernung von ca. 1 km detektiert werden – bei einer zeitlichen Auflösung/Wiederholrate von 200 Hz. Mit einer starren Ausrichtung des Sensors auf eine Bauwerksstruktur können so Aufgabenstellungen wie Schwingungsmessungen (Neitzel u. a., 2012) und die Erfassung von lastbedingten Veränderungen an Brückenbauwerken (Riedel u. Lehmann, 2012) angenommen werden.

Analog zur SAR-Technologie flugzeug- und satellitengetragener Fernerkundungssensoren können auch bodengebundene interferometrische Radarsysteme durch eine synthetische Vergrößerung der Apertur eine Raumauflösung quer zur Messrichtung und somit eine flächenhafte Datenerfassung erzielen. Diese als *Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar* (GBInSAR) bezeichnete Technologie basiert auf der Aufnahme einer Szene aus unterschiedlichen Blickrichtungen. Während dies herkömmlich automatisch entlang eines Flugpfades oder Orbits erfolgt, wird eine solche synthetische Apertur durch eine Verschiebung des Radarkopfes in definierten Schrittweiten entlang einer z. B. zwei Meter langen Schiene erreicht. Die Pixelgröße variiert hier in Abhängigkeit der Messentfernung und beträgt beispielsweise in einer Entfernung von einem Kilometer $0,5 \text{ m} \times 4,3 \text{ m}$. Solche Systeme eignen sich demnach gut für Langzeitbeobachtungen von Hangrutschungen oder Vulkanflanken, aber auch für ingenieurtechnische Bauwerke – auch für Echtzeitanwendungen (Rödel-sperger, 2011).

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich die Perspektive für Überwachungsaufgaben von Bauwerken aufgrund einer hohen Entwicklungsdynamik in den letzten Jahren deutlich erweitert hat. Die in diesem Ausblick genannten innovativen Messverfahren beleuchten dabei nur einen Teilaspekt des Monitorings. Betrachtet man weitere Technologien wie z. B. faseroptische Sensoren, die auch einen Blick in das Innere des Bauwerks erlauben, wird deutlich, dass die Zukunft der Bauwerksüberwachung in einem *Structural Health Monitoring* unter Einbeziehung zahlreicher Daten aus unterschiedlichen Quellen und der Verbindung der Messergebnisse mit der Beschreibung von Deformationsprozessen münden wird. Diese Entwicklung wird bereits durch zahlreiche wissenschaftliche und praxisorientierte Beiträge belegt. Inwieweit sich diese kombinierten Ansätze auch in der realen Praxis – in der nach wie vor die Kenngrößen Kosten und Wirtschaftlichkeit in Verbindung mit der Ressourcenverfügbarkeit eines Ingenieurbüros die maßgebende Rolle spielen – umsetzen lassen, wird sich in Zukunft noch herausstellen.

Literaturverzeichnis

- [BGI 2003] BERUFGENOSSENSCHAFT DER FEINMECHANIK UND ELEKTROTECHNIK: Betrieb von Lasereinrichtungen. 2003 (832). – Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
- [BGI 2004] BERUFGENOSSENSCHAFT DER FEINMECHANIK UND ELEKTROTECHNIK: Laser-Einrichtungen für Show- oder Projektionszwecke. 2004 (5007). – Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
- [ABD 2010] AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN: Hochbrücke Freimann – Rück- und Neubau der Hochbrücke Freimann. 2010. – Informationsbroschüre
- [DBV 2015] DEUTSCHER BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E. V./VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V.: Sichtbeton / Exposed Concrete. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V., Berlin; Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, 2015. – DBV Merkblatt
- [Akca u. Gruen 2005] AKCA, D. ; GRUEN, A.: Fast correspondence search for 3D surface matching. In: *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005 – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Enschede, Niederlande, 2005
- [Albertz u. Wiggenhagen 2009] ALBERTZ, J. ; WIGGENHAGEN, M.: *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung: Guide for Photogrammetry and Remote Sensing*. Wichmann, 2009
- [Amann u. a. 2001] AMANN, M.-Chr. ; BOSCH, T. ; LESCURE, M. ; MYLLYÄ, R. ; RIOUX, M.: Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. In: *Optical Engineering* 40 (2001), Nr. 1, S. 10–19
- [Bachmann 2011] BACHMANN, A.: *Antimonide-based vertical-cavity surface-emitting lasers*, Technische Universität München, Diss., 2011
- [Bajtala u. a. 2011] BAJTALA, M. ; BRUNČÁK, P. ; KUBINEC, J. ; LIPTÁK, M. ; SOKOL, Š.: Exploitation of Terrestrial Laser Scanning in Determining of Geometry of a Factory Chimney. In: *5th International Conference on Engineering Surveying (INGEO 2011)*. Brijuni, Kroatien, 2011
- [Baldenhofer 2012] BALDENHOFER, K. G.: *Lexikon der Fernerkundung*. 2012. – <http://fe-lexikon.info/>, zuletzt geprüft am 24.09.2016
- [Bayoud 2006] BAYOUD, F. A.: Leica's Pinpoint EDM Technology with System Analyser Signal Processing and Novel Optomechanical Features. In: *XXIII International FIG Congress*. München, 2006
- [Benz u. a. 2004] BENZ, P. ; DE LANGE, M. ; HINDERLING, J.: *Patent EP1450128 A1: Method and device for extracting geodesic distance information / Verfahren und Vorrichtung zur Ableitung geodätischer Entfernungsinformationen*. 2004
- [Besl u. McKay 1992] BESL, P. ; MCKAY, N.: A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14 (1992), S. 239–256
- [Bitelli u. a. 2004] BITELLI, G. ; DUBBINI, M. ; ZANUTTA, A.: Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslides Bodies. In: *XXth ISPRS Congress*. Istanbul, Türkei, 2004
- [Boehler u. a. 2001] BOEHLER, W. ; HEINZ, G. ; MARBS, A.: The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. In: *XVIII International Symposium of CIPA 2001 – Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites. Traditional and Modern Methods*. Potsdam, 2001
- [Borrmann u. a. 2015] BORRMANN, A. ; KÖNIG, M. ; KOCH, Ch. ; BEETZ, J.: *Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015

