DGK Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 806

Michael Geist

Flächenhafte Formabweichungen bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5218-5

Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 806

Flächenhafte Formabweichungen bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner

Von der der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Rostock

zur Erlangung des Grades

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Michael Geist,

Geboren am 07.02.1978 in Rostock

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5218-5

Adresse der DGK:

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

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

Telefon +49 – 331 – 288 1685 ● Telefax +49 – 331 – 288 1759

E-Mail post@dgk.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Gutachter:

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner, Lehrstuhl Fertigungstechnik, Universität Rostock
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann, Geodätisches Institut, Leibniz Universität Hannover

Datum der Einreichung: 03. Mai 2017

Datum der Verteidigung: 05. Oktober 2017

© 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

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5218-5

Professur für Geodäsie und Geoinformatik an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Flächenhafte Formabweichungen bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen
Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von:

Diplom Ingenieur (FH) Michael Geist,
geboren am 7. Februar 1978 in Rostock

Gutachter:

1. Gutachter
   Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill
   Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik
2. Gutachter
   Prof. Dr.-Ing. Martin-Christoph Wanner
   Universität Rostock, Lehrstuhl Fertigungstechnik
3. Gutachter
   Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
   Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut

Datum der Einreichung: 03. Mai 2017
Datum der Verteidigung: 5. Oktober 2017

Kurzfassung

Terrestrische Laserscanner sind im geodätischen Bereich ein akzeptiertes Messsystem für die schnelle und umfassende 3D-Digitalisierung von Objekten. Darüber hinaus bieten die Vorteile des Messverfahrens ein enormes Potential für den Einsatz in der industriellen Fertigung von Großstrukturen. Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Qualitätssicherung, der Steuerung von Fertigungsprozessen oder der Onlineprogrammierung von Automatisierungsanlagen bei der Unikatfertigung lassen sich schnell, effizient und objektiviert mittels der berührungslosen Scantechnik umsetzen. Die Bemühungen zur Standardisierung von Unsicherheitsangaben und Prüfverfahren stammen jedoch überwiegend aus der geodätischen Betrachtungsweise und der Rückführung auf einen diskreten Punkt zur Bewertung einer 3D-Punktgenauigkeit als absolute Genauigkeitsangabe. Aus Sichtweise der Fertigungstechnik steht die Eignung eines Messsystemes und des Messprozesses für eine Messaufgabe innerhalb eines objektbezogenen Referenzsystems im Vordergrund.

Die vorliegende Arbeit stellt eine anwendungsbezogene Betrachtungsweise der Datenqualität terrestrischer Laserscanner vor. Für die Formanalyse von Freiformflächen spielt die formtreue Abbildung der Strukturen eine wesentliche Rolle. Herstellerangaben, die diese Eigenschaft beschreiben, wie z. B. die Modellierungsgenauigkeit, sind jedoch weitestgehend aus den Spezifikationen verschwunden. Durch eben diese Angaben wird das eigentliche Wesen der Systeme, die flächenhafte Beschreibung von Oberflächen mit einer Vielzahl von Punkten, ausgedrückt.

Für den Einsatz im industriellen Umfeld ist die Ermittlung systematischer Messabweichungen ein grundlegender Bestandteil für die Angabe merkmalsspezifischer Messunsicherheiten. Der reine Vergleich von Kenngrößen gegenüber der Spezifikation ist nicht ausreichend, um das Genauigkeitspotential terrestrischer Laserscanner darzustellen. In dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, eine flächenhafte Bewertung der Systeme als Grundlage für die Angabe einer prüfbaren Flächentoleranz vorzunehmen. Aus der experimentellen Untersuchung der Formtreue verschiedener Phasenvergleichsscanner und der Analyse bisher vorgeschlagener Kennwerte wird ein Verfahren zur Bewertung systematisch wirkender Effekte abgeleitet.

Während bei punktuell messenden Systemen die zufälligen Abweichungen durch Wiederholungsmessungen und Mittelwertbildung reduziert werden können, lässt sich bei scannenden Systemen eine Reduktion durch eine geeignete Oberflächenmodellierung erreichen. In dieser Arbeit werden zwei Verfahren auf Grundlage Radialer Basisfunktionen zur Bestimmung lokaler Formabweichungen untersucht. Im Vordergrund steht die

Auswahl einer geeigneten Kombination von Basisfunktion und Approximationsverfahren zur Toleranzprüfung an fertigungstechnisch hergestellten Oberflächen mit einem hohen Anspruch an die geometrische Oberflächengüte.

Zum Nachweis der Anwendbarkeit des entwickelten Ansatzes wird die Vorgehensweise zur Messsystemanalyse aus der industriellen Fertigung von Serienprodukten adaptiert und anhand von Messfähigkeitskennwerten die Wiederholpräzision eines terrestrischen Laserscanners nachgewiesen. Auf Grundlage der Ergebnisse kann das Potential terrestrischer Laserscanner für Präzisionsmessungen bei der flächenhaften Bewertung von Objekten quantifiziert werden.

Abstract

In the field of surveying, terrestrial laser scanners are a conventional measuring system for a fast and comprehensive 3D digitalization of objects. In addition, the advantages of the measurement method offer enormous potential for application in the industrial production of large structures. The tasks from the quality assurance area, the control of production processes or the online programming of automation systems during one-off production can be implemented quickly, efficiently and objectively by using contactless scanning technology. However, the efforts to standardise uncertain data and test methods mainly originate from the surveying community and the return to a discrete point for the assessment of a 3D point accuracy as a complete specification on precision. From the point of view of the manufacturing technology, the suitability of a measuring system and the measuring process for a measurement task within an object-related reference system is of primary importance.

This thesis presents an application-related approach to the data quality of terrestrial laser scanners. Contour accuracy of the structures plays a vital role in the analysis of shapes of freeform surfaces. Manufacturer's specifications describing this property, such as, for example, the accuracy of modelling, have however largely disappeared from the specifications. Using this information, the actual nature of the systems, the areal description of surfaces with a multiplicity of points, is expressed.

For use in the industrial environment, the determination of systematic measurement deviations is a fundamental component for indicating characteristic-specific measurement uncertainties. The mere comparison of characteristic values against the specification is not sufficient to represent the potential accuracy of terrestrial laser scanners. This thesis aims to provide a comprehensive assessment of the system as the basis for the indication of a testable surface tolerance. A method for the evaluation of systematically acting effects will be derived from the experimental investigation of the dimensional stability of different phase comparison scanners and the analysis of previously proposed characteristic values.

While in the case of point-measuring systems random deviations can be reduced by repeat measurements and averaging. For scanning systems a reduction can be achieved by suitable surface modelling. In this study, two methods based on radial basis functions will be investigated to determine the local deviation of shapes. The selection of suitable combination of a basic function and approximation methods for testing tolerance on surfaces produced with manufacturing technology with a high demand on geometric surface quality will be in the foreground. In order to demonstrate the applicability of the

developed approach, the procedure for measuring system analysis from the industrial production of series products will be adapted. The repeatability of a terrestrial laser scanner will be demonstrated on the basis of measurement capability characteristics. On the basis of the results, the potential of terrestrial laser scanners for precision measurements can be quantified in the extensive evaluation of objects.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **7**
1.1 Motivation und Zielstellung 7
1.2 Gliederung der Arbeit 9

2 Laserscanning von Großstrukturen **11**
2.1 Industrielle Messtechnik 11
2.1.1 Bedeutung der flächenhaften Objekterfassung 11
2.1.2 3D-Oberflächenerfassung an Großstrukturen 13
2.1.3 Grundlage der geometrischen Tolerierung 15
2.2 Aufbau und Funktionsprinzip TLS 19
2.2.1 Messprinzip 20
2.2.2 TLS-Systeme für industrielle Anwendungen 20
2.2.3 Phasenvergleichsverfahren 22
2.2.4 Strahlablenksystem für TLS mit rotierendem Spiegel 24
2.2.5 Steuerungseinheit 24
2.3 Bewertung der Qualität einer TLS-Messung 25
2.3.1 Qualitätsmerkmale einer TLS-Messung 25
2.3.2 Störeinflüsse bei der Erfassung geometrischer Strukturen 26
2.3.3 Prüfverfahren für TLS-Systeme 30
2.3.4 Bewertung der Prüfkörper 32
2.4 Datenstrukturierung und mathematische Modellierung 34
2.4.1 Einpassung von Formelementen unter Zwang 36
2.4.2 Geometriebezogene Datenmodellierung mittels lokaler Ebenen . 37
2.4.3 Geometriebezogene Datenmodellierung mittels Freiformflächen . 39
2.5 Defizite bei der Bewertung beliebig gekrümmter Oberflächen 43
2.5.1 Instrumentenprüfung terrestrischer Laserscanner 43
2.5.2 Flächenhafte Analysen zur Toleranzprüfung 44

3 Formanalyse **47**
3.1 Örtliche Formabweichung als Prüfmerkmal 48
3.1.1 Definition der Messgröße 48
3.1.2 Messunsicherheit der örtlichen Formabweichung 50
3.1.3 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen 53
3.2 Relevante Arbeiten und eigene Untersuchungen 56
3.2.1 Laboruntersuchung Auftreffwinkel 57
3.2.2 Untersuchung Farbgebung 61
3.2.3 Auswirkungen auf die Formanalyse 62
3.3 Experimentelles Verfahren zur Unsicherheitsermittlung 63

4 Anwendungsspezifische Untersuchung terrestrischer Laserscanner 65
4.1 Prüfverfahren . . . 66
4.1.1 Versuchsanordnung und -bedingungen . . . 67
4.1.2 Analyse von Kenngrößen für TLS . . . 68
4.1.3 Beurteilung der Ergebnisse und Fazit . . . 73
4.2 Analyse der Formtreue . . . 74
4.2.1 Vorgehen zur Ermittlung systematischer Abweichungen . . . 74
4.2.2 Splinefilter zur Trennung der Abweichungsarten . . . 75
4.2.3 Ermittlung des Glättungsparameters . . . 78
4.3 Beurteilung der untersuchten TLS-Systeme . . . 80
4.4 Entwurf eines Prüfkörpers und einer Prüfmethodik . . . 85
4.4.1 Aufbau eines Prüfkörpers zur Bestimmung der Formtreue . . . 85
4.4.2 Prüfablauf . . . 86
4.4.3 Kenngrößen . . . 87
4.4.4 Anwendungsbereich . . . 88

5 Lokale Approximation zur Bestimmung der Formabweichungen 91
5.1 Maßnahmen zur Verringerung der Messunsicherheit . . . 92
5.2 Methodischer Ansatz zur lokalen Approximation . . . 93
5.2.1 Shepard-Methode . . . 94
5.2.2 Radiale Basisfunktionen . . . 94
5.2.3 RBF-Approximation . . . 96
5.2.4 Moving Least Square . . . 98
5.2.5 Kreuzvalidierung zur Schätzung der unbekannten Parameter . . . 100
5.3 Numerische Untersuchung zum Nachweis der Approximationsfähigkeit . 101
5.3.1 Ansatzfunktionen und Vorgehensweise . . . 102
5.3.2 Experimentelle Untersuchung des Approximationsabweichung . 103
5.3.3 Verhalten bei Messrauschen . . . 107
5.3.4 Ergebnisse und Vergleich der Approximationsmethoden . . . 111

6 Umsetzung und Realisierung an einer exemplarischen Großstruktur 115
6.1 Anwendung am Beispiel von Schiffspropellern . . . 115
6.2 Toleranzprüfung eines Propellerflügels . . . 115
6.3 Messfähigkeitsanalyse . . . 116
6.4 Analyse der Ergebnisse . . . 119

7 Fazit und Ausblick 123

Tabellenverzeichnis 125

Abbildungsverzeichnis 128

Literatur 131

1 Einleitung

Terrestrische Laserscanner liefern dem Anwender 3D-Koordinaten von Punkten, die die Oberfläche eines Objektes beschreiben. Die Berechnung der 3D-Koordinaten erfolgt bei allen Scansystemen geräteintern. Neben der reinen Umrechnung der gemessenen Polarelemente in kartesische Koordinaten werden von der Scannersoftware diverse Korrekturen angebracht, die vom Nutzer in der Regel nicht einsehbar sind [Eling, 2009]. Im Zusammenhang mit Laserscannern wird aus diesem Grunde oftmals von einem Black-Box-System gesprochen. Für die Anwender sind jedoch Aussagen zur Funktionsfähigkeit und Genauigkeit der eingesetzten Instrumente unerlässlich. Für die Angabe von Messunsicherheiten abgeleiteter geometrischer Größen ist die Trennung zwischen zufälligen und systematischen Abweichungen ein grundlegender Bestandteil. Dabei kann die Messunsicherheit am Objekt sehr viel höher sein als die Unsicherheit der Einzelpunkte, wie zum Beispiel bei der Ermittlung des Radius einer Kugel. Sie kann aber auch geringer sein, zum Beispiel für die Lage eines interpolierten Punktes auf einer sehr unregelmäßigen Oberfläche, die nur mit einem groben Raster erfasst wurde [Böhler et al., 2004].

1.1 Motivation und Zielstellung

Für die Anwendung im Bereich der Fertigungstechnik spielen objektbezogene Genauigkeitsmaße eine wesentlich größere Rolle, als in der klassischen geodätischen Betrachtungsweise, bei der die 3D-Punktgenauigkeit im Vordergrund steht. Die Herangehensweise der Koordinatenmesstechnik ermöglicht es Messgeräte entsprechend der geforderten Messanwendung zu bewerten und einzusetzen. So kann ein Messgerät mit schlechter Linearität durchaus für anspruchsvolle Aufgaben eingesetzt werden, wenn es sich lediglich um Relativmessungen in einem begrenzten Teil des Messvolumens handelt. Voraussetzung ist ein genügendes Auflösungsvermögen und eine gute Reproduzierbarkeit bzw. hohe Präzision der Ergebnisse. Ist lediglich eine globale Genauigkeit bekannt, ist der Einsatz des Messgerätes für viele Anwendungen nicht vertretbar [Hennes, 2007b].