- [Braun 2011] BRAUN, M.: *Untersuchungen zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten mittels Freiformflächen*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2011
- [Brenner 2006] BRENNER, C.: Aerial Laser Scanning. In: *International Summer School „Digital Recording and 3D Modeling“*. Aghios Nikolaos, Griechenland, 2006
- [Brückner u. a. 2007] BRÜCKNER, F. ; LEPSKI, D. ; BEYER, E.: Simulation of thermal stress in induction-assisted laser cladding. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO)*. Orlando, U.S.A., 2007
- [Brühwiler u. Menn 2003] BRÜHWILER, E. ; MENN, Ch.: *Stahlbetonbrücken*. Springer-Verlag, Wien, 2003
- [Chen 2012] CHEN, S.-H.: Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring. In: RODRIGUEZ, J. A. M. (Hrsg.): *Laser Scanner Technology*, 2012
- [Cheves 2007] CHEVES, M.: Fusing Measuring Innovation with Global R&D. In: *The American Surveyor* (2007)
- [Chmelina u. a. 2012] CHMELINA, K. ; JANSÁ, J. ; HESINA, G. ; TRAXLER, C.: A 3-d laser scanning system and scan data processing method for the monitoring of tunnel deformations. In: *Journal of Applied Geodesy* 6 (2012), S. 177–185
- [Cioci u. a. 2005] CIOCI, A. ; SPINETTI, A. ; CAROSSO, L. ; ATZENI, C.: Digital Three-Dimensional Modeling of Heritage by Frequency-Modulated Laser Radar: the case of Donatello's David. In: *6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST)*. Pisa, Italien, 2005
- [De Florianí u. Migillo 2003] DE FLORIANI, L. ; MIGILLO, P.: Algorithms for visibility computation on terrains: a survey. In: *Environment and Planning B – Planning and Design* 30 (2003), S. 709–728
- [Deumlich u. Staiger 2002] DEUMLICH, F. ; STAIGER, R.: *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Wichmann-Verlag, 2002
- [Dold 2010] DOLD, Ch.: *Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2010
- [Dold 2002] DOLD, J.: Messen mit Adlernaugen. In: *Laser+Photonik* (2002), S. 16–19
- [Donges u. Noll 1993] DONGES, A. A. ; NOLL, R.: Lasermess-technik: Grundlagen und Anwendungen. In: *Technische Physik*, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1993
- [Eichler u. a. 2004] EICHLER, J. ; DÜNKEL, L. ; EPPICH, B.: Die Strahlqualität von Lasern – Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? In: *Laser Technik Journal* (2004), S. 63–66
- [Eichler u. Eichler 2015] EICHLER, J. ; EICHLER, H. J.: *Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2015
- [El-Tornachi 2003] EL-TORNACHI, M. K.: *Rauheit von Betonoberflächen – 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen; Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung*, Universität Dortmund, Diss., 2003
- [Eling 2009] ELING, D.: *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*, Universität Hannover, Diss., 2009
- [Eppich 1998] EPPICH, B.: *Die Charakterisierung von Strahlungsfeldern mit der Wigner-Verteilung und deren Messung*, Technische Universität Berlin, Diss., 1998
- [Fiedler u. a. 2008] FIEDLER, K. ; GEUDER, S. G. ; OBHOLZER, A. ; WILLBERG, U.: Hochbrücke Freimann – Tragwerkstrennung und Erneuerung. In: *Innsbrucker Bautage 2008*. Innsbruck, Österreich, 2008
- [Fischer 2010] FISCHER, E. P.: *Laser – Eine deutsche Erfolgsgeschichte von Einstein bis heute*. Siedler Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, 2010
- [Fouckhardt 2011] FOUCKHARDT, H.: *Halbleiterlaser unter Verwendung Fourier-optischer Methoden*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [Friedel 2011] FRIEDEL, Th.: *Untersuchungen zur Echtzeitauswertung und -visualisierung von Deformationen mit einem Low-Cost Profils Scanner*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2011

- [Friedli u. Wieser 2016] FRIEDLI, E. ; WIESER, A.: Identification of stable surfaces within point clouds for areal deformation monitoring. In: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. Wien, Österreich, 2016
- [Fröhlich 1996] FRÖHLICH, Chr. L.: *Aktive Erzeugung korrespondierender Tiefen- und Reflektivitätsbilder und ihre Nutzung zur Umgebungserfassung*, Technische Universität München, Diss., 1996
- [Fuhrland 2008] FUHRLAND, M.: *Konzeption und Umsetzung neuer Technologien zur biaxialen Winkelmessung und elektrooptischen Pseudostreckenmessung*, Technische Universität Dresden, Diss., 2008
- [Girardeau-Montaut u. a. 2005] GIRARDEAU-MONTAUT, D. ; ROUXA, M. ; MARC, R. ; THIBAUT, G.: Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. In: *ISPRS Workshop Laser Scanning 2005 – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Enschede, Niederlande, 2005
- [GIS-Lab Marburg 2016] GIS-LAB MARBURG, Philipps-Universität M.: *Von räumlichen Analysemethoden zur Entscheidungsfindung – Vertiefungsbeispiel: Berechnung der Sichtbarkeit*. 2016. – <http://gisbsc.gis-ma.org/GISBSCL7/de/html/index.html>, zuletzt geprüft am 20.05.2016
- [Gordon 2008] GORDON, B.: *Zur Bespagestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [Graf 2009] GRAF, T.: *Laser – Grundlagen der Laserstrahlquellen*. Vieweg + Teubner, 2009
- [Harmening u. Neuner 2016] HARMENING, C. ; NEUNER, H.: Using model selection criteria to determine the optimal number of B-spline control points for areal deformation modelling. In: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*. Wien, Österreich, 2016
- [Hecht 2005] HECHT, E.: *Optik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2005
- [Heer 2011] HEER, R.: *Biographien von Herstellern zur geodätischen Messtechnik in der geodätischen Sammlung des Geodätischen Instituts der Leibniz Universität Hannover*. 2011
- [HeiseFoto 2012] HEISEFOTO: *Datenblatt Nikon D3000*. Heise Zeitschriften Verlag, 2012
- [Hesse u. Stramm 2004] HESSE, Chr. ; STRAMM, H.: Deformation measurements with laser scanners – Possibilities and challenges. In: *International symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*. Sofia, Bulgarien, 2004
- [Heunecke u. a. 2013] HEUNECKE, O. ; KUHLMANN, H. ; WELSCH, W. ; EICHHORN, A. ; NEUNER, H. ; MÖSER, Müller G.-Schlemmer H. M. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*. Wichmann, 2013
- [Holst u. a. 2014] HOLST, Ch. ; DUPUIS, J. ; PAULUS, S. ; KUHLMANN, H.: Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern – eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2014), S. 260–272
- [Holst u. Kuhlmann 2011] HOLST, Ch. ; KUHLMANN, H.: Bestimmung der elevationsabhängigen Deformation des Hauptreflektors des 100m-Radioteleskops Effelsberg mit Hilfe von Laserscannermessungen. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2011) mit TLS-Challenge. Beiträge zum 106. DVW-Seminar* Bd. 66, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2011
- [Holst u. Kuhlmann 2016] HOLST, Ch. ; KUHLMANN, H.: Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. In: *Journal of Applied Geodesy* (2016), Nr. 10, S. 17–25
- [Huep 2010] HUEP, W.: Scannen mit der Trimble VX Spatial Station. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* (2010)
- [Illmann u. Linke 2006] ILLMANN, U. ; LINKE, J.: Der neue 3D-Laserscanner CPW 8000 basierend auf der neuen Pulse-Wave-Technologie von CALLIDUS precision systems. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.) ; MÜLLER, Chr. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Oldenburg : Wichmann Verlag, 2006