Im geodätischen Bereich haben sich terrestrische Laserscanner (TLS) in den letzten Jahren zu einem etablierten Messmittel entwickelt. Für die Betrachtungen der Genauigkeit der Systeme existieren mittlerweile eine Vielzahl von Forschungsarbeiten, die sowohl

zum Verständnis der Geräte als auch zu Ansätzen der stochastischen Modellierung der entsprechenden Unsicherheiten beigetragen haben.

Für den Einsatz in der industriellen Messtechnik unter den Gesichtspunkten der objektbezogenen Bewertung und der Beurteilung der Messsystemeignung für spezielle Aufgabenstellungen soll in dieser Arbeit ein alternativer Ansatz zur Beurteilung der Qualität der Messdaten eines terrestrischen Laserscanners aufgezeigt werden. Ziel ist es, die Eignung von TLS-Systemen für die Formanalyse bei der Produktion großer industriell gefertigter Strukturen nachzuweisen, die Akzeptanz der Geräte zu erhöhen und eine realistische Beurteilung der Messunsicherheit von Formabweichungen einschließlich systematisch wirkender Effekte zu ermöglichen. Dabei soll ein Ansatz zur Reduzierung der verbleibenden zufälligen Abweichungen bei der Formprüfung von Freiformflächen entwickelt werden, durch den das Genauigkeitspotential der Geräte für Aufgaben mit hohen Anforderungen an die Präzision erschlossen wird.

Die Systeme sind derzeit nahezu alternativlos bei der schnellen, umfassenden und objektivierten Digitalisierung von Großstrukturen. Für den kleinvolumigen Bereich existieren hingegen eine Vielzahl von unterschiedlichen Messsystemen, wie z. B. Streifenlichtprojektoren, Handscanner oder stationäre Triangulationsscanner. Das begrenzte Messvolumen kann zwar durch externe Referenzierung erhöht werden, für die hohen Anforderungen der Fertigungsumgebung in Bezug auf Geschwindigkeit, Mobilität und Robustheit sind die Systeme dennoch nur unzureichend geeignet.

Für die Qualitätssicherung, die Steuerung von Fertigungsprozessen, der Vorfertigungsunterstützung oder das Reverse Engineering gelten im Schiffbau, der Windkraftindustrie, dem Flugzeug- oder dem Schienenfahrzeugbau dieselben Trends der Produktionstechnik und daraus abgeleiteten Anforderungen an die Messtechnik (siehe Abbildung 1.1), wie in anderen Fertigungsbereichen auch.

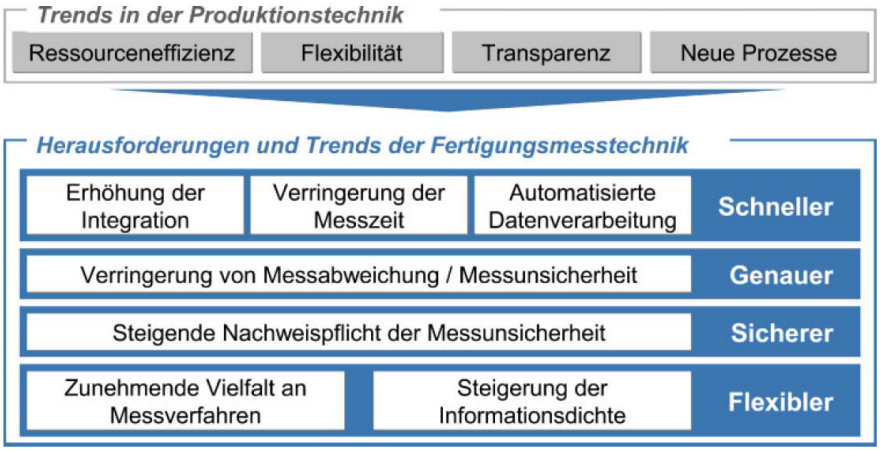


Abbildung 1.1: Anforderungen an die Messtechnik abgeleitet aus „Roadmap der Fertigungsmesstechnik 2020“ [Imkamp et al., 2012]

In Bezug auf die Schnelligkeit können TLS-Systeme bereits heute mit sehr hohen Erfassungsgeschwindigkeiten aufwarten. Die Flexibilität wird sogar noch weiter durch die Entwicklung kinematischer Laserscansysteme zunehmen, wie sie z. B. durch Ehm et al., [2012] beschrieben wird. Den beiden Anforderungen der Genauigkeit durch Verringerung der Messabweichungen und der Sicherheit durch den Nachweis der Messunsicherheit soll sich diese Arbeit schwerpunktmäßig bei stationären TLS-Systemen widmen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Zum Beginn der Arbeit gibt das Kapitel 2 einen Überblick über die Bedeutung von TLS-Systemen zur Oberflächenerfassung im industriellen Bereich und die anzuwendende Vorgehensweise zur Tolerierung von Bauteilen. Anschließend wird auf den Stand der Technik bezüglich der Funktionsweise, der Bewertung der Qualität, Prüfverfahren und die Möglichkeiten der Reduzierung von Messunsicherheiten durch Modellierung der Oberfläche bei der Anwendung von TLS-Systemen eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels werden die derzeitigen Defizite für die Bewertung der Eignung der Messsysteme zur flächenhaften Prüfung von Oberflächen aufgezeigt. Dabei werden die Schwerpunkte dieser Arbeit dargestellt. Zum einen gilt es ein Prüfverfahren für eine merkmalsspezifische flächenhafte Beurteilung der Systeme zu entwickeln. Zum anderen sollen Verfahren zur Bestimmung von Formabweichungen an technischen Strukturen auf Basis einer räumlichen Filterung untersucht werden.

Bevor detailliert auf diese Schwerpunkte eingegangen wird, steht im Kapitel 3 die Definition der Messaufgabe im Vordergrund. Bei der Formanalyse ist das Ziel, die Abweichungen eines Bauteils von einer vorgegebenen Soll-Form zu bestimmen. Die Ermittlung der Unsicherheit einer Messgröße ist dabei von zentraler Bedeutung. Nur bei Kenntnis und quantitativer Beschreibung der zufälligen und systematischen Abweichungen kann eine Konformitätsbewertung der Spezifikation eines Bauteiles vorgenommen werden.

Im Kapitel 4 erfolgt eine Bestimmung der merkmalsspezifischen Messunsicherheit verschiedener Phasenvergleichsscanner in Anlehnung an die DIN 14253 „Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen“. Im Gegensatz zur geodätischen Betrachtungsweise, der Ermittlung einer 3D-Punktgenauigkeit, wird ein Verfahren zur Beurteilung der Fähigkeit eines Laserscanners zur Abbildung der tatsächlichen Form dargestellt. Aus den ermittelten Unsicherheitsbeiträgen kann die minimal prüfbare Flächentoleranz der geprüften Geräte als Bewertungskriterium für flächenhafte Messsysteme abgeleitet werden.

Diese Kenngröße berücksichtigt systematische und zufällige Effekte. Die zufälligen Abweichungen lassen sich durch eine geeignete Modellierung reduzieren. In Kapitel 5 werden zwei lineare Glättungsverfahren zur Beschreibung lokaler Konturverläufe vorgestellt.

Die Methoden beruhen auf der Verwendung Radialer Basisfunktionen zur Beschreibung von harmonischen Oberflächen und dienen als Basis für eine räumliche Filterung der Messdaten. Es erfolgt eine Untersuchung der Leistungsfähigkeit sowie der Einflussgrößen bei der Bestimmung örtlicher Formabweichungen.

Im Kapitel 6 wird die Eignung eines TLS in Kombination mit den Filterungsverfahren zur Formprüfung anhand einer exemplarischen Großstruktur nachgewiesen. Die Bewertung von geodätischen Messsystemen mit Messmittelfähigkeitsindizes unter Einbeziehung des Messprozesses wird bereits von Hennes, [2007a] angeregt und ist in der Fertigungstechnik ein anerkanntes Hilfsmittel zur Bewertung der Prüfmittelfähigkeit. Die Vorgehensweise wird aufgenommen und auf ein scannendes System angewendet.

Kapitel 7 fasst die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf sowie offene Punkte für folgende Arbeiten.

2 Laserscanning von Großstrukturen

In diesem Kapitel sollen einige grundlegende Erläuterungen zum Einsatz von terrestrischen Laserscannern für die Erfassung industriell gefertigter Großstrukturen erfolgen und ein Überblick zum Stand der Technik gegeben werden.

2.1 Industrielle Messtechnik

Die Industrievermessung stellt ein Spezialgebiet der Ingenieurgeodäsie mit Messaufgaben höchster Präzision im Nahbereich dar [Möser, 2007]. In der Fertigung von Produkten, die aus Sicht des Maschinenbaus den großvolumigen Bauteilen zuzuordnen sind, können die traditionellen Messtechniken der Fertigungsmesstechnik aufgrund der Bauteilgröße den Anforderungen nicht gerecht werden. In diesem Bereich haben sich geodätische Messprinzipien etabliert. Das klassische Beispiel ist der Lasertracker, der mit einem Messbereich bis zu 80 m ein anerkanntes Prüfmittel in der Fertigung von Großstrukturen aus dem Bereich des Flugzeugbaus, der Windkraftindustrie, dem Schienenfahrzeugbau sowie dem Schiffbau ist. Die Anwendung des aus der Geodäsie bekannten polaren Messprinzips ermöglicht es, das Wesen der Koordinatenmesstechnik, das punktweise Erfassen von Bauteiloberflächen und anschließenden Ermittlung von Prüfmerkmalen, im Bereich der Large-Volume-Metrology anzuwenden.

2.1.1 Bedeutung der flächenhaften Objekterfassung

Scannende Messsysteme lösen zunehmend die berührenden Messverfahren der Koordinatenmessmaschinen und Messarme in der Fertigungs- und Qualitätskontrolle bei kleinvolumigen Bauteilen ab. Wurden 1975 noch in 75 % der Unternehmen rein taktile Messgeräte eingesetzt, stieg der Anteil der scannenden Messsysteme 2003 bereits auf 41 % an [Bauer, 2005] und im Jahr 2007 auf 80 % [REORG, 2007]. Für den Nahbereich existieren eine Vielzahl von Digitalisierungsgeräten mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien. Hauptsächlich kommen Systeme auf Basis der Interferometrie, Musterprojektionsverfahren, Lasertriangulation oder die Deflektometrie für spiegelnde Oberflächen zum Einsatz. Mit zunehmender Objektgröße steigt der Aufwand bei der Digitalisierung aufgrund des eingeschränkten Messvolumens der Systeme an. Durch eine externe Referenzierung, z. B. das Tracking von handgeführten Scannern, wird es grundsätzlich möglich, große Messvolumen mit hoher Genauigkeit abzudecken. Für

Objekte, die zum Bereich der Large-Volume-Metrology zählen, übersteigt der Aufwand für eine flächenhafte Erfassung den Nutzen jedoch bei Weitem. Für diese Großstrukturen bieten terrestrische Laserscanner die Möglichkeit sehr große Bauteile schnell und umfassend zu digitalisieren. Anwendungsgebiete von Laserscannern im Industriebereich sind:

- Reverse Engineering
- Bereitstellung von as-built Informationen
- geometrische Qualitätskontrolle
- Steuerung von Fertigungsprozessen
- Formanalysen an Freiformflächen

Für die Anwendung geodätischer Messverfahren im Maschinenbau ergeben sich folgende Anforderungen (in Anlehnung an [Heunecke, 2014]):

- Schnelligkeit
- Messvolumen
- Mobilität, Flexibilität und Robustheit
- Online-Messdatenverarbeitung / Echtzeitauswertung
- Zuverlässigkeit der Ergebnisse

[Grewe, 2014] definiert zusätzlich die Flächenleistung als ein Kriterium zur Auswahl eines scannenden Messsystems für Anwendungen im Schiffbau. Anhand der Flächenleistung werden die Vorteile von TLS-Systemen im Industriebereich und typische Objektgrößen deutlich (siehe Abbildung 2.1). Die Flächenleistung, Robustheit und Mobilität sind die

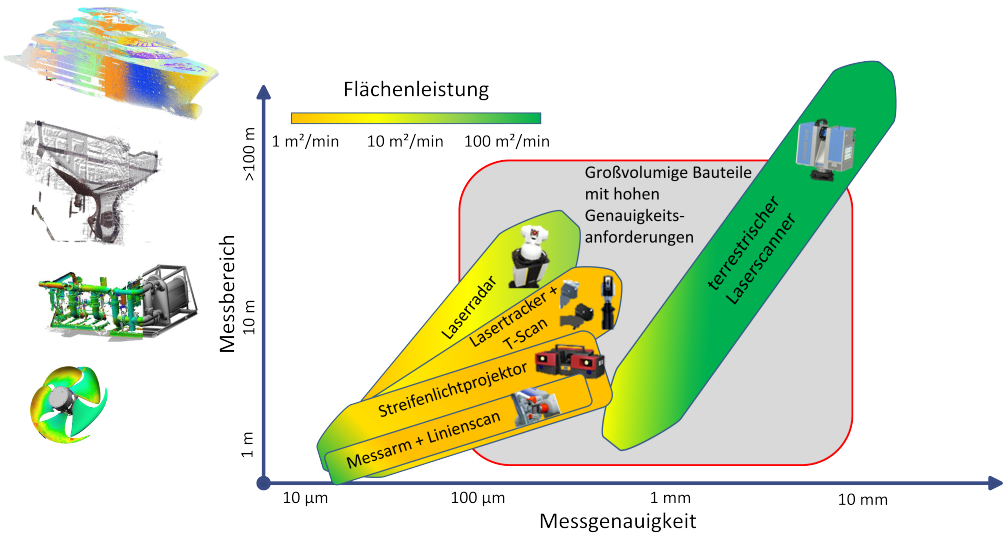


Abbildung 2.1: Flächenleistung berührungsloser Messsysteme im Vergleich

großen Vorteile von TLS-Systemen. Die Datenverarbeitung und Zuverlässigkeit sind nach wie vor aktuelle Forschungsgebiete.