- [Ingensand 2006] INGENSAND, H.: Metrological Aspects in Terrestrial Laser-Scanning Technology. In: *3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering / 12th FIG Symposium on Deformation Measurement*. Baden, Österreich, 2006
- [Ingensand u. a. 2003] INGENSAND, H. ; RYF, A. ; SCHULZ, Th.: Performances and experiences in terrestrial laserscanning. In: *6th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*. Zürich, Schweiz, 2003, S. 1–8
- [ISO 2001a] ISO: *ISO 17123-3:2001-12 – Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Untersuchung geodätischer Instrumente – Teil 3: Theodolite*. 2001
- [ISO 2001b] ISO: *ISO 17123-4:2001 – Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Untersuchung geodätischer Instrumente – Teil 4: Nahbereichsentfernungsmesser (EDM)*. 2001
- [ISO 2005a] ISO: *ISO 11146-1:2005 – Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams*. 2005
- [ISO 2005b] ISO: *ISO 11146-2:2005 – Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 1: General astigmatic beams*. 2005
- [Jacquemart u. Meier 2014] JACQUEMART, M. ; MEIER, L.: Deformationsmessungen an Talsperren und in deren alpiner Umgebung mittels Radarinterferometrie. In: *Wasser Energie Luft* (2014), Nr. 106
- [Joeckel u. a. 2008] JOECKEL, R. ; STÖBER, M. ; HUEP, W.: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Herbert Wichmann Verlag, 2008
- [Juretzko 2005] JURETZKO, M.: *Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen*, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2005
- [Jutzi 2007] JUTZI, B.: *Analyse der zeitlichen Signalform von rückgestreuten Laserpulsen*, Technische Universität München, Diss., 2007
- [Kampmann u. a. 1988] KAMPMANN, G. ; SPARLA, P. ; WITTE, B.: Möglichkeiten und Probleme der reflektorlosen Distanzmessung gezeigt am Beispiel des Wild DIOR 3002. In: *Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung (Ingenieurvermessung 88)*. München, 1988
- [Katowski 1989] KATOWSKI: Deformationsmessung an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmess-System ATMS. In: *Optical 3D Measurement Techniques*. Wien, Österreich : Wichmann Verlag Karlsruhe, 1989, S. 393ff
- [Kern 2001] KERN, F.: Bauaufnahme der Synagoge Wörlitz mittels reflektorloser Polaraufnahme. In: WEFERLING, Heine K and Wulf U. U. (Hrsg.): *Handaufmaß bis High Tech*, Inter Verlag Philipp von Zabner, Mainz, 2001
- [Kern 2003] KERN, F.: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2003
- [Köhler 2012] KÖHLER, M.: Distanzmessverfahren elektrooptischer Tachymeter – Stand der Trimble Technik. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2012), S. 291–304
- [Köbler 2007] KÖSSLER, M.: *Entwicklung eines applikationsbasierten Monitoringsystemes zur flächenhaften Deformationsmessung an Brückenbauwerken*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2007
- [Kuchling 2011] KUCHLING, H.: *Taschenbuch der Physik*. Carl Hanser Verlag, 2011
- [Kück 2003] KÜCK, H.: *Materialbearbeitung mit Lasern in der Mikrotechnik*. 2003
- [Kuhlmann 2002] KUHLMANN, H.: *Untersuchung von alternativen Meßverfahren zur Brückenüberwachung am Beispiel der Klosterwegbrücke*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, 2002
- [Kutterer u. a. 2009] KUTTERER, H. ; PAFFENHOLZ, J.-A. ; VENNEGEERTS, H.: Kinematisches terrestrisches Laserscanning. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* 134 (2009), S. 79–87

- [Laser2000 2005] LASER2000: *Technische Informationen zur WinCamD, Laserstrahlanalysesystem mit 14 Bit-Digitalkamera*, 2005
- [Leica Geosystems 2003] LEICA GEOSYSTEMS, AG: *Gebrauchsanweisung Leica TPS1100 Professional Series*. Leica Geosystems AG, 2003
- [Leica Geosystems 2013] LEICA GEOSYSTEMS, AG: *Firmengeschichte – Pioneers in surveying technology*. Website. http://www.leica-geosystems.com/en/Technology_874.htm. Version: 2013
- [Lenz 2012] LENZ, P.: *Beton-Beton-Verbund: Potenziale für Schubfugen*, Technische Universität München, Diss., 2012
- [Letsch 2009] LETSCH, A.: *Charakterisierung allgemein astigmatischer Laserstrahlung mit der Methode der zweiten Momente*, Universität Stuttgart, Diss., 2009
- [Lienhart 2007] LIENHART, W.: *Analysis of Inhomogeneous Structural Monitoring Data*, Technische Universität Graz, Diss., 2007
- [Lin0s 2006] LINOS: *Fokussierung und Aufweitung von Laserstrahlung – Technische Informationen zur Optik*, 2006
- [Little 2006] LITTLE, M. J.: Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation. In: *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Kapstadt, Südafrika, 2006, S. 211–230
- [Löffler-Mang 2012] LÖFFLER-MANG, M.: *Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [Luhmann 2010] LUHMANN, Th.: *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Verlag, 2010
- [Maar u. Zogg 2014] MAAR, H ; ZOGG, H.-M.: *WFD – Wave Form Digitizer Technology (White Paper on Leica Nova MS50, Leica Geosystems AG)*. 2014
- [Marstatt 2007] MARSTATT, W.: Entwicklung eines Prototyps zur automatischen Kalibrierung des räumlichen Divergenzwinkels reflektorlos messender Tachymeter / Technische Universität München. 2007. – Forschungsbericht
- [Meschede 2005] MESCHÉDE, D.: *Optik, Licht und Laser*. Teubner Verlag, 2005
- [Metric Vision 2002] METRIC VISION, MVI Technical S.: *Frequency Modulated Coherent Laser Radar Technology*. Leica Geosystems AG, 2002
- [Metrology 2010] METROLOGY, Nikon: *Laser Radar MV330/350 – Automated large volume inspection*, 2010
- [Möck 2011] MÖCK, K.: Qualitätsuntersuchung von Lasermessern. In: *VDVmagazin* (2011), Nr. 4, S. 262–265
- [Momber u. Schulz 2005] MOMBER, A. W. ; SCHULZ, R.-R. ; BIRKHÄUSER (Hrsg.): *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung – Eigenschaften – Prüfung*. 2005
- [Monserat u. Crosetto 2008] MONSERRAT, O. ; CROSETTO, M.: Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (2008), Nr. 63, S. 142–154
- [Naab u. Hennes 2012] NAAB, Chr. ; HENNES, M: Das Laser Radar – reflektorlose Distanzbestimmung mittels Frequenzmodulation. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2012), S. 48–53
- [Neitzel 2006] NEITZEL, F.: Bestimmung von Ziel- und Kippachsenfehler polarer Messsysteme aus Minimal-konfigurationen und Überbestimmten Konfigurationen. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* (2006), Nr. 3, S. 132–140
- [Neitzel u. Johannes 2009] NEITZEL, F. ; JOHANNES, L.: Anwendung des tachymetrischen Laserscannings in der Überwachung eines historischen Bauwerkes. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.) ; MÜLLER, Ch. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2009