2.1.2 3D-Oberflächenerfassung an Großstrukturen

Bei der Fertigung geometrisch definierter Bauteile kommt es darauf an, konstruktive Vorgaben innerhalb gegebener Grenzen einzuhalten. Zur Ermittlung solcher Abweichungen stellt die industrielle Messtechnik Messverfahren und Messmittel zur Verfügung [Löffler et al., 2002]. Insbesondere in der Produktion komplexer Bauteile kommen zunehmend dreidimensional messende Systeme zum Einsatz. Sie bieten die Möglichkeit, Objekte mit einer wesentlich höheren Informationsdichte zu erfassen, ohne die Messpunkte in spezieller Art signalisieren zu müssen. Darüber hinaus können wesentlich detailliertere Analysen der Oberflächengestalt durchgeführt werden. Die Abweichungen von der geometrisch idealen Form werden als Formabweichungen bezeichnet [Klein et al., 2001]. Abbildung 2.2 zeigt schematisch die wesentlich höhere Informationsdichte bei der Erfassung einer Kugel. Durch den Einsatz scannender Messsysteme wird es möglich, nicht nur die geometrischen Formparameter, wie z. B. den Radius der Kugel, zu bestimmen, sondern auch lokale Formabweichungen flächenhaft zu bewerten.

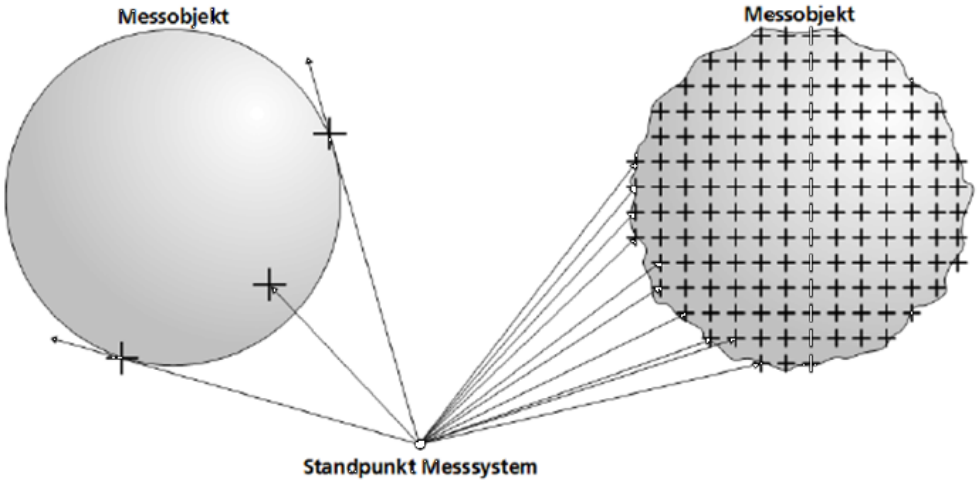


Abbildung 2.2: Prinzip der flächenhaften Objekterfassung [Manske, 2012]

Entwicklungen im Bereich der Fertigungstechnik sind gekennzeichnet durch ständig wachsende Anforderungen an die Funktionstauglichkeit der gefertigten Produkte. Die Folge sind kleinere Fertigungstoleranzen, welche direkt durch die Abweichungen der Oberfläche von ihrer Sollgestalt bestimmt sind [T. Pfeifer et al., 1981]. Für aerodynamisch oder hydrodynamische optimierte Bauteile haben Formabweichungen einen direkten Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Bauteiles oder nachgelagerte Prozesse bei denen das Oberflächenfinish durch Materialab- bzw. -auftrag hergestellt wird. Beim

Einsatz von 3D-Messverfahren müssen entsprechend nicht nur Maßabweichungen sondern auch die Formabweichungen der Funktionsflächen mit steigenden Anforderungen an die Genauigkeit erfasst werden.

Schnelle, berührungslose Messverfahren bieten einerseits die Möglichkeit einer umfassenden Qualitätskontrolle, anderseits wird es möglich, fertigungsnah die Oberflächen zu bewerten. Durch das frühzeitige Erkennen von Formabweichungen wie Beulen, Dellen und Welligkeiten können Fertigungsprozesse gesteuert oder as-built Informationen generiert werden. Zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messsysteme im Kunden-/Lieferanten-Verhältnis und zur Rückführung der ermittelten Abweichungen in den Produktionsprozess sind Aussagen über Bauteilabweichungen in den meisten Anwendungen an definierten Bezugstellen zu ermitteln.

Grewe et al., [2012] beschreiben den Einsatz von TLS zur Spachtelsimulation an Megayachten. Durch die Digitalisierung des Schiffsrumpfes wird es möglich, die aufzutragende Spachtelschicht zur Herstellung einer optisch anmutigen Oberfläche durch die Modellierung einer optimierten Solloberfläche vorherzusagen. Die Vorgabe an den Applikateur erfolgt in einem fest definierten Raster. Aufgrund des extrem engen Zeitfensters für die Vermessung und den rauhen Umgebungsbedingungen im Schiffbau wurden TLS-Systeme zur Datenbereitstellung gewählt.

Geist et al., [2013] beschreiben die mögliche Anwendung von TLS-Systemen zur Qualitätskontrolle an Schiffspropellern bis 10 m Objektgröße. Mit den gegenwärtig verwendeten Nahbereichsdigitalisierungsgeräten können zwar hohe Genauigkeiten erzielt werden, die Prüfung der Bauteile an den durch Normen vorgegebenen Prüfpunkten stellt jedoch einen enormen Zeit- und Prüfaufwand dar. Weitere Anwendungsbeispiele zum Erfassen großvolumiger Bauteile sind:

- Reverse Engineering von unbekannten Flächenverläufen [Grewe et al., 2014],
- Erfassung der Ist-Geometrie von Schiffen für Retrofit-Maßnahmen [Ehm et al., 2014],
- Geometrie- und Lageüberprüfung von Rotorblättern [Grewe et al., 2010],
- Digitalisierung von Gezeitenkraftwerken [Lichtenberger, 2014],
- Rumpferfassung im Flugzeug [Lichtenberger, 2014].

Das grundsätzliche Ziel des Einsatzes von TLS liegt bei den genannten Anwendungen in der Beurteilung und Bewertung fertigungstechnisch erzeugter Oberflächen, die einen harmonischen Flächenverlauf aufweisen. Bei der Fertigung der geometrisch definierten Bauteile kommt es darauf an, Vorgaben der Konstruktion, Normen bzw. Spezifikationen innerhalb der gegebenen Grenzen einzuhalten. Diese Grenzen sind durch eine Toleranz spezifiziert. Die Regel zur Prüfung von Toleranzen richtet sich nach den Grundprinzipien der Koordinatenmesstechnik.

2.1.3 Grundlage der geometrischen Tolerierung

Unter Koordinatenmesstechnik wird ein universelles Messverfahren verstanden. Dabei wird eine Bauteiloberfläche in einem definierten Koordinatensystem punktweise erfasst. Die Messpunkte dienen als Grundlage für die Ermittlung von Prüfmerkmalen. Sie werden mathematisch miteinander verknüpft und einem Geometrieelement zugeordnet. Das geometrisch ideale Element dient als Bezug zur Berechnung von Form- und Lageabweichungen [Keferstein et al., 2008]. Das Grundprinzip der punktweisen Abtastung der realen Flächenelemente eines Bauteils und anschließenden Datenauswertung ist in Abbildung 2.3 dargestellt. *Lageabweichungen* sind definiert als Abweichungen eines

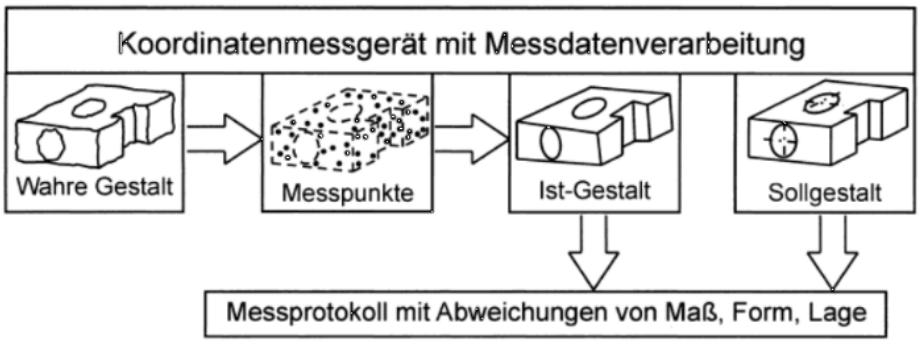


Abbildung 2.3: Grundprinzip der Koordinatenmesstechnik [Keferstein et al., 2008]

Formelementes von der idealen Lage zu einem oder mehreren anderen Formelementen [Klein et al., 2001]. Neben Maßen und Toleranzen haben auch die Gestaltparameter Form und Lage einen entscheidenden Einfluss auf die Funktion eines mechanisch gefertigten Bauteils [Westkämper et al., 2002]. Abbildung 2.4 gibt einen Überblick über die allgemeine Einteilung der Gestaltabweichungen von Werkstücken.

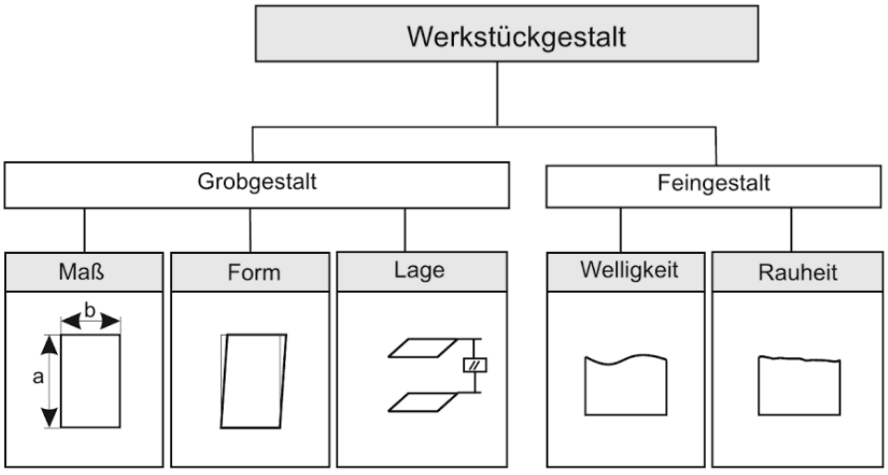


Abbildung 2.4: Gestaltparameter von Werkstücken [Hehenberger, 2011]

Formabweichungen beschreiben die Grobgestalt eines Bauteils und sind Gestaltsabweichungen 1. Ordnung. Die Erfassung einer Oberfläche beinhaltet immer eine Überlagerung von Gestaltabweichungen (siehe Abbildung 2.5).

Abbildung 2.5: Einteilung der Gestaltabweichungen nach DIN 4760 [Hartmann, 2015]

Um ein Bauteil zu beschreiben, ist die Form und Beschaffenheit der Oberfläche des Objektes von entscheidender Bedeutung. Aus fertigungstechnischen Gründen weicht die Oberfläche stets von der idealen Form ab. Um die Funktionsfähigkeit eines Bauteils zu beurteilen und einen wirtschaftlichen Fertigungsprozess zu ermöglichen, ist es notwendig, diese Abweichungen zu spezifizieren. Aus diesem Grund werden Form- und Lagetoleranzen vorgeschrieben. Lagetoleranzen werden aus Formtoleranzen, die wiederum Formabweichungen beinhalten, abgeleitet.

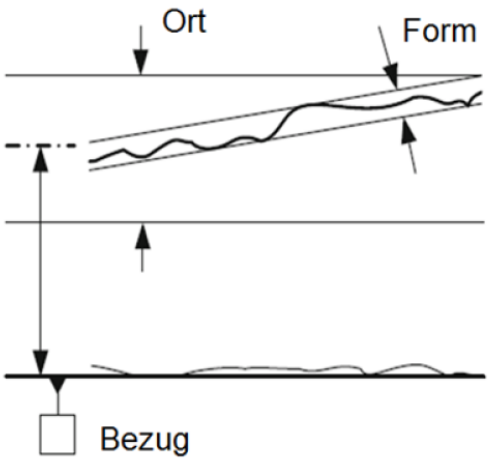
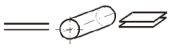


Abbildung 2.6: Definition der Formabweichungen [Gröger, 2013]

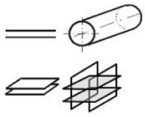
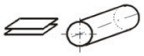
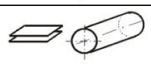
Formtoleranzen begrenzen die Formabweichungen eines Geometrieelementes gegenüber seiner idealen Gestalt (siehe Abbildung 2.6). Die Toleranzart hat keinen Bezug. Der Ort und die Richtung der Toleranzzone im Raum sind nicht festgelegt.

Formtoleranzen

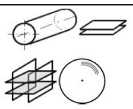
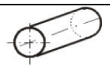
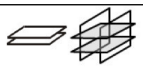
Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Gradheit	–		Gerade, Ebene, Zylinder (Mantellinie, zentrale Linie)
Ebenheit	▱		Ebene
Rundheit	○		Kreis, Zylinder, Kegel
Zylindrizität	⌭		Zylinder
Profil einer beliebigen Linie	⌒		Kante, Radius, Kugelausschnitt, Freiformfläche
Profil einer beliebigen Fläche	⌓		Kante, Radius, Halbkugel, Freiformfläche

(a) Formtoleranzen

Richtungstoleranzen

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Parallelität	//		Ebene, Zylinder (Mantellinie, zentrale Linie)
Rechtwinkligkeit	⊥		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie)
Neigung	∠		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie)

Ortstoleranzen

Toleranzart	Symbol	Toleranzzonen	Anwendung für
Position	⌖		Ebene (zentrale Linie), Zylinder (zentrale Linie), Kugel (zentraler Punkt)
Konzentrizität	◎		Zylinder (zentraler Punkt)
Koaxialität	◎		Zylinder (zentrale Linie)
Symmetrie	⌯		Ebene (zentrale Linie)

(b) Lagetoleranzen

Abbildung 2.7: Übersicht der Toleranzarten [Gröger, 2013]

Zu den Formtoleranzen gehören die in der Abbildung 2.7 aufgelisteten Toleranzarten. Die *Toleranzzone* beschreibt dabei den Bereich, innerhalb dessen alle Punkte eines Geometrieelementes liegen müssen [Henzold, 2011]. Aufgabe der Messtechnik ist es, die Messpunkte mit der erforderlichen Genauigkeit zu erfassen [Bäumker, 2010]. Form- und Lagetoleranzen sind Bestandteil der international gültigen Systeme der geometrischen Produktspezifikation und –verifikation. Merkmale der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) dienen der Definition von Abweichungen und Abmessungen der Geometrieelemente. Diese Merkmale sollen es ermöglichen, dass alle individuellen geometrischen Merkmale festgelegt werden können. Die Abweichungen werden bezüglich idealer Geometrieelemente definiert [Gröger, 2013]. Die DIN 14253,Teil 1 ist Teil des GPS-Systems und fordert die Berücksichtigung der Messunsicherheit bei der Konformitätsprüfung. Das bedeutet, dass die spezifizierte Toleranzbreite T aufgrund der erweiterten Messunsicherheit U in einem Intervall $[T-U;T+U]$ eingeschränkt wird. In diesem Bereich kann keine Aussage zur Konformität getroffen werden. Der Übereinstimmungsbereich verringert sich um die doppelte erweiterte Messunsicherheit. Die Messunsicherheit führt zu einer Verkleinerung der prüfbaren Toleranz (siehe Abbildung 2.8) [Krämer et al., 2010].

Werden Messunsicherheiten überschätzt, führt dies zu unnötigen Einschränkungen des Übereinstimmungsbereiches. Die Folgen sind eine Verringerung der Streubreite, die für

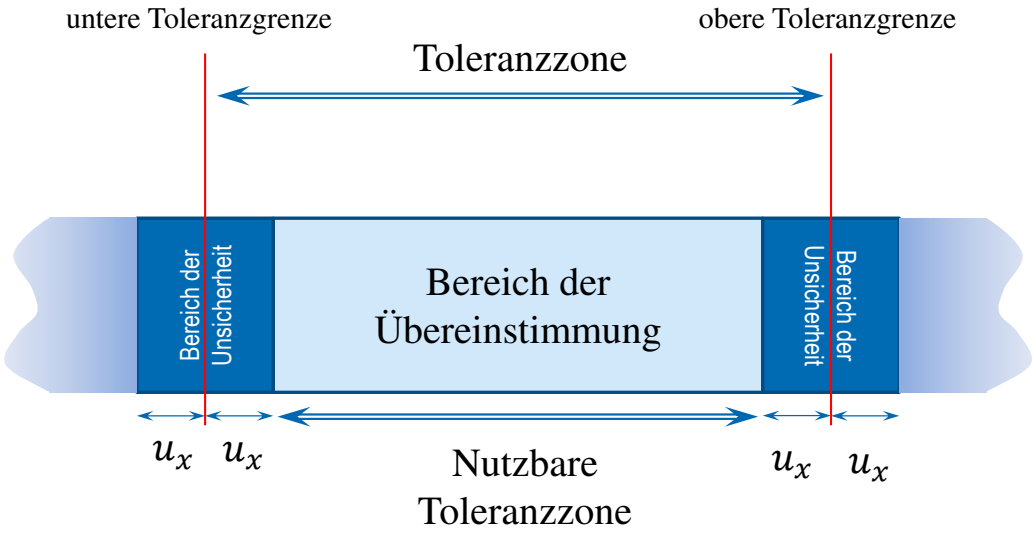


Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Toleranz und Messunsicherheit

den Fertigungsprozess gewährt wird, oder eine Erhöhung der Prüfkosten [Keferstein et al., 2008]. Für die praktische Anwendung ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein bestmöglicher Kompromiss zwischen Genauigkeit der Messmittel und Prüfkosten anzustreben [Weckenmann et al., 2008].

Die Ermittlung der Messpunkte zur Bestimmung der Form- und Lageabweichungen erfolgt in der Regel in einem sensorbasierten Koordinatensystem und muss durch entsprechende Transformation in das Bauteilkoordinatensystem überführt werden. Die Bestimmung der Form- und Lageabweichungen erfolgt anschließend objektbezogen. In Abbildung 2.9 sind beispielhaft mögliche Lagerungen von Koordinatensystemen dargestellt. Aus den gemessenen Datenpunkten werden die Formparameter, der Ursprung

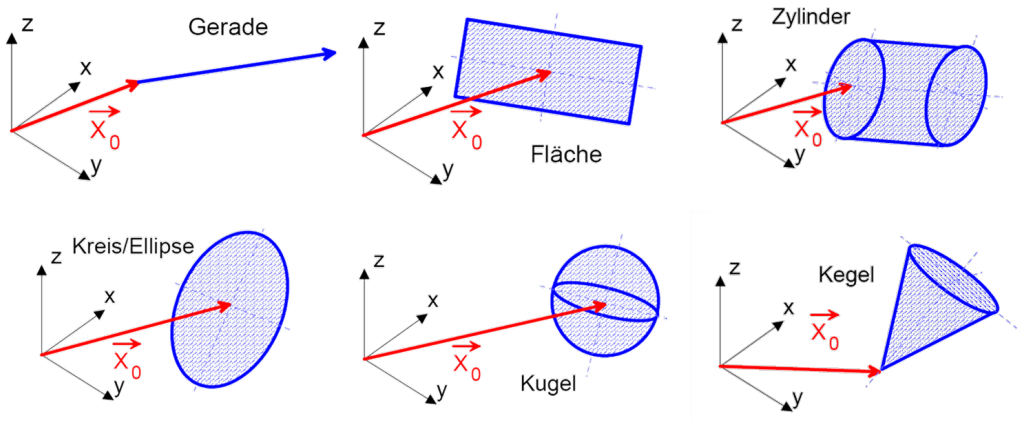


Abbildung 2.9: Lagerung von Objektkoordinatensystemen [Bäumker, 2010]

(Lagerung), die Verschiebung und die Orientierung berechnet. Dies erfolgt insbesondere bei scannenden Systemen im Rahmen der Ausgleichsrechnung für Bezugsgeometrien. Die Verbesserungen können dann gleichzeitig als Formabweichungen interpretiert werden [Bäumker, 2010]. In den Verbesserungen sind Formabweichungen enthalten, die durch den Fertigungsprozess bedingt sind sowie systematische und zufällige Abweichungen aufgrund des Messprozesses.

Die Auswahl der Prüfmittel für eine spezifische Aufgabenstellung erfolgt im Rahmen der Prüfmittelauswahl und ist Teil des Prüfmittelplanungsprozesses. In der Fertigungstechnik steht dabei die merkmalsbezogene Prüfprozesseignung im Vordergrund. Um Aussagen darüber treffen zu können, inwieweit mit dem Prüfmittel die betreffenden Qualitätsmerkmale überwacht werden können, müssen Prüfmittelfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden [Masing et al., 2014]. Die Prüfmittelüberwachung stellt sicher, dass die Eignung der Prüfmittel für das jeweilige Prüfverfahren erhalten bleibt. Für die Prüfung und den Nachweis von Formabweichung als Qualitätsmerkmal steht die Formtreue der verwendeten Messmittel im Vordergrund. Wird z. B. nur ein kleiner Teil des Messvolumens eines Sensors genutzt, kann auch ein Sensor mit einem großen Linearitätsfehler gute Ergebnisse liefern. Lassen sich die benötigten Informationen nicht aus den physikalischen Randbedingungen sowie der Kenntnis der Funktionsweise der Systemkomponenten ableiten, sollten sie durch entsprechende gezielte Untersuchungen ermittelt werden [Hennes, 2010]. Grundlage bildet hierbei die DIN 14253 „Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messungen“, die eine Ermittlung der merkmalsspezifischen Messunsicherheit fordert.

Derzeitige Untersuchungen aus dem geodätischen Bereich konzentrieren sich hauptsächlich auf die Ermittlung einer 3D-Punktgenauigkeit oder untersuchen Systemkomponenten in Anlehnung an die vom Tachymeter bekannten Funktionsprinzipen. Von einigen Autoren wird in jüngster Vergangenheit bereits die mathematische Modellbildung zur Ermittlung von Kalibrierfunktionen hinterfragt. Eine vollständige Erklärung für systematische Abweichungen terrestrischer Laserscanner im Sinne einer ausreichenden Parametrisierung gibt es bisher noch nicht [Holst et al., 2014b].

2.2 Aufbau und Funktionsprinzip TLS

Terrestrische Laserscanner gehören zu den aktiven Sensorsystemen, die es ermöglichen den Ist-Zustand einzelner Objekte in Form von Oberflächenvermessungen hoch aufgelöst zu erfassen. Sie bestehen aus einer Kombination von Streckenmesseinheit, Strahlablenksystem und Steuerung [Mettenleiter et al., 2015].

2.2.1 Messprinzip

Laserscanner liefern eine dreidimensionale Abbildung auf Basis eines emittierten Laserlichtes, das vom zu erfassenden Objekt reflektiert wird. Aus Messung der Distanz zum Objekt und zwei räumlichen Winkeln wird eine 3D-Koordinate des Messpunktes berechnet. Im Gegensatz zu elektrooptischen Tachymetern können mit TLS-Systemen diskrete Punkte nicht gezielt beobachtet werden. Stattdessen wird die Umgebung mit einer hohen Geschwindigkeit rasterförmig abgetastet [Eling, 2009]. Das Ergebnis ist eine digitale dreidimensionale und punktförmige Beschreibung der Umgebung, die als Punktwolke bezeichnet wird. Die Punktverteilung auf der Oberfläche variiert in Abhängigkeit von der Entfernung und dem Auftreffwinkel (siehe Abbildung 2.10).

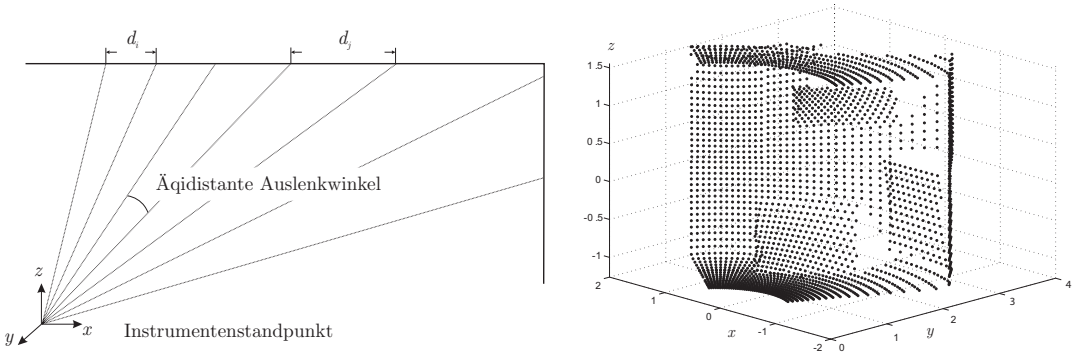


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der Punktverteilung von der Aufnahmekonfiguration [Rietdorf, 2005]

2.2.2 TLS-Systeme für industrielle Anwendungen

Für die Entfernungsmessung kommen drei Verfahren der elektrooptischen Distanzmessung zum Einsatz. Aus der Art der Streckenmessung ergibt sich das Einsatzgebiet und die Bauart der Geräte.

Dold, [2010] und Rietdorf, [2005] unterscheiden in:

- Triangulationsverfahren (Nahbereich - wenige cm bis ca. 2 m),
- Phasenvergleichsverfahren (mittlerer Entfernungsbereich - 2 m bis ca. 80 m),
- Impulslaufzeitverfahren (weiter Entfernungsbereich - 80 m bis ca. 2000 m).

Für Laserscanner, bei denen eine möglichst große Reichweite erzielt werden soll, kommt das Impulslaufzeitverfahren zum Einsatz. Die Strecke zum Objekt wird durch die Laufzeit eines ausgesendeten Lichtimpulses (oder Pulsfolge) und der Lichtgeschwindigkeit berechnet. Die Streckenmessung nach dem Triangulationsverfahren kommt insbesondere bei Nahbereichsscannern zum Einsatz. Der Entfernungsbereich ist auf Grund der

benötigten Basis zwischen Sender und Empfänger meist auf wenige Meter limitiert. Detaillierte Beschreibungen der Verfahren können u. a. in JOECKEL et al., [2008] nachgelesen werden. In den 90er Jahren gab es mit dem GS25 von Mensi Entwicklungen, das Messprinzip von Nahbereichsscannern auf bis 25 m zu erweitern und den Bereich der Großstrukturen für flächenhafte Präzisionsmessungen zu erschließen. Der entwickelte Scanner für mittlere Entfernungsbereiche konnte sich aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der starken Abhängigkeit der Unsicherheit von der Distanz nicht am Markt durchsetzen.