- [Neitzel u. a. 2012] NEITZEL, F. ; NIEMEIER, W. ; WEISBRICH, S. ; LEHMANN, M.: Investigation of low-cost accelerometer, terrestrial laser scanner and ground-based radar interferometer for vibration monitoring of bridges. In: BOLLER, C. (Hrsg.): *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Dresden, 2012, S. 542–551
- [Neuner u. Heunecke 2012] NEUNER, H. ; HEUNECKE, O.: Geodätische Überwachung von Bauwerken. In: FOUAD, N. A. (Hrsg.): *Bauphysik-Kalender 2012, Schwerpunkt Gebäudediagnostik*, Verlag Ernst & Sohn, 2012
- [Neuner u. a. 2015] NEUNER, H. ; SCHMITT, C. ; NEUMANN, I.: Zur Bestimmung der verkehrsseitig verursachten Dehnung an einem Brückentragwerk mittels terrestrischem Laserscanning. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs (Ingenieurvermessung 14)*. Zürich, Schweiz : Wichmann Verlag, Heidelberg, 2015, S. 231–243
- [Noll 2003] NOLL, R.: Lasermesstechnik. In: *Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik*, Bauer, N., 2003
- [Nörtershäuser 2009] NÖRTERSCHÄUSER, W.: Physik des Lasers / Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 2009. – Forschungsbericht. – Vorlesungsskript
- [Nuttens u. a. 2010] NUTTENS, T. ; DE WULF, A. ; BRAL, L. ; DE WIT, B. ; CARLIER, L. ; DE RYCK, M. ; STAL, C. ; CONSTALES, D. ; DE BACKER, H.: High Resolution Terrestrial Laser Scanning for Tunnel Deformation Measurements. In: *XXIV International FIG Congress Bd. TS 4D - TLS Application I*. Sydney, Australien, 2010
- [Ohlmann-Bartusel 2008] OHLMANN-BARTUSEL, J.: *Innovative determination of areal deformations of an excavated tunnel intrados by multi-temporal laser scanning data*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2008
- [Ohlmann-Bartusel u. a. 2009a] OHLMANN-BARTUSEL, J. ; HÖFLE, R. ; FILLIBECK, J.: Ortsbrustdeformationen – Ortsbruststandsicherheit, Teil 1: Bestimmung und Mehrwert von flächenhaften Ortsbrustdeformationen. In: *Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie* (2009), Nr. 13
- [Ohlmann-Bartusel u. Mayr 2007] OHLMANN-BARTUSEL, J. ; MAYR, J. C.: Filterung von TLS-Daten – Datenfilterung flächenhafter TLS-Daten zur Anwendung im Bereich der Deformationsmessung. Praktikumsbericht Ingenieurvermessung / Technische Universität München. 2007. – Forschungsbericht
- [Ohlmann-Bartusel u. a. 2009b] OHLMANN-BARTUSEL, J. ; WEBER, Th. ; RAUCH, S. ; SCHÄFER, Th.: 3D-Laserscanning in der Ingenieurgeodäsie. In: GÖTTIG, R. (Hrsg.) ; SCHUBERT, G. (Hrsg.): *forum3D 2009 – 3D-Technologien an der Technischen Universität München*. München : Shaker Verlag, Aachen, 2009, S. 75–91
- [Ohlmann-Lauber u. Schäfer 2011] OHLMANN-LAUBER, J. ; SCHÄFER, Th.: Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS-Daten. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2011) mit TLS-Challenge. Beiträge zum 106. DVW-Seminar* Bd. 66, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2011
- [Ohlmann-Lauber u. Wehner 2014] OHLMANN-LAUBER, J. ; WEHNER, A.: *Terrestrische Laserscanner: Herstellerangaben (Stand INTERGEO 2013)*. 2014
- [Özkul 2009] ÖZKUL, M.: *Qualitätsansprüche bezüglich des äußeren Erscheinungsbildes von Automobilen der Premiumklasse*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [Paschotta 2008] PASCHOTTA, R.: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Bd. 1+2. 1. <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html> : Wiley-VCH, 2008. – An open access encyclopedia for photonics and laser technology, <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- [Pedrotti u. a. 2007] PEDROTTI, F. ; PEDROTTI, L. ; BAUSCH, W. ; SCHMIDT, H.: *Optik für Ingenieure: Grundlagen*. Springer, 2007. – ISBN 9783540734710
- [Penka u. a. 2005] PENKA, E. ; ZILCH, K. ; HENNECKE, M. ; WUNDERLICH, Th. ; SCHÄFER, Th. ; FOPPE, K.: Schadenserkennung durch reflektorlose Deformationsmessungen. In: *Beiträge zum Münchener Massivbau Seminar – Neue Wege im 21. Jahrhundert*. München, 2005

- [Petrie 1990] PETRIE, G. ; KENNIE, T.J.M. (Hrsg.) ; PETRIE, G. (Hrsg.): *Engineering Surveying Technology*. Taylor & Francis, 1990
- [Petrie u. Toth 2009] PETRIE, G. ; TOTH, C. K.: Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In: J., Shan (Hrsg.) ; TOTH, C. K. (. (Hrsg.): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, CRC Press, Boca Raton, 2009, S. 215–234
- [Preis 2016] PREIS, S.: Entwicklung von Oberflächen-/Rauheitsparametern. In: *Mitteilungen des DVW Bayern e. V.* (2016), S. 127–137
- [Przeszlakowski 2007] PRZESZLAKOWSKI, Chr.: *Experimentelle Untersuchung von Resonatorkonfigurationen eines optisch gepumpten Halbleiterscheibenlasers zur Frequenzverdopplung*, Universität Ulm, Diplomarbeit, 2007. <http://disk-laser.com/>
- [Ramseier 2004] RAMSEIER, E.: *L'important, c'est la distance – Tendances technologiques en télémétrie (electro) optique*. 2004
- [Ratke 2006] RATKE, K.: *Erfassung, Analyse und Modellierung des Futuro-Hauses von Matti Suuronen*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2006
- [Rauch 2009] RAUCH, S.: *Ansätze und Potenzial der automatisierten Auswertung von Laserscanningdaten zur Fassadendokumentation*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2009
- [Reidenbach u. a. 2003] REIDENBACH, H.-D. ; DOLLINGER, K. ; HOFMANN, J.: Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes. In: *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht, Fb 985*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2003
- [Reitberger 2010] REITBERGER, J.: *3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner*, Technische Universität München, Diss., 2010
- [Reiterer u. a. 2009] REITERER, A. ; LEHMANN, M. ; MILJANOVIC, M. ; ALI, H.: A 3D optical deformation measurement system supported by knowledge-based and learning techniques. In: *Journal of Applied Geodesy* (2009), Nr. 1, S. 1–13
- [Reshetyuk 2006] RESHETYUK, Y.: *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*, Royal Institute of Technology Stockholm, Diss., 2006
- [Retze 2007] RETZE, U.: *Beispielhafte Untersuchung zum Einsatz von Monitoringmethoden an einer Brücke*, Universität der Bundeswehr München-Neubiberg, Diss., 2007
- [Richter u. Juretzko 2007] RICHTER, E. ; JURETZKO, M.: Das Messverhalten des reflektorlosen Distanzmessmoduls R300 der Leica TPS1200-Serie an Kanten. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2007), S. 212–223
- [Riedel u. Lehmann 2012] RIEDEL, B. ; LEHMANN, M.: Erfassung von lastbedingten Veränderungen an Brückenbauwerken mittels terrestrischer Radarinterferometrie. In: LÖWNER, M.-O. (Hrsg.) ; HILLEN, F. (Hrsg.) ; WOHLFAHRT, R. (Hrsg.): *Geoinformatik 2012 – Mobilität und Umwelt*. Braunschweig, 2012, S. 1–8
- [Rödelsperger 2011] RÖDELSPERGER, S.: *Real-time Processing of Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) Measurements.*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2011
- [Rudig 2005] RUDIG, S.: *Analyse flächenhafter Deformationen aus Laserscannerdaten*, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Diss., 2005
- [Rüeger 1996] RÜEGER, J. M.: *Electronic Distance Measurement: An Introduction*. Springer Verlag, 1996
- [Runne 1993] RUNNE, H.: *Geodätische Datengewinnung für Gebäudeinformationssysteme unter Anwendung reflektorloser tachymetrischer Verfahren*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1993
- [Schaer u. a. 2007] SCHAER, Ph. ; SKALLOUD, J. ; LANDTWING, S. ; LEGAT, K.: Accuracy Estimation for Laser Point Cloud including scanning geometry. In: *Mobile Mapping Symposium*. Padua, Italien, 2007