Nach derzeitigem Stand der Technik bieten nur Phasenvergleichsscanner Messgenauigkeiten und Entfernungsbereiche, die für industrielle Anwendungen in Betracht kommen. Unter anderem bewerben die Hersteller Faro, Trimble sowie Zoller+Fröhlich ihre Produkte speziell für den Einsatz in industriellen Umgebungen zur Erfassung großer Strukturen. Folgende Laserscanner standen exemplarisch zum Zeitpunkt der Entstehung der vorliegenden Arbeit zur Verfügung (siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Phasenvergleichsscanner für industrielle Anwendungen [Herstellerangaben laut Datenblatt]

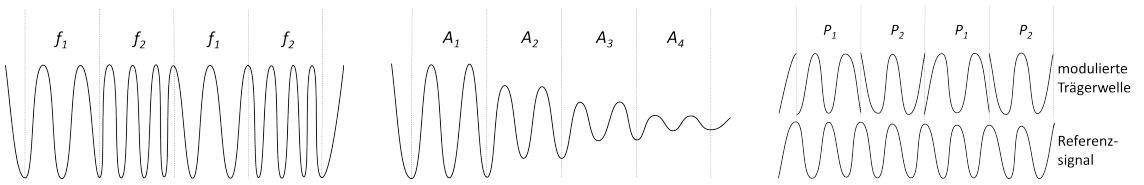
	Z+F 5010	**Faro Focus S120**	**Trimble FX**	**Leica HDS 6000**
Laserschutzklasse	1	3R	3R	3R
Wellenlänge	1500 nm	905 nm	690 nm	685 nm
Mindestentfernung	0.3 m	0.6 m	1.5 m	0.4 m
Auflösung Entfernungsmessung	0.1 mm	k.A.	k.A.	0.1 mm
Messrate	1.016.000 Pkt/s	976.000 Pkt/s	190.000 Pkt/s	500.000 Pkt/s
Entfernungsrauschen (ideal)	0.3 mm@10m 0.5 mm@25 m	0.6 mm@ 10 m 0.95 mm@25 m	0.6 mm@11 m single pass 0.4 mm@11 m double pass	2 mm@25 m 4 mm@50 m
Winkelgenauigkeit	0.007° v RMS 0.007° h RMS	k.A.	<30 arcsec	125 mrad v 125 mrad h
Winkelauflösung	0.0004° v 0.0002° h	0.009° v 0.009° h	8 sek	k.A.
Positions- bzw. Distanzgenauigkeit	Linearitätsfehler $\leq$ 1 mm	systematischer Distanzfehler $\pm$ 2 mm	Single point accuracy 0.4 mm@11 m 0.8 mm@21 m	Position 6 mm bis zu 25 m
Modellierte Oberflächengenauigkeit	k.A.	k.A.	k.A.	2 mm@25 m 4 mm@50 m

Aus Tabelle 2.1 sind die unterschiedlichen Genauigkeitsangaben der Hersteller ersichtlich. Alle Scanner arbeiten grundsätzlich nach dem gleichen Funktionsprinzip eines rotierenden Spiegels zur Strahlablenkung und der Nutzung des Phasenvergleichsverfahrens zur Streckenbestimmung. Diese Bauart wird im Allgemeinen als Panoramascanner bezeichnet und bietet ein fast vollständiges Sichtfeld von 360° horizontal und ca. ± 300° vertikal. Der Z+F Imager 5010 ist der erste kommerziell erhältliche Laserscanner mit der Laserschutzklasse 1 bei einer Wellenlänge von 1500 nm.

Bezüglich der Prüfung von Freiformflächen ist lediglich für den Leica HDS 6000 eine für die Anwendung spezifische Genauigkeit der modellierten Oberfläche angegeben, die für die Abschätzung einer Messunsicherheit herangezogen werden kann. Diese entspricht dem Entfernungsrauschen und einem Drittel der angegebenen Positionsgenauigkeit. Es ist also zu erwarten, dass eine realistische Ableitung der Messunsicherheit einer Formabweichung für eine gescannte Oberfläche im Bereich des Messrauschens und bei entsprechender Rauschreduktion unterhalb dieser Angaben liegt. Inwiefern sich die angegebenen Einzelpunktgenauigkeiten bzw. systematische Unsicherheitsangaben (Distanzfehler Faro Focus, Linearitätsfehler Z+F Imager 5010) der Streckenmessung auf die Oberflächenmodellierung auswirken, kann anhand der Spezifikationen nicht abgeschätzt werden.

2.2.3 Phasenvergleichsverfahren

Das Phasenvergleichsverfahren nutzt eine kontinuierlich ausgesendete Lichtwelle. Dem vom Sender ausgestrahlten Laserlicht wird ein periodisches Signal aufmoduliert. Die Modulation kann durch eine Amplituden-, Phasen- oder Frequenzmodulation (siehe Abbildung 2.11) erfolgen [Rietdorf, 2005]. Die Phasenlage der ausgestrahlten und emp-



(a) Frequenzmodulation (b) Amplitudenmodulation (c) Phasenmodulation

Abbildung 2.11: Grundprinzip der Modulation von Wellen

fangenen Welle wird in einem Phasenmesssystem bestimmt. Aus der Phasendifferenz und einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge kann die Strecke zum Objekt berechnet werden. Abhängig von der Frequenz des Modulationssignals und der ausgesendeten Energie ergibt sich ein maximaler Eindeutigkeitsbereich. Zur Bestimmung der Anzahl und zur Lösung der Mehrdeutigkeiten gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Eine Variante ist, dass sich bei konstanter Amplitude die Frequenz des Signals kontinuierlich ändert *(FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave)*. Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Überlagerung des Signals mit mehreren Modulationsfrequenzen. So kann

z. B. mit der Überlagerung zweier Sinussignale unterschiedlicher Frequenz ein Grobmaßstab und ein Feinmaßstab realisiert werden [Joeckel et al., 2008]. Mettenleiter et al., [2015] beschreiben das amplitudenbasierte Verfahren *(AMCW: Amplitude Modulated Continuous Wave)* bei dem das Signal des Lasers intensitätsmoduliert und zwei Sinussignale gleichzeitig genutzt werden (siehe Abbildung 2.12).

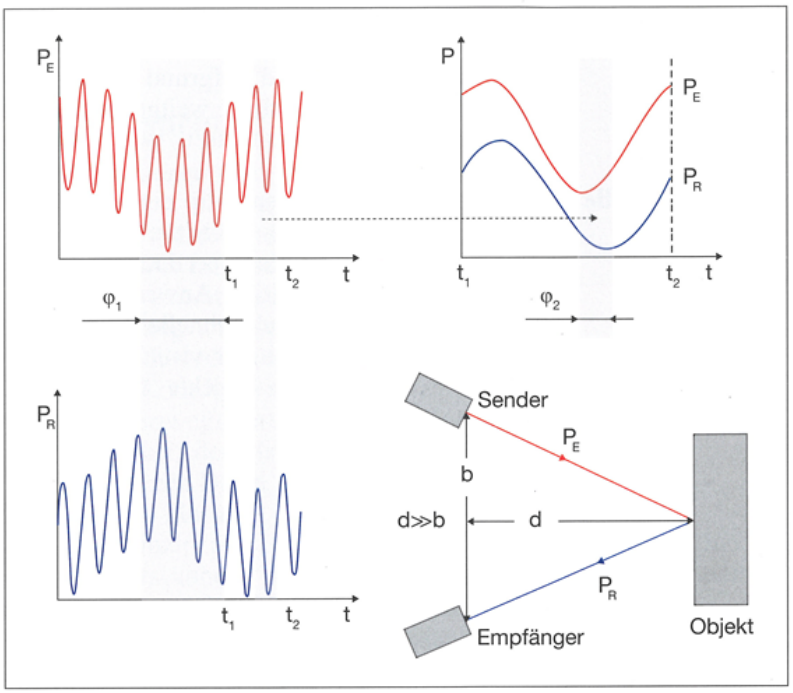


Abbildung 2.12: Zweifrequentes Phasendifferenzverfahren

Die beiden Phasenverschiebungen $\phi_1; \phi_2$ werden als intensitätsmodulierter Grob- und Feinmaßstab genutzt. Durch frequenzselektive Verrechnung ergibt sich eine eindeutige und präzise Entfernung [Fröhlich et al., 2015]. Die unterschiedlichen Möglichkeiten und Entwicklungen im Bereich der Entfernungsmessung führen zu größeren Reichweiten und zunehmend höheren Genauigkeiten bei einer komplexeren Signalverarbeitung. Restabweichungen des elektronischen Distanzmessers (EDM), bedingt durch die Signalabtastung, Nullpunktabweichungen oder Fehler in der Modulationsfrequenz, werden von den Herstellern ermittelt und bereits im EDM korrigiert. Es verbleiben, wie bei jeder Messung, unbekannte und/oder nicht korrigierbare systemische Abweichungen sowie zufällige Abweichungen. Die Abweichungen werden als Distanzrauschen bezeichnet. Das Entfernungsrauschen ist eine nicht-lineare Funktion von der Entfernung, der Reflektion des Objektes und der Umgebungsbeleuchtung und damit im Allgemeinen nicht bekannt und kann auch nicht durch eine einfache Formel ausgedrückt werden [Zoller + Fröhlich, 2013].

2.2.4 Strahlablenksystem für TLS mit rotierendem Spiegel

Eine vereinfachte Darstellung eines Panoramascanners mit einem rotierenden, angeschrägten Spiegel ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Die Einheit zur Ablenkung des

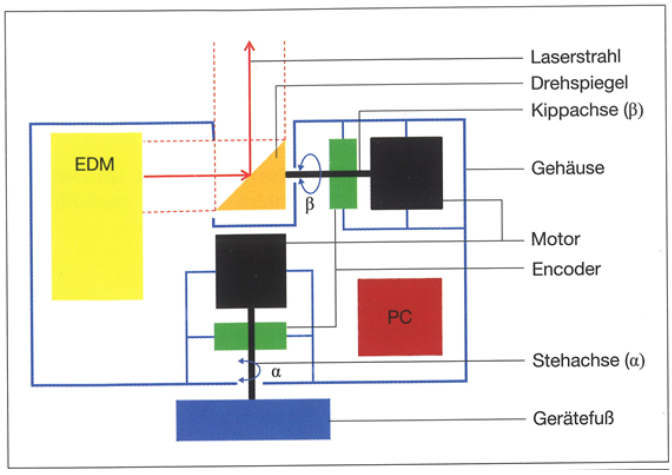


Abbildung 2.13: Aufbau Ablenksystem [Mettenleiter et al., 2015]

Strahls besteht aus dem Drehspiegel, zwei Motoren und den zur Winkelmessung genutzten Encodern. Das vom EDM ausgestrahlte Laserlicht trifft auf den rotierenden Spiegel und wird dadurch rechtwinklig abgelenkt. Der Laserstrahl beschreibt durch die Umlenkung eine Kreisbahn orthogonal zur Drehachse des Winkels β und ist durch eine entsprechende Strahlführung in der Rotationsachse des Spiegels angeordnet. Üblicherweise wird die Achse als vertikale Rotationsachse bezeichnet. Das rückgestrahlte Signal beschreibt den selben Weg rückwärtig. Es wird von einem Umlenkspiegel auf eine Fotodiode gelenkt und dort entsprechend zur Signalverarbeitung umgewandelt. Die räumliche Datenerfassung wird durch eine zusätzliche Drehung um die horizontale Rotationsachse α realisiert. Die Rotation um β erfolgt dabei um ein Vielfaches schneller als die Horizontaldrehung. Die jeweils aktuellen Winkelstellungen werden mittels der Encoder, die in den Drehachsen angeordnet sind, abgegriffen. Abweichungen der Ablenkeinheit und der Encoder werden als Winkelfehler zusammengefasst und von den Herstellern über mathematische Modelle weitgehend korrigiert [Mettenleiter et al., 2015]. Der Schnittpunkt der beiden Rotationsachsen bestimmt den Ursprung des Sensorkoordinatensystems. Es handelt sich um ein lokales 3D-Koordinatensystem mit einer beliebigen Orientierung im Raum [Neitzel, 2006].

2.2.5 Steuerungseinheit

Die Steuerungseinheit übernimmt für das hochdynamische und komplexe System die Abstimmung der drei gemessenen Größen, die Zuordnung zusätzlicher Informationen (z. B. Reflektivität, Neigung des Gerätes) und Zusammenführung aller Datenströme

[Mettenleiter et al., 2015]. Von hier aus erfolgt auch die Ansteuerung der Motorregler und es werden vorhandene Korrekturparameter angebracht. An den Nutzer werden die 3D-Koordinaten der Einzelpunkte im Sensorkoordinatensystem übergeben. Für den Nutzer sind die Berechnung der Koordinaten weder nachvollziehbar, noch können angebrachte Korrekturen geprüft oder verändert werden. Aus diesem Grund werden Laserscanner oftmals als Black-Box-Systeme bezeichnet. Die Überprüfung der Gerätefunktionsfähigkeit obliegt aber dem Nutzer. Möglichkeiten zur Prüfung der Einsatzfähigkeit oder die Ermittlung von instrumentenbedingten Abweichungen werden von den Herstellern nur unzureichend bereitgestellt. Nur das Endergebnis kann im Rahmen eines systematischen Ansatzes geprüft oder kalibriert werden [Staiger, 2014].

2.3 Bewertung der Qualität einer TLS-Messung

Zur Qualitätsbewertung eines Messergebnisses müssen unvermeidbare Abweichungen aufgrund des Messsystems und des -prozesses quantifiziert werden. Aus diesen Abweichungen können dann Aussagen zur Funktionsfähigkeit und zur Qualität der Messung abgeleitet werden.

2.3.1 Qualitätsmerkmale einer TLS-Messung

Kern, [2011b] definiert die Messqualität eines TLS nach vier Kategorien:

- Natürliche Oberflächen können formtreu erfasst werden.
- Länge, Breite und Höhe eines Objektes werden maßtreu bestimmt.
- Objekte werden winkeltreu und maßstäblich wiedergegeben.
- Detailstrukturen größer als die doppelte Abtastfrequenz können abgebildet werden.

Grundsätzlich sollte die Messqualität möglichst unabhängig von Messentfernung, räumlicher Anordnung und Umgebungsbedingungen sein. Zur Beurteilung der Messqualität und zur Prüfung von TLS haben sich hauptsächlich aus dem geodätischen Bereich Ansätze für Prüfverfahren bezüglich der Maßtreue entwickelt. Für die Anwendung zur Formanalyse ist das Qualitätsmaß der formtreuen Abbildung der Objekte von entscheidender Bedeutung. Der Detaillierungsgrad hingegen ist nur von geringer Bedeutung.