- [Schäfer u. Schulz 2005] SCHÄFER, T. ; SCHULZ, Th.: Kalibrierung, Einflussgrößen und Genauigkeiten von Terrestrischen Laserscannern. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS) – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft. Beiträge zum 65. DVW-Seminar* Bd. 48, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2005, S. 29–48
- [Schäfer 2008a] SCHÄFER, Th.: Bauprozessorientierte Überwachungsmessungen während eines Brückentrückbaus unter Verkehr / Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen. 77. DVW-Fortbildungsseminar. Weimar. 2008. – Präsentation
- [Schäfer 2008b] SCHÄFER, Th.: “Malen nach Zahlen” – Das Zusammenspiel von Punktwolke und CAD. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008). Beiträge zum 79. DVW-Seminar* Bd. 54, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2008
- [Schäfer 2011a] SCHÄFER, Th.: Flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter Berücksichtigung der Interaktion Laserstrahl/Objektoberfläche. In: LUHMANN, Th. (Hrsg.) ; MÜLLER, Ch. (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*. Oldenburg, 2011
- [Schäfer 2011b] SCHÄFER, Th.: Simulation der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* 118 (2011), S. 363–367
- [Schäfer u. a. 2006] SCHÄFER, Th. ; PENKA, E. ; ZILCH, K. ; WUNDERLICH, Th.: Efficient Local Deformation Recognition on Highway Bridges. In: *XXIII International FIG Congress*. München, 2006
- [Schäfer u. Schleinkofer 2005] SCHÄFER, Th. ; SCHLEINKOFER, M.: Vom Laseraufmaß zum Stoffflussmanagement für Altbauten (F268, Zentrales Leitprojekt: Stoffflussmanagement (SFM) Bauwerke) / BayFORREST Forschungsverbund. 2005. – Forschungsbericht
- [Schäfer u. a. 2004] SCHÄFER, Th. ; WEBER, Th. ; KYRINOVÍČ, P. ; ZÁMEČNIKOVÁ, M.: Deformation Measurement using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo. In: *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*. Bratislava, Slowakei, 2004
- [Schäfer 2014] SCHÄFER, Thomas: Eine Simulationsumgebung zur Analyse berührungsloser Distanzmessungen unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Objekt. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs (Ingenieurvermessung 14)*. Zürich, Schweiz : Wichmann Verlag, Heidelberg, 2014, S. 27–36
- [Scherer 2004] SCHERER, M.: Intelligent scanning with robot-tacheometer and image-processing – a low cost alternative to 3D-laser scanning? In: *FIG Working Week*. Athen, Griechenland, 2004
- [Scherer 2007] SCHERER, M.: Nahe Verwandte des Laserscanners: Intelligente Totalstation und 3D-Kamera. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) – Ein Messverfahren erobert den Raum. Beiträge zum 74. DVW-Seminar* Bd. 53, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2007
- [Schlüter 2002] SCHLÜTER, M.: Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner – mechanisch, optisch, interferometrisch. In: SEYFERT, E. (Hrsg.): *Zu neuen Märkten – auf neuen Wegen – mit neuer Technik. 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung* Bd. 11. Neubrandenburg, 2002, S. 187–194
- [Schmidt u. a. 2012] SCHMIDT, M. ; DOBLER, M. ; KOHL, S. ; GÜRTLER, F.-J. ; LEITZ, K. H. ; OTTO, A.: Multi-physical modeling of laser material processing – process analysis and optimization. In: *International Laser Symposium Fiber & Disc (FiSC 2012)*. Dresden, 2012
- [Schmitt u. a. 2013a] SCHMITT, C. ; NEUNER, H. ; NEUMANN, I.: Strain detection on bridge constructions with kinematic laser scanning. In: *2nd Joint international Symposium on Deformation Monitoring*. Nottingham, UK, 2013
- [Schmitt u. a. 2013b] SCHMITT, C. ; NEUNER, H. ; NEUMANN, I. ; HAAR, C. von d. ; HANSEN, M. ; MARX, S.: Überwachung von Brückentragwerken mit ingenieurgeodätischen Verfahren und Sensoren der Baumess-technik. In: *Geomonitoring 2013*. Hannover, 2013
- [Schulz 2007] SCHULZ, Th.: *Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diss., 2007

- [Schwarz 2012] SCHWARZ, W.: Einflussgrößen bei elektrooptischen Distanzmessungen und ihre Erfassung. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2012), S. 323–335
- [Seeger 2007] SEEGER, St.: *Patent EP1793243 A1: Verfahren zur Auflösung einer Phasenmehrdeutigkeit*. 2007
- [Soudarissanane u. a. 2009] SOUDARISSANANE, S. ; LINDENBERGH, R. ; MENENTI, M. ; TEUNISSEN, P.: Incidence angle influence on the quality of Terrestrial Laser Scanning points. In: *Laserscanning 2009* Bd. ISPRS, XXXVIII, Part 3/W8. Paris, Frankreich, 2009
- [Soudarissanane u. a. 2007] SOUDARISSANANE, S. ; VAN REE, J. ; BUCKSCH, E. ; LINDENBERGH, R.: Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality. In: *Beiträge zum 10. Anwendungsbezogenen Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten (3D-Nordost 2007)*. Berlin, 2007
- [Stahlberg 1997] STAHLBERG, Chr.: Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. In: *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV)* 122 (1997), Nr. 5, S. 225–235
- [Staiger 2003] STAIGER, R.: Terrestrial Laser Scanning, Technology, Systems and Applications. In: *2nd FIG Regional Conference*. Marrakech, Marocco, 2003
- [Staiger u. Wunderlich 2008] STAIGER, R. ; WUNDERLICH, Th.: Schneller, weiter, effizienter – Aktuelle Entwicklungen der Scannertechnik. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2008)*. Beiträge zum 79. DVW-Seminar Bd. 54, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2008
- [Sternberg 2007] STERNBERG, H.: Laserscanning 2007 – die nächste Generation der Systeme? In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) – Ein Messverfahren erobert den Raum*. Beiträge zum 74. DVW-Seminar Bd. 53, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2007
- [Stewart 1997] STEWART, A. J.: Hierarchical Visibility in Terrains. In: *Rendering Techniques 97 – Proceedings of the Eurographics Workshop*. St. Etienne, Frankreich : a, 1997 (Eurographics)
- [Stilla u. Jutzi 2009] STILLA, U. ; JUTZI, B.: Waveform analysis for small-footprint pulsed laser systems. In: J., Shan (Hrsg.) ; TOTH, C. K. (. (Hrsg.): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*., CRC Press, Boca Raton, 2009, S. 215–234
- [Stilla u. a. 2009] STILLA, U. ; JUTZI, B. ; REITBERGER, J. ; YAO, W. ; KRZYTEK, P.: Full Waveform Laserscanning – Auswertemethoden und Anwendungen. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2011) mit TLS-Challenge*. Beiträge zum 106. DVW-Seminar Bd. 66, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2009
- [Stramm 2004] STRAMM, H.: *Untersuchungen zur Operabilität von Laserscannern bei der Konvergenzmessung in Tunnelbauwerken*, Universität Hannover, Diplomarbeit, 2004
- [Striegl 2008] STRIEGL, Ph.: *Deformationsmessung nichtsignalisierter Objekte mittels tachymetrischen Scannings*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2008
- [Stutz u. a. 2012] STUTZ, R. ; FRITSCH, R. ; HINDERLING, J. ; ROHNER, M.: *Patent EP2517043 A1: Highly accurate distance measurement device*. 2012
- [Talsperrenkomitee 2013] TALSPERRENKOMITEE, Schweizerische: *Geodäsie für die Überwachung von Stauanlagen – Empfehlungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei Stauanlagen*. 2013
- [Tradowsky 1983] TRADOWSKY, K.: *Laser – Grundlagen, Technik, Basisanwendungen*. Cogel-Buchverlag, Würzburg, 1983
- [Vincent 1999] VINCENT, A.: Terrain Occlusion Using Binary Adaptive Ray Casting. In: *Silicon Graphics Inc.* (1999)
- [Volk 2005] VOLK, R. ; NORMUNG E.V., DIN D. f. (Hrsg.): *Rauheitsmessung – Theorie und Praxis*. Beuth-Verlag, Berlin, 2005
- [Vosselmann u. Maas 2010] VOSSELMANN, G. ; MAAS, H.-G.: *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, 2010