2.3.2 Störeinflüsse bei der Erfassung geometrischer Strukturen

Die Einflüsse auf die Qualität der Messung unterscheidet Zogg, [2008] in interne und externe Ursachen. Zu den externen Ursachen zählen:

- die Umgebungsbedingungen (u. a. Atmosphäre)
- die Messkonfiguration (u. a. Entfernung, Auftreffwinkel)
- das Messobjekt (u. a. Oberflächeneigenschaften, Größe)

Interne Ursachen sind im Messsystem selbst begründet und entstehen durch Abweichungen bei der Abstandsmessung, Winkelmessung, Sensor-Synchronisation sowie mangelnde Kalibrierung. Die Fähigkeit bzw. Eignung eines Messgerätes zur Konformitätsprüfung wird durch die gerätetechnischen Eigenschaften bestimmt. Zur Prüfung der Funktionsfähigkeit kann das gesamte Messsystem oder die einzelnen Komponenten untersucht werden. Die Eigenschaften des Messgerätes und deren Abweichungen von der Spezifikation werden durch den Vergleich mit Normalen ermittelt und gegebenenfalls Kalibrierfunktionen abgeleitet.

Mit der Untersuchung von Einzelkomponenten terrestrischer Laserscanner beschäftigen sich eine Vielzahl von Autoren. Schulz, [2008] stellt eine Reihe von Versuchsaufbauten zur Bestimmung einzelner Komponenten eines Z+F Imager 5003 vor, u. a. die Anordnung eines Scanners auf einem fest installierten Pfeiler von dem Zielmarken auf anderen Pfeilern beobachtet wurden. Im Vergleich zur Spezifikation wurden keine signifikanten Instrumentenfehler festgestellt. Neitzel, [2006] beschäftigt sich ebenfalls intensiv mit einem Z+F Imager 5003 und der Bestimmung von Zielachs- bzw. Kippachsabweichungen durch Messung in zwei Lagen. Durch die Aufstellung eines linearen funktionalen Modells werden in einer definierten Konfiguration Zielachs- und Kippachsabweichungen sowie weitere Achsexzentrizitäten ermittelt. Das Vorgehen ist aber nur für Systeme anwendbar, mit denen die Messung in zwei Lagen möglich ist.

Insbesondere bei der Einzelkomponentenanalyse ist die Rückführung auf einen diskreten Punkt notwendig. Beispielsweise Lindstaedt et al., [2012] analysieren die Streckenmessgenauigkeit auf einer Komparatorbahn. Bei der vergleichenden Untersuchung von zwölf Laserscannern wurden Zielmarken je nach Herstellerempfehlung genutzt, um die gemessenen Entfernungen mit Referenzstrecken zu vergleichen. Eine Auswahl der Ergebnisse ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Die Grafik suggeriert ein sehr gutes Ergebnis für den Faro Photon und zeigt relativ große Abweichungen im Bereich von 1 mm bis 3 mm für die drei geprüften Z+F Imager 5006. Da die Strecken bei dem Z+F Imager 5006 konstant zu kurz gemessen sind [Lindstaedt et al., 2012], ist davon auszugehen, dass die Formtreue qualitativ besser sein kann. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Ergebnisse einzelner Scanner gleichen Typs sich aufgrund unterschiedlicher Scanauflösungen unterscheiden. Das zeigt bereits den großen Einfluss der Zielmarkenerkennung auf die Ergebnisse solcher Untersuchungen.

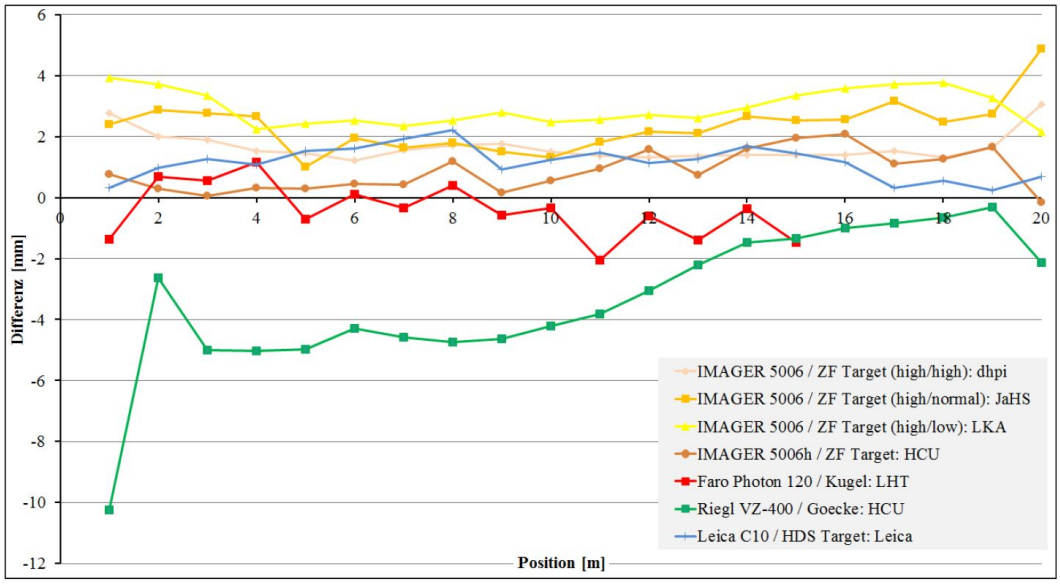


Abbildung 2.14: Vergleich verschiedener Scanner auf einer Komparatorbahn [Lindstaedt et al., 2012]

Bemerkenswert ist das sehr gute Resultat des Faro Photon. Für den Photon und den ebenfalls von Faro stammenden LS 880HE sind aus den Arbeiten von Lichti et al., [2006] und Dorninger et al., [2008] wesentlich höhere Unsicherheiten für die Bestimmung von Formabweichungen an Freiformflächen zu erwarten. Die Autoren weisen für die betreffenden Laserscanner radiale Distanzmessabweichungen nach, die sich als konzentrische Kreise in den Scans äußern. Lichti et al., [2006] modellieren die Kalibrierfunktionen als sinusförmigen Abweichungen in Abhängigkeit vom Horizontal- und Vertikalwinkel sowie zusätzlich einen konstanten Anteil und eine Maßstabskorrektur. Dorninger et al., [2008] untersuchen vor dem Ansatz zur Korrektur die geräteinternen Kalibrierfunktionen, die beim genutzten Faro LS 880HE noch einsehbar waren. Es werden drei unterschiedliche Korrekturen dargestellt. Eine wellenförmige, eine entfernungsabhängige und eine Korrektur in Abhängigkeit von der Reflektivität. Zur Parameterschätzung werden Ausgleichsebenen in den Daten gesucht und anschließend durch eine Fast Fourier Transformation eine Kalibrierfunktion bestimmt. Die systematischen Abweichungen konnten signifikant reduziert werden. Hirtl, [2009] versucht die Kalibrierfunktion auf einen Faro Photon zu übertragen, kommt aber zu dem Schluss, dass ohne ausreichende Kenntnis der Wirkungsweise interner Kalibrierungen keine Verbesserung der Punktwolken erreicht werden kann.

Ursachen der Abweichungen für die reflektorlose Distanzmessung können durch Fehler in der Modulationsfrequenz, zyklische Phasenfehler oder Phaseninhomogenitäten bedingt sein. Molnár et al., [2009] modellieren auf Basis von Daten eines Faro LS 880HE eine stetige, stückweise lineare Korrekturfunktion. Mit der vorgestellten Methode werden zusätzlich kürzere Wellenlängen sowie ein nicht-periodischer Anteil aufgedeckt. Es gelingt zwar die systematischen Abweichungen zu verringern, aber in den dargestellten

Ergebnissen sind immer noch deutliche Restabweichungen zu erkennen. In Zamecnikova et al., [2014] werden periodische Distanzabweichungen für eine scannende Totalstation in Abhängigkeit von der Reflektivität des Objektes nachgewiesen.

Den Ansatz einer Systemkalibrierung verfolgen u. a. Rietdorf, [2005] und Reshetyuk, [2006]. Dabei werden die Kalibrierparameter eines TLS-Systems durch eine Parameterschätzung im Rahmen einer Ausgleichsrechnung ermittelt. Gordon, [2008] nutzt dafür den von Rietdorf, [2005] entwickelten Ansatz der Schätzung räumlich angeordneter Ebenen und zusätzlicher Einführung modellierter Kalibrierparameter. Dies entspricht dem Ansatz ein möglichst umfassendes Korrekturmodell aufzustellen und die Korrekturfunktion unterschiedlicher Systemkomponenten sowie die entsprechenden Instrumentenparameter durch eine ausreichende Anzahl von sich überdeckenden 360° Scans zu berechnen.

Rietdorf, [2005] nutzt dafür einen selbst entwickelten Scanner mit dem Vorteil, dass der genaue Aufbau, Funktionsweise, Berechnungsart und Umsetzung der Strahlablenkung bekannt sind und das aufgestellte Modell somit der Realität entspricht. Bei der Übertragung auf einen Z+F Imager 5003 wird bereits die Signifikanz der Schätzung der Additionskonstante in Frage gestellt, da diese stark mit den Exzentrizitäten korreliert. Den Ansatz einer Systemkalibierung verfolgen ebenfalls Lichti, [2007] und Kern, [2011a]. Im Gegensatz zur Nutzung von korrespondierenden Flächen erfolgt die Rückführung auf Einzelpunkte und die Transformation der Scans zueinander bzw. in ein mit übergeordneter Genauigkeit erfasstes Referenzpunktfeld.

Die Ansätze zur Systemkalibrierung haben in hohem Maße zum Verständnis von TLS-Messungen beigetragen. Mit der stetigen Verbesserung der Messgenauigkeit zeigt sich aber zunehmend die Unvollkommenheit des Tachymetermodells und die fehlende Berücksichtigung von unbekannten Korrelationen zwischen den Komponenten. Lediglich Lichti, [2010] führt eine Untersuchung der Korrelation der Variablen einer TLS-Messung durch. Holst et al., [2014a] weist nach, dass die in einem Ausgleichsprozess geschätzten Parameter auf Basis des Tachymetermodells nicht konstant und somit ohne Aussagekraft sind. Bei seiner Anwendung zur Formanalyse an einem Radioteleskop traten zusätzlich unbekannte systematische Abweichungen auf.

Für die Ermittlung prüfmerkmalbezogener Unsicherheiten spielen die äußeren Faktoren eine erhebliche Rolle, da sich Messunsicherheiten nicht ausschließlich aus Restabweichungen des Instrumentes ergeben. Dazu zählt u. a. die Abhängigkeit vom Auftreffwinkel und die Reflektivität des Objektes. Beide Faktoren haben erheblichen Einfluss auf die Streckenmessung. Da bei den beschriebenen Anwendungen nur ein kleiner Teil des Messvolumens genutzt wird, überwiegt aufgrund des polaren Messprinzips der Anteil der Distanzmessung an der Gesamtunsicherheit gegenüber der Winkelgenauigkeit.

Einen weiteren Einflussfaktor bedingt durch die Aufnahmekonfiguration beschreibt Kern, [2003]. Die Wellenfront des Lasers wird durch eine schräg zum Scanner stehende Oberfläche verformt. Für näher zum Scanner liegende Bereiche, verdichtet sich die

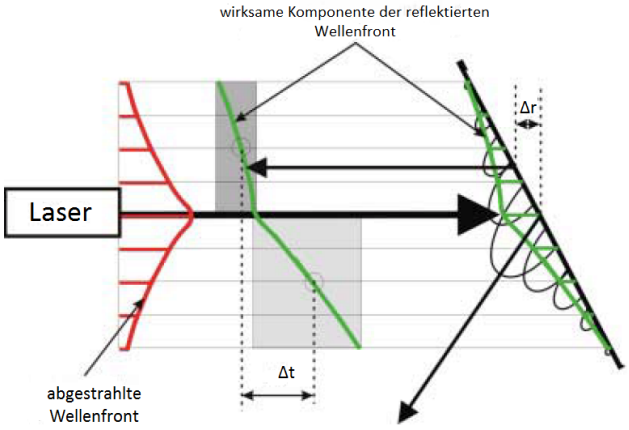


Abbildung 2.15: Auftreffwinkelabhängige Veränderung der Wellenfront [Kern, 2003]

wirksame Intensität und erweitert sich für entferntere Bereiche (siehe Abbildung 2.15). Die Folge ist, dass die Intensitätsverteilung am Detektor zu Gunsten der näher gelegenen Bereiche zeitlich verschoben wird. Ein systematisch verschobenes Signal und damit eine verkürzte Entfernung wird erfasst.