- [Wagner 2017] WAGNER, A.: *New Geodetic Monitoring Approaches using Image Assisted Total Stations*, Technische Universität München, Diss., 2017
- [Wagner u. a. 2014] WAGNER, A. ; HUBER, B. ; WIEDEMANN, W. ; PAAR, G.: Long-Range Geo-Monitoring using Image Assisted Total Stations. In: *Journal of Applied Geodesy* (2014), Nr. 3, S. 223–234
- [Wagner u. a. 2004] WAGNER, W. ; ULLRICH, A. ; MELZER, T. ; BRIESE, C. ; KRAUS, K.: From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. 35, 2004, S. 201–206
- [Wang 2013] WANG, J.: *Towards deformation monitoring with terrestrial laser scanning based on external calibration and feature matching methods*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2013
- [Wasmeier 2009] WASMEIER, P.: *Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [Wasmeier 2012] WASMEIER, P.: Bestimmung der Kalibrierbasis der UniBw München Messungen mit dem Mekometer ME5000 des Lehrstuhls für Geodäie der Technischen Universität München. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2012), S. 305–308
- [Wasmeier u. Wagner 2016] WASMEIER, P. ; WAGNER, A.: Bildgestützte Messverfahren in der modernen Tachymetrie. In: *Messtechnik im Bauwesen* (2016)
- [Wehr 1991] WEHR, A.: *Entwicklung und Erprobung von opto-elektronischen Entfernungsmeßsystemen mit CW-Halbleiterlasern*, Universität Stuttgart, Diss., 1991
- [Wehr u. Lohr 1999] WEHR, A. ; LOHR, U.: Airborne Laser Scanning – an Introduction and Overview. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (1999), S. 68–82
- [Wiedemann 2010] WIEDEMANN, W.: *Terrestrisches Laserscanning (TLS): Analyse von Deformationen mittels Epochenvergleich am Beispiel Hornbergl bei Reutte/Tirol*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2010
- [Wölfleschneider 2009] WÖLFLESCHEIDER, H.: Physikalische Prinzipien der Laserscantechnologie. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009) – Yes, we Scan! Beiträge zum 91. DVW-Seminar* Bd. 60, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2009
- [Wölfleschneider 2011] WÖLFLESCHEIDER, H.: Physikalische Prinzipien der Laserscantechnologie. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2011) mit TLS-Challenge. Beiträge zum 106. DVW-Seminar* Bd. 66, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 19. und 20. November 2009 2011
- [Wujanz u. a. 2014] WUJANZ, D. ; KRUEGER, D. ; NEITZEL, F.: Der ICProx-Algorithmus – oberflächenbasierte Registrierung terrestrischer Laserscans für die Deformationsanalyse. In: WIESER, A. (Hrsg.): *Beiträge zum 17. Internationalen Ingenieurvermessungskurs (Ingenieurvermessung 14)*. Zürich, Schweiz : Wichmann Verlag, Heidelberg, 2014, S. 245–256
- [Wunderlich 2001] WUNDERLICH, Th.: Operational and Economic Prospects of Terrestrial Laser Scanning. In: *Optical 3D Measurement Techniques V*. Wien, Österreich, 2001
- [Wunderlich 2004] WUNDERLICH, Th.: Geodetic Monitoring with Prismless Polar Methods. In: *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying*, 2004
- [Wunderlich 2008] WUNDERLICH, Th.: Der technologische Fortschritt eröffnet neue Chancen – wie kann sie der Geometer nutzen? In: *Die wirtschaftliche und gesellschaftliche Rolle der Geometer in Europa. 39. Französischer Kongress der Geometer und Experten / Erster Kongress der europäischen Geometer*. Straßburg, Frankreich, 2008
- [Wunderlich u. a. 2016] WUNDERLICH, Th. ; NIEMEIER, W. ; WUJANZ, D. ; HOLST, Chr. ; NEITZEL, F. ; KUHLMANN, H.: Areal Deformation Analysis from TLS Point Clouds – the Challenge. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* (2016), S. 340–351
- [Xiangyang u. a. 2015] XIANGYANG, X. ; YANG, H. ; NEUMANN, I.: Concrete Crack Measurement and Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning Technology. In: *Sensors & Transducers* 186 (2015), S. 168–172

- [Zahn 2012] ZAHN, W.: *Relative Laserintensitätsmessungen anhand eines CCD-Sensors*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2012
- [Zámečnicková u. Neuner 2014] ZÁMEČNÍKOVÁ, M. ; NEUNER, H.: Der Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung. In: *Terrestrisches Laserscanning (TLS 2014). Beiträge zum 139. DVW-Seminar* Bd. 78, Schriftenreihe des DVW. Fulda, 2014
- [Zámečnicková u. a. 2014] ZÁMEČNÍKOVÁ, M. ; WIESER, A. ; WOSCHITZ, H. ; RESSL, C.: Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy* (2014), Nr. 8, S. 311–325
- [Zeiske 1999] ZEISKE, K.: *TPS1100 Professional Series – Eine neue Tachymetergeneration von Leica Geosystems*. Leica Geosystems AG, 1999
- [Zheng 2005] ZHENG, J.: *Optical Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Interferometry*. Springer, New York, 2005
- [Zilch u. a. 2005] ZILCH, K. ; PENKA, E. ; HENNECKE, M. ; WILLBERG, U. ; WUNDERLICH, Th.: Damage detection using reflectorless electronic distance Measurements: Results of the first Epochs. In: *1st Munich Bridge Assessment Conference (MBAC)*. München, 2005
- [Zilch u. a. 2009] ZILCH, K. ; PENKA, E. ; HENNECKE, M. ; WILLBERG, U. ; WUNDERLICH, Th. ; SCHÄFER, Th.: Brückenmonitoring der Hochbrücke Freimann während des Teilabbruchs unter Verkehr. In: *5. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen*. Dresden, 2009
- [Zogg u. Ingensand 2008] ZOGG, H.-M. ; INGENSAND, H.: Terrestrial Laser Scanning for Deformation Monitoring – Load Tests on the Felsenau Viaduct (CH). In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5*. Peking, China, 2008
- [Zogg u. a. 2009] ZOGG, H.-M. ; LIENHART, W. ; NINDL, D.: *Leica TS30 – The art of achieving highest accuracy and performance*. 2009

Abbildungsverzeichnis

2.1	Spontane Emission von Licht	18
2.2	Stimulierte Emission von Licht	19
2.3	Spontane und stimulierte Emission von Laserlicht bei drei Energieniveaus	20
2.4	Schematischer Aufbau eines Lasers	21
2.5	Schematischer Aufbau eines einfachen Diodenlasers	22
2.6	Maximal zulässige Leistungen im Dauerstrichbetrieb nach EN 60825-1	24
2.7	Amplitudenmodulation für Pulsmessverfahren	28
2.8	Anordnung von Sende- und Empfangsoptik beim Pulsmessverfahren	29
2.9	Amplitudenmodulation für Phasenvergleichsverfahren	30
2.10	Phasenvergleichsverfahren und Mehrdeutigkeitslösung über Differenzbildung nach Trimble	31
2.11	Pulsed-Wave-Verfahren	31
2.12	Signalgenerierung durch Frequenzmodulation	37
2.13	Frequenzdifferenz bei der Chirp-Modulation	37
2.14	Aktive Triangulation mit einem Laserspot und einem CCD-Chip als Empfänger	38
2.15	Darstellung der Lasertiangulation beim Lichtschnittverfahren	39
2.16	Strahlableitung bei terrestrischen Laserscannern und Tachymetern	41
3.1	Auswertestrategien und Deformationsmodelle für Punktwolken	46
4.1	Schematische Darstellung des ATR-Nullpunktfehlers	57
4.2	Schematische Darstellung des Diskrepanzwinkels	58
4.3	Auswirkungen eines Diskrepanzwinkels	59
4.4	Bildmesstechnische Bestimmung des Diskrepanzwinkels	60
4.5	Beträge und Richtungen der Achsenfehler an der Einheitskugel	61
4.6	Auswirkungen eines Nullpunktfehlers	65
4.7	Zyklischer Phasenfehler im Nahbereich	66
4.8	Testreihe zur Bestimmung des Auflösungsvermögens	67
4.9	Aufnahmekonfiguration der simulierten Abtastung	69
4.10	Auswirkung eines Zielachsfehlers an der virtuellen Wand	70
4.11	Auswirkung eines Kippachsfehlers an der virtuellen Wand	70
4.12	Auswirkung eines Höhenindexfehlers an der virtuellen Decke	71
4.13	Auswirkung eines Stehachsfehlers an der virtuellen Decke	71
4.14	Auswirkung eines Maßstabsfehlers an der virtuellen Decke	72
4.15	Auswirkung einer Nullpunktskonstante an der virtuellen Decke	72
4.16	Auswirkung eines zyklischen Phasenfehlers an der virtuellen Decke	73
5.1	Meteorologische Korrektur für eine Trägerwellenlänge von 700 nm	76
5.2	Schematische Seitenansicht der Zielgeometrie	79
5.3	Veränderung der Wellenfront durch Reflexion an einer geneigten Zielfläche	80
5.4	Genauigkeitsmodelle für die Streckenmessgenauigkeit in Abhängigkeit des Auftreffwinkels	81
5.5	Transversale Intensitätsmuster zylindrischer TE-Moden auf Basis der Laguerre-Polynome	83
5.6	Schematische Darstellung eines Gauß-Strahls	84
5.7	Modifizierter Gauß-Strahl	87
5.8	Abschwächung der Laserintensität aufgrund atmosphärischer Streuung und Strahldivergenz	88
5.9	Messkonfiguration für die direkte Laserabbildung auf einen CCD-Sensor	90
5.10	Messkonfiguration für die indirekte Laserabbildung über Projektionstafel auf CCD-Sensor	90
5.11	Direkte Abbildung des Laserstrahls auf einen CCD-Sensor (0,7 m)	93

5.12 Einzelaufnahmen der direkten Abbildung des Laserstrahls auf CCD-Sensoren (10 m)	94
5.13 Gesamtbild der direkten Abbildung des Laserstrahls auf CCD-Sensoren (10 m)	94
5.14 Intensitätsverteilung und Laserstrahlparameter (0,7 m)	96
5.15 Intensitätsverteilung und Laserstrahlparameter (10 m)	96
5.16 Punktsymmetrie in einer Entfernung von 0,7 m	97
5.17 Punktsymmetrie in einer Entfernung von 10 m	97
5.18 Foto des Laserspots auf einer Projektionsfläche in 80 m Entfernung	98
5.19 Indirekte Abbildungen des Laserstrahls auf ein Passpunktfeld im Messbereich bis 80 m	100
5.20 Ermittelte Strahlradien und Gegenüberstellung mit Herstellerangaben	101
5.21 Strahlradien nach unterschiedlichen Methoden	102
5.22 Ausrichtung der Strahlellipse und elliptische Form des Strahlquerschnittes	103
5.23 Benutzeroberfläche der Simulationsumgebung	104
5.24 Freiheitsgrade bei der Positionierung der Testoberflächen	105
5.25 Betonoberfläche	105
5.26 Oberflächenerfassung einer Betonoberfläche mit Streifenlichtmesssystem	106
5.27 Ergebnis der Oberflächenerfassung	106
5.28 Reflexionsmodelle: spiegelnde, diffuse Reflexion und diffuse Reflexion mit Spiegelung	107
5.29 Methodik der Sichtbarkeitsanalyse innerhalb eines Geländeprofiles	108
5.30 Methodik der Sichtbarkeitsanalyse innerhalb einer Dreiecksvermaschung	108
5.31 Beispiele für die Umsetzung der Sichtbarkeitsanalyse	109
5.32 Zielgeometrie, Pulsantwort und Phasenantwort	109
5.33 Eingangs- und Ausgangssignal in einem LTI-System	110
5.34 Stoßantwort als Reaktion des LTI-Systems auf einen Diracstoß	110
5.35 Bestimmung der Phasenlage aus vier Intensitätsmessungen	111
5.36 Einzelschwingungen und Superposition	113
5.37 Laserspot mit Abschattungsbereich an der Kante des Stufenmodells	114
5.38 Stufenmodell auf Verschiebeschlitten mit Messuhr	114
5.39 Simulierte Laserstrahlen am Stufenmodell	115
5.40 Konfiguration des Stufenmodells mit drei unterschiedlichen Ausrichtungen	115
5.41 Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell (Stellung 1)	117
5.42 Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell (Stellung 2)	118
5.43 Simulierte Distanzmessungen am Stufenmodell (Stellung 3)	119
5.44 Simulierte Distanzmessungen auf einer ideale Ebene (mod. Gauß-Strahl)	120
5.45 Simulierte Distanzmessungen auf einer ideale Ebene (Lasersmodells D)	121
5.46 Simulierte Distanzmessungen auf einer ideale Ebene (Lasersmodells D, Entfernungsprofil)	122
5.47 Vermaschte Punktwolke der Betonoberfläche (Detail) und Histogramm	122
5.48 Simulierte Distanzmessungen auf einer Betonoberfläche (Lasersmodells D)	123
6.1 Digitale Ortskarte Hochbrücke Freimann	126
6.2 Simulation der Verformung aufgrund eines Schadens	127
6.3 Geodätisches Überwachungskonzept für die Hochbrücke Freimann	128
6.4 Deckenprismen und berührungslose Messung der Objektpunkte	128
6.5 Grundlagnennetz und Objektpunkte an der Hochbrücke Freimann	129
6.6 Aufbau des temporären Festpunktfeldes	130
6.7 Horizontalbewegung der Deckenprismen und Verschiebung des Brückenüberbaus	131
6.8 Mess- und Berechnungsprozesse der GEOBASIC-Applikation Freimann	133
6.9 Lokale Betrachtung der Brückengeometrie und Identifikation möglicher Schwachstellen)	135
6.10 Messrauschen (Standardabweichung) aus 15 Einzelmessungen	135
6.11 Topographie der Brückenunterseite als Polynomfläche 3. Ordnung	137
6.12 Zielweiten und Einfallswinkel (Nordteil)	138
6.13 Zielweiten und Einfallswinkel (Südteil)	139
6.14 Höhendifferenzen der Epochen 5-1 im gesamten Beobachtungsbereich	141
6.15 Höhendifferenzen der Epochen 5-1 in den Feldern 5 bis 7	142
6.16 Provisorische Abstützung des Überbaus	143
6.17 Messanordnung bei der redundanten Aufnahme der Oberflächengeometrie	144