Abbildung 2.16 gibt einen Überblick über die wesentlichen Einflussgrößen und Ursachen der Messunsicherheit bei einer TLS-Messung in Form eines Ishikawa-Diagramms. Grau hinterlegt sind die spezifischen Komponenten einer TLS-Messung. Neben dem Messgerät spielen insbesondere auch die Komponenten Messobjekt, Messmethode sowie der Auswertevorgang eine erhebliche Rolle bei der Beurteilung von Ergebnisses einer

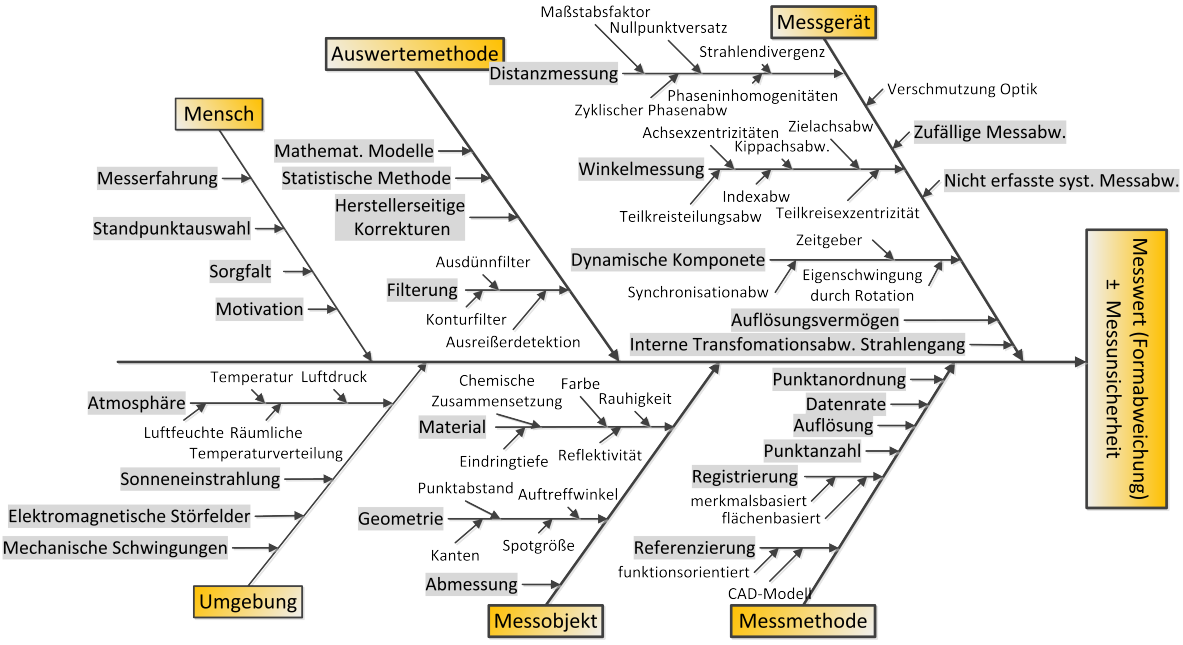


Abbildung 2.16: Einflussgrößen auf das Ergebnis einer TLS-Messung

TLS-Messung. Für diese Bereiche liegen, trotz vielfacher Versuche, keine brauchbaren Werkzeuge vor, obwohl ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis erheblich ist [Kern, 2011a]. Weitere Schwierigkeiten ergeben sich bei der sinnvollen Behandlung von systematisch wirkenden Effekten, deren aktuelle Größe in der speziellen Messaufgabe nicht exakt ermittelbar ist, sowie der Bestimmung der Korrelation von Einflussgrößen untereinander [Hennes et al., 2007].

2.3.3 Prüfverfahren für TLS-Systeme

Für die Beurteilung von Qualitätskriterien und die Prüfung von TLS-Systemen gibt es bisher nach wie vor keine verbindlichen Normen oder Richtlinien. Seit dem Jahr 2014 existiert das DVW-Merkblatt „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)“. Es soll ein möglichst schnelles, einfaches und mit Standardausrüstung durchführbares Feldprüfverfahren darstellen (simplified test procedure). Der Messaufbau besteht aus vier Zielmarken, die in einem horizontalen und vertikalen Dreieck anzuordnen sind. Dabei sollen möglichst große Entfernungen bzw. eine steile Visur durch einen Punkt im vertikalen Dreieck realisiert werden. Durch die Messung der Zielmarken von zwei unterschiedlichen Standpunkten ergeben sich Streckendifferenzen, aus denen mögliche Instrumentenabweichungen abgeleitet werden können. Unter dem klassischen Ansatz der ISO 17123 für geodätische Geräte erfolgt der Test der Funktionsfähigkeit im Vergleich zur Herstellerangabe. Das Merkblatt klammert die Beurteilung der Geometrietreue und das Rauschverhalten explizit aus und soll aus diesem Grund an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Für eine weitergehende Prüfung (full test procedures) existiert ein konkreter Vorschlag, die „Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen“ [Kern, 2010], welche seit Längerem zur Diskussion steht. Ziel ist eine kenngrößenorientierte Standardisierung der Prüfung, die möglichst für Impuls- und Phasenvergleichsscanner gleichermaßen eingesetzt werden soll. Abgeleitet aus der VDI Richtlinie: VDI/VDE 2634 „optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung“, die für Messsysteme nach dem Triangulationsprinzip bereits angewendet wird, basiert der Entwurf der Prüfrichtlinie auf den von Heister, [2006] entwickelten Ansätzen zur Bestimmung von Kennwerten und entstand im Rahmen des Forschungsprojektes SigmaTLS+ [Kern, 2011a].

Das Verfahren beruht im Wesentlichen auf der räumlichen Anordnung von geometrisch definierten und kalibrierten Prüfkörpern (siehe Abbildung 2.17). Die Kenngrößen werden aus mindestens zwölf Kugeln oder Ebenen, die beliebig im Raum angeordnet sind, ermittelt. Der Durchmesser der Prüfkörper soll mindestens dem zehnfachen der Ortsauflösung entsprechen. Bei der Standardauflösung eines TLS von 6 mm@10 m entspricht dies 60 mm. Die Prüfung soll im Sinne einer Systemprüfung erfolgen, d. h. zur Auswertung soll die Herstellersoftware genutzt werden. Die Richtlinie gilt für die Vermessung von 3D-Objektoberflächen in einem Einzelscan. Diese sind objektiv ermittelbar und daher gute Anhaltspunkte zum Vergleich tatsächlicher Qualitätsmerkmale sowohl

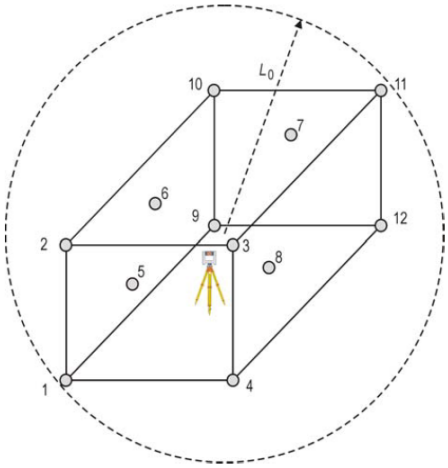


Abbildung 2.17: Räumliche Anordnung von Prüfkörpern [Kern, 2010]

einzelner Scanner gegenüber den jeweiligen Herstellerangaben als auch untereinander [Wunderlich et al., 2013]. Die Kenngrößen werden wie folgt definiert [Kern, 2010]:
Antastabweichung:
Durch die Kenngröße Antastabweichung R wird das Abweichungsverhalten des TLS-Systems in einem kleinen lokalen Teil des Messvolumens beschrieben. Die Kenngröße gilt als Maß für die Formtreue. Sie ist definiert als Standardabweichung der $n = m * p$ Abstände r_i für p Prüfkörper, die mit je m Messpunkten berechnet werden. Alternativ kann die Antastabweichung, wie ursprünglich von Heister, [2006] vorgeschlagen, als mittlere absolute Abweichung der Abstände berechnet werden. Die beiden Berechnungsarten sind in Formel (2.1) gegenübergestellt.

$$R_{Heister} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|r_i| \qquad\qquad R_{Kern} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}{r_i}^2} \tag{2.1}$$

Kugelradienabweichung:
Zur Bestimmung der Kugelradienabweichung sind Kugeln als Kalibrierkörper zu verwenden. Die Kenngröße R_K spiegelt etwaige systematische Formabweichungen im Lokalen aufgrund der gekrümmten Kugeloberfläche wieder. Die Kugelradienabweichung ergibt sich als Mittelwert der Differenzen v_i zwischen geschätzten und vorgegebenen Radius laut Kalibrierung der k Prüfkörper.

$$R_K = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} v_i \tag{2.2}$$

Abstandsabweichung:
Die Kenngröße Abstandsabweichung dient dazu, die Fähigkeit des Messsystems zur Längenmessung zu überprüfen und die Rückführbarkeit zu gewährleisten. Die Abstandsabweichung liefert Aussagen zur Maßtreue eines Systems und berechnet sich aus den

Abständen der Mittelpunkte von Zielmarkenpaaren oder mehrerer Zielmarken. Dabei werden Kugeln oder herstellerspezifische Targets eingesetzt. Die Sollpositionen sind entsprechend mit einer übergeordneten Genauigkeit zu ermitteln. Aus den Soll- und Ist-Werten ergibt sich die Abstandsabweichung L als Mittelwert der p kalibrierten Längen. Alternativ kann die Kenngröße aus der Transformation der gemessenen Zielmarkenmittelpunkte auf die Sollkoordinaten als Helmertscher Punktabweichung ermittelt werden.

$$L = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^{p} \Delta L_i \tag{2.3}$$

In der Prüfrichtlinie wird bereits erklärt, dass das Verfahren nicht auf alle Aufgaben übertragbar ist [Kern, 2010]. Aussagen zur formtreuen Abbildung großer Flächen können mit dem Prüfverfahren nicht getroffen werden. Durch die Verwendung der Herstellersoftware können zusätzliche Abweichungen bei der Approximation der Prüfkörper auftreten, die nicht dem Messgerät zuzuschreiben sind. Das heißt, es kann keine Aussage über die tatsächliche Formtreue der Messung getroffen werden, sondern lediglich über die erreichbare Maßhaltigkeit eines speziellen Auswertungsresultats [Wunderlich et al., 2013].

2.3.4 Bewertung der Prüfkörper

Kugeln besitzen als Prüfkörper einige wesentliche Eigenschaften, wie z. B. die Sichtbarkeit von allen Seiten, Herstellerunabhängigkeit und die Rückführbarkeit auf einen definierten Punkt durch die Approximation einer Regelgeometrie in der Punktwolke. Durch diese Eigenschaften haben sich Kugeln in einer Vielzahl von den in der Literatur vorgeschlagenen Prüfverfahren etabliert. Kugeln haben aber auch einige entscheidende Nachteile, die ihrer Verwendbarkeit als Prüfkörper für das Qualitätsmerkmal der Formtreue entgegenstehen.

Prüfkörper Kugel
Grundlage für die Entwicklung der Prüfrichtlinie und des ursprünglich von Heister, [2006] entwickelten Prüfverfahrens war die VDI 2634. Für die vorgeschlagenen Kenngrößen wird in der VDI/VDE, [2002] eine Prüfkörpergröße von 10 % bis 20 % der Raumdiagonale, des das Messvolumen kleinstmöglich umschreibenden Quaders L_v empfohlen. Das entspricht bei einem zu prüfenden Messvolumen von 20 m einem Kugeldurchmesser von mindestens 2 m. Die Formabweichung der Prüfkörper selbst soll kleiner als 1/5 der zu überprüfenden Kenngröße sein. Das Verhältnis von Prüfkörpergröße und Genauigkeit ist bei einem zu erwartenden Messrauschen von 0.5 mm somit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten und der Forderung nach einer möglichst einfach handhabbaren Prüfung nicht realisierbar. Aus diesem Grund werden wesentlich kleinere Kugel verwendet. Die Standardgröße beträgt dabei zumeist nicht mehr als 150 mm. Die Prüfkörper sind somit gegenüber der ursprünglichen Festlegungen für flächenhafte Messsysteme um den Faktor 15 kleiner. Prozentual betrachtet sollen 10 % bis 20 % des Messvolumens abgedeckt werden. Real geprüft werden bei den verwendeten Kugeln aber weniger als

1 %. Entsprechend kann somit auch nur ein wesentlich geringer Teil des Messvolumens abgedeckt und durch die Kenngrößen bewertet werden.

Ein weiterer Nachteil der Kugeln besteht in der Unverträglichkeit des Messprinzips mit diesen im Verhältnis kleinen Prüfkörpern. Je kleiner die Oberfläche desto mehr Punkte gehen durch die von Kern, [2003] beschriebenen Effekte des „Komentenschweifes“ im Randbereich und „Naseneffekten“ verloren. Die Auswirkungen führen dazu, dass der nutzbare Teil der Oberfläche weiter eingeschränkt wird.

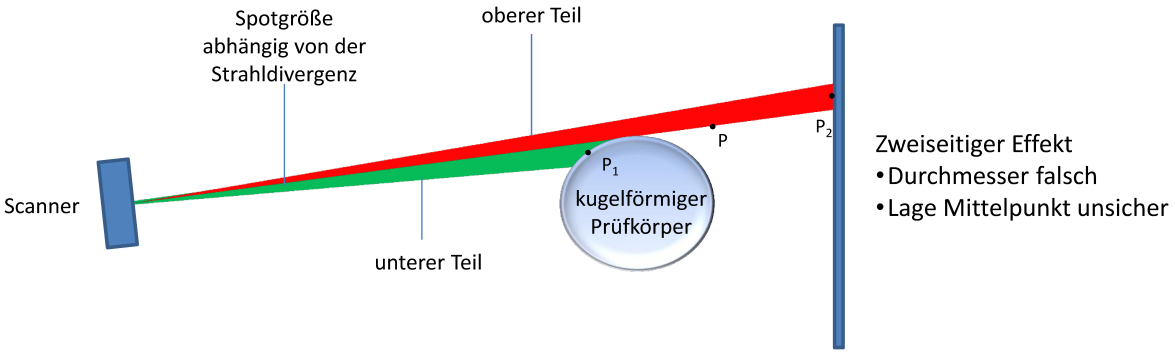


Abbildung 2.18: Spotgröße als Ursache für die Entstehung von Streupunkten [Heister et al., 2004]

Abbildung 2.18 zeigt schematisch die Ursache für die Entstehung von Streupunkten im Randbereich einer Kugel. Dies führt dazu, dass der ohnehin schon weniger als die Hälfte betragende Abdeckungsbereich der Gesamtgeometrie abhängig von der Spotgröße weiter reduziert wird und eine Bewertung von Ausreißern schwieriger wird. Des Weiteren gibt es keine festgelegten Standards für die Ausreißerdetektion und Algorithmen zur Kugelanpassung [Kern et al., 2008].

Prüfkörper Ebene
Ebenen stellen unter der Zielstellung einer flächenhaften Bewertung der Formtreue einen wesentlich geeigneteren Prüfkörper dar. Nach Heister, [2006] werden bei einem Messvolumen d Prüfflächen mit einer Länge von $L_Q = 0.04 \ldots 0.06\ d$ und Breite $B_Q = 0.01 \ldots 0.02\ d$ vorgeschlagen. Dies entspricht für einen angestrebten Einsatzbereich von 20 m nur 1.2×0.4 m^2. Zum Vergleich wird in der VDI/VDE, [2002] eine Mindestlänge von 0.5 L_v gefordert. Auch hier beträgt die Ausdehnung des Prüfkörpers für Laserscanner nur $^1/_{10}$ der ursprünglich durch die Richtlinie geforderten Prüfkörperausdehnung. Die durch Heister, [2006] vorgeschlagene Reduzierung der Ausdehnung der Prüfkörper ist aus praktischen Gründen nachvollziehbar, ob diese auch zu einer Verschlechterung der Aussagekraft der vorgeschlagenen Kenngrößen führt, wurde bisher nicht untersucht. Möglichkeiten zur Bewertung systematischer Abweichungen, wie es durch die Kenngröße Kugelradienabweichung vorgeschlagen wird, existieren für flächenhafte Prüfkörper nicht.

2.4 Datenstrukturierung und mathematische Modellierung

Zur Prüfung der Konformität mit den Toleranzen sind Operationen wie Zerlegung, Erfassung, Filterung, Zuordnung, Zusammenfassung, Erzeugung, Rekonstruktion und Auswertung notwendig [Hartmann, 2015]. Während die Prüfung und Kalibrierung das Feststellen und ggf. Korrigieren systematischer Abweichung bei der Erfassung zum Ziel hat, kann durch eine geeignete Filterung zufälliger Anteile die Messunsicherheit reduziert werden. Filter werden in der industriellen Messtechnik verwendet, um störende Einflüsse bei der Beurteilung technischer Oberflächen zu unterdrücken. Der Einsatz dieser Filter umfasst dabei ein weites Gebiet, nämlich im Wesentlichen die Koordinatenmesstechnik, die Form- und Konturenmesstechnik sowie die Oberflächenmesstechnik [Krystek, 2009]. Ziel der Filterung in der Oberflächenmesstechnik ist die Abtrennung unerwünschter zufälliger Messabweichungen, die als Rauschen das Messergebnis verfälschen [Hernla, 2000].

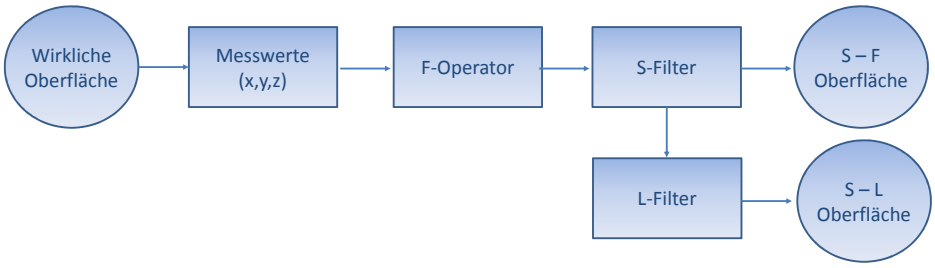


Abbildung 2.19: Messkette für die Charakterisierung technischer Oberflächen

Abbildung 2.19 zeigt die Messkette für die Ermittlung der Gestaltabweichungen. Die reale Oberfläche wird durch ein Messsystem abgetastet und durch einzelne Punkte diskretisiert. Die Beschreibung der Oberfläche erfolgt durch die Messdaten (x,y,z) und enthält die Form, die Formabweichungen (einschließlich der weiteren Gestaltabweichungen) sowie Abweichungen der Messeinrichtung. Zur Aufbereitung der Daten erfolgt eine mathematische Einpassung der Soll-Form. Durch diesen F-Operator wird die nominelle Form extrahiert. Anschließend werden mit einem S-Filter (Tiefpassfilter) die zufälligen Anteile bereinigt. Die entstandene S-F-Oberfläche enthält die Formabweichungen sowie die Feinstrukturen. Im Bereich der Prüfung von mikrostrukturierten Oberflächen können weitere Filterverfahren angewendet werden, um die Feinstrukturen von den Formabweichungen zu trennen. Für die Anwendung von Laserscannern zur Bestimmung von Formabweichungen ist die S-F-Oberfläche eine ausreichende Flächenbeschreibung.

Für die Filterung stehen verschiedene Möglichkeiten der Modellierung und Beschreibung der Oberflächencharakteristik zur Verfügung. Zum Vergleich zweier Punktwolken bei der geodätischen Deformationsanalyse kann unterschieden werden in punkt-, punktwolken-,

oberflächen-, geometrie- oder parameterbasierte Auswertemodelle (siehe Abbildung 2.20). Punkt- bzw. punktwolkenbasierte Ansätze nutzen Einzelpunkte zum Vergleich mit der

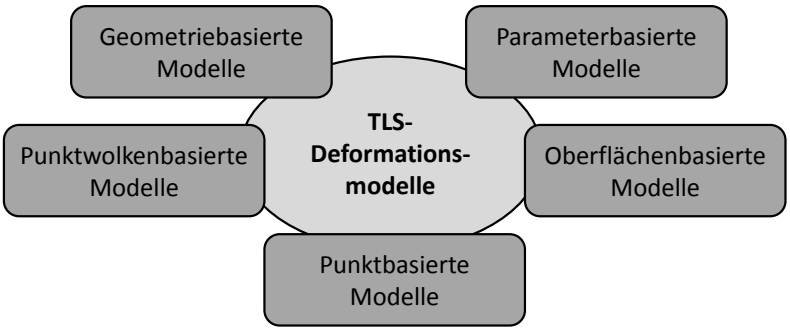


Abbildung 2.20: TLS-basierte Deformationsmodelle [Holst et al., 2017]

Sollform oder zweier Punktwolken miteinander. Zu den oberflächenbasierten Verfahren gehören die Beschreibung der Oberfläche durch Vermaschungs- bzw. Interpolationsverfahren [Holst, 2015]. Die geometrie- und parameterbasierten Ansätze verwenden geometrische Modelle zu Oberflächenapproximation. Geometrische Ansätze stellen die Oberfläche, z. B. mittels lokaler Ebenen [Eling, 2009] oder globalen Approximationen dar. Liegt die Zielstellung in der Bestimmung geometrischer Parameter, wird auf geometrische Modelle zurückgegriffen [Holst, 2015]. In parametrischen Modellen werden darüber hinaus die geschätzten Parameter zur Analyse der Deformation genutzt [Holst et al., 2017]. Wunderlich et al., [2016] geben einen umfangreichen Überblick der Konzepte zur Punktwolkenmodellierung bei der Deformationsanalyse und die daraus resultieren Herausforderungen. Dabei werden oberflächenbasierte Ansätze beschrieben als Modelle bei denen ein Punktgitter zum Aufbau der Fläche dient. Die korrespondierenden Punkte werden entweder direkt gemessen oder interpoliert [Wunderlich et al., 2016].

Im Sinne der Messkette für die Charakterisierung technischer Oberflächen (siehe Abbildung 2.19) entsprechen die geometrie- und parameterbasierten Ansätze einem F-Operator, bei dem die vorgegebene Soll-Form aus der Punktwolke extrahiert wird. Dazu zählen die Verfahren, bei denen eine Einpassung von Formelementen unter dem Zwang erfolgt, die vordefinierte Form einzuhalten. Das gilt auch für Flächen zweiter Ordnung (Quadriken) und für Freiformflächen, die global bestmöglich an die Punktwolke angepasst werden, ohne ihre ursprüngliche Form zu ändern. Bei der Filterung im Sinne des S-Operators erfolgt eine bestmögliche Beschreibung der wahren Oberfläche und ihrer anschließenden Nutzung zur Bestimmung der Deformation bzw. Formabweichungen. Erfolgt dabei der Übergang von einem punktbasierten Vergleich zu einer flächenbasierter Auswertung kann von einem oberflächenbasierten Ansatz gesprochen werden.

2.4.1 Einpassung von Formelementen unter Zwang

Bei der Einpassung geometrischer Primitiven werden vorgegebene Formelemente bestmöglich in die Punktwolke eingepasst. Die Formparameter des Geometrieelementes, z. B. der Radius einer Kugel, werden dann im Rahmen der Ausgleichsrechnung bestimmt. Die sich ergebenden Residuen werden dann als Formabweichungen interpretiert. Regelgeometrien sind mathematisch definierte Formen. Bei der Modellierung und der Formanalyse können Formmaße zur Beurteilung der Bauteilqualität abgeleitet und mit vorgegebenen Soll-Maßen verglichen werden. Typische Beispiele sind der Radius eines Zylinders aber auch komplexere Modelle.

Holst et al., [2011] nutzen das Modell eines Rotationsellipsoides für die Detektion möglicher lokaler Abweichungen bei der Anwendung zur Oberflächenbeurteilung eines Radioteleskopes. Dabei werden die Formparameter einer vorgegebenen Geometrie in einem Schätzprozess ermittelt, um auf mögliche Deformationen zu schließen. Der Autor weist auf Einschränkungen bezüglich der Aussagekraft für lokale Deformationen bei einem erhöhten Signal-Rausch-Verhältnis aufgrund äußerer Einflüsse hin. Ein Vorteil der Verwendung von zwei und dreidimensionalen Standardgeometrien ist die einfache mathematische Beschreibung bei der Modellbildung. Für die Formanalyse lassen sich Toleranzzonen auch im 3D-Raum einfach festlegen. Durch die Formparameter können bereits Rückschlüsse auf die Fertigungsqualität gezogen werden [Lösler et al., 2010]. Die Autoren beschreiben dies als klassische Aufgabe der Formanalyse im geodätischen Bereich. Die Formparameter einer Regelgeometrie sagen aber noch nichts über die wahre Oberflächengestalt aus. Streng genommen ergibt sich z. B. aus der Definition der Rundheit,

> Abstand zweier konzentrischer Kreise, die die Umfangslinie eines Körpers berührend einschließen und deren radialer Abstand ein Minimum ist. [DIN 1101, 2014]

dass die Einpassung und Bewertung von Formparametern eines Ausgleichselementes nach der Methode der kleinsten Quadrate nicht geeignet ist, die Form einer funktionsrelevanten Oberfläche zu prüfen. In der klassischen Vermessung wird der Formparameter Radius unter der Annahme einer Normalverteilung als Ausgleich der zufälligen Abweichungen der Messpunkte bestimmt. Erst die Beurteilung der minimalen und maximalen Abweichungen führt zu einer aussagekräftigen Formbeurteilung. Aus diesem Grund werden in der Koordinatenmesstechnik andere Auswertestrategien verwendet, die sich ausschließlich an der zu prüfenden Funktion orientieren. Dazu zählen am Beispiel der Rundheit der Tschebyscheff-Kreis sowie der Hüll- und Pferchkreis (siehe Abbildung 2.21).

Die Nutzung des Ausgleichskreises (Gauß-Kreis) ist nie am Prüfziel orientiert und liefert häufig Kreisparameter, die ein Werkstück fälschlicherweise als Ausschuss- oder Gutteil deklarieren [Weber, 2001]. Daraus ergibt sich unter anderem, dass die reine Bewertung der Abstände von einem Ausgleichselement und deren Mittelwertbildung bzw.

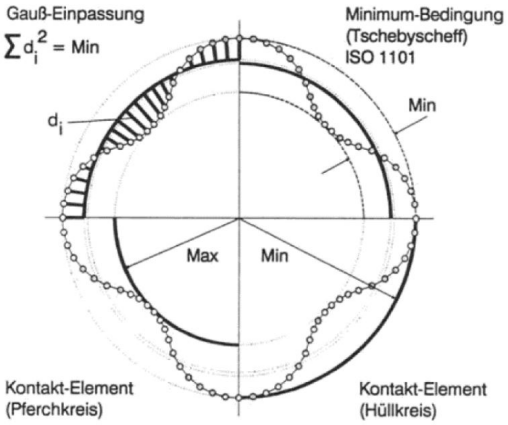


Abbildung 2.21: Wirkungsweise verschiedener Auswertestrategien zur Ersatzkreisberechnung [T. Pfeifer, 1992]

Ableitung einer Standardabweichung keine geeignete Auswertestrategie zu Ermittlung der Formtreue ist.

Die Einpassung von Formelementen unter Zwang zählt zu den geometriebasierten Verfahren und wird für TLS-Daten u. a. zur Deformationsanalyse von Ingenieurbauwerken genutzt [Ioannidis et al., 2006; van Gosliga et al., 2006]. In den Ansätzen wird das Ziel verfolgt, Verformungen durch die globale Einpassung einer idealgeometrischen Sollform in die Punktwolke nachzuweisen. Eine Trennung instrumentenbedingter Abweichungen und realer Formabweichungen erfolgt nicht. Van Gosliga et al., [2006] beschreiben ein periodisches Signal in den Residuen der Zylinderschätzung und führen dies auf eine verzerrte Parameterschätzung oder Registrierungsabweichungen zurück. In Ioannidis et al., [2006] wird ein zweistufiger Ansatz verfolgt. Eine Modellierung mittels NURBS-Flächen dient zur Reduzierung des Rauschens. Dabei wird unterstellt, das die Modellierung eine verformungstreue Abbildung liefert. Anschließend werden die Modelle mit einem eingepassten Formelement verglichen. Diese und weitere Vorgehensweisen sowie dazugehörige Anwendungsbeispiele werden durch Neuner et al., [2016] zusammengetragen und den Modelltypen zugeordnet.

2.4.2 Geometriebezogene Datenmodellierung mittels lokaler Ebenen

Der Ansatz, das Rauschen eines TLS zu reduzieren, hat für die Anwendung bei der geodätischen Deformationsanalyse zur Entwicklung der Blockwertmittelbildung geführt. Durch die Nutzung von lokalen Ebenen kann die flächenhafte Erfassung auf einen reproduzierbaren Punkt zurückgeführt werden, aus dem die Verformung des