6.18 Darstellung der Höhendifferenzen der redundanten Aufnahme (unkorrigiert)	145
6.19 Abhängigkeit der Höhendifferenzen von der Differenz der Zenitwinkel	145
6.20 Darstellung der Höhendifferenzen der redundanten Aufnahme (korrigiert)	146

Tabellenverzeichnis

2.1	Laserklassen nach DIN EN 60825-1/11.01	25
2.2	Pulsmess- und Phasenvergleichsverfahren im Vergleich	32
2.3	Messprinzipien berührungsloser, laserbasierter Distanzmessung – Markteinblick	34
4.1	Justierbedingungen eines Theodolits	57
4.2	Zusammenstellung ermittelter Achsfehler	58
4.3	EDM-Spezifikationen verschiedener Instrumente (Auswahl)	63
4.4	Auflösungsvermögen und Präzision	68
5.1	Eigenschaften kommerzieller Laseranalysesysteme und Systemkameras (Auswahl)	89
5.2	Resultate der CCD-Messung	95
5.3	Vergleich der Laserstrahlparameter	99
5.4	Ausrichtungen der Stufe gegenüber dem Laserstrahl	115
5.5	Zusammenstellung modellierter Laserstrahlen	116

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laserscanning
AMCW	Amplitude-Modulated Continuous Wave
ATR	Automatic Target Recognition
BIM	Building Information Modelling
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CLR	Coherent Laser Radar
DIOR	Distomat ohne Reflektor
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave
FWD	Full Waveform Digitising
GB-SAR	Ground Based Synthetic Aperture Radar
GBInSAR	Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Geometrische Produktspezifikation
IATS	Image Assisted Total Station
ICP	Iterative Closest Point
INS	Inertial Navigation System
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-emitting diode / Lichtemittierende Diode
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLR	Lunar Laser Ranging
LOS	Line of Sight
LS3D	Least Squares 3D (Surface Matching)
LTI	Linear Time-Invariant
PSD	Positions-Sensitive-Diode
ppm	parts per million
RGB	Rot/Grün/Blau (Farbraum)
TLS	Terrestrisches Laserscanning
TOF	Time-of-Flight
SFCW	Stepped-Frequency Continuous Wave
STL	Surface Tessellation Language
WFD	Wave Form Digitizer

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Thomas Schäfer
Geburtsdatum: 05.10.1976
Geburtsort: Villingen-Schwenningen
Familienstand: verheiratet, 2 Kinder



Ausbildung und beruflicher Werdegang

seit 06/2013	Niederlassungsleiter / Abteilungsleiter Ingenieurvermessung Vermessungsbüro RMK, Niederlassung Freising
09/2007 - 05/2013	Akademischer Rat auf Zeit / Wissenschaftlicher Assistent Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München
03/2007 - 11/2014	Mitglied im Arbeitskreis 4 (Ingenieurvermessung) des DVW e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement
05/2003 - 09/2007	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München Forschungsprojekte & Arbeitsschwerpunkte (Auswahl): Interreg IIIB/ClimChAlp: Monitoring, Prevention & Management of specific effects of Climate Change on Nature BayFORREST/F248: Vom Laseraufmaß zum Stoffflussmanagement für Altbauten
10/1997 - 03/2003	Studium Vermessungswesen/Geodäsie und Geoinformation Technischen Universität München Abschluss: Diplom-Ingenieur Vermessungswesen Diplomarbeit: Anwendung eines Indoor Local Positioning Systems zur Bestimmung und Analyse von Einkaufswagentrajektorien
08/1996 - 08/1997	Zivildienst Dialyse-Institut Schwenningen
09/1987 - 04/1996	Allgemeine Hochschulreife Gymnasium am Hoptbühl in Villingen

Dank

Mein Dank gilt all jenen, die mich in den letzten Jahren auf vielfältige Weise unterstützt und an mich geglaubt haben:

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich danke ich dabei ganz besonders für die stete Betreuung und Zuversicht bei der Bearbeitung dieser Arbeit. Seine jederzeit offene Tür und seine Diskussionsbereitschaft ermöglichten mir eine zuverlässige Bearbeitung des Monitoringprojektes, aus dessen Problemstellung sich schließlich mein Forschungsthema entwickelte. Ich danke ihm auch recht herzlich für die Möglichkeit zur Teilnahme an zahlreichen Konferenzen und das entgegengebrachte Vertrauen zur Präsentation vieler unserer Forschungsergebnisse.

Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand möchte ich für die freundliche Übernahme des Koreferates meinen besten Dank aussprechen. Seinen Einblicken in die Instrumentenentwicklung habe ich zahlreiche konstruktive Anregungen zu verdanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ebenso danke Prof. Dr.-Ing. Hans Neuner für den langjährigen Dialog über Forschungsergebnisse und schließlich für die Übernahme eines weiteren Koreferats.

Mein Dank gilt auch Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Wieser für seine konstruktiven Anmerkungen sowie Ing. PhD Miriam Zámečníková für den fachlichen Austausch und den damit verbundenen Ansporn. Für die Bereitstellung eines Nahbereichsscanners nebst Digitalisierung von Testoberflächen danke ich Dr.-Ing. Gerald Nürnberg.

Für die gute Zusammenarbeit an der Hochbrücke Freimann danke ich Dr.-Ing. Erwin Penka (Zilch + Müller Ingenieure) – sein vermitteltes Fachwissen aus Sicht des Prüfeningenieurs war für den erfolgreichen Abschluss des Projektes von unschätzbarem Wert. Zudem entstanden im Projektverlauf zahlreiche Abschlussarbeiten von Saša Božič, Martin Köbler, Dominik Kraft, Wolfram Marstatt und Wolfgang Zahn – deren Erkenntnisse meine Arbeit nicht zuletzt bereicherten.

Dem gesamten Team des Lehrstuhls für Geodäsie der Technischen Universität bin ich tief verbunden für unzählige Hilfestellungen und nicht zuletzt für eine unvergessliche gemeinsame Zeit.

Meiner geliebten Familie, insbesondere meinen Eltern und ganz besonders meiner Ehefrau Lisa Schäfer, möchte ich für ihr großes Verständnis und ihre beständige Unterstützung und Motivation danken.

München, Februar 2017

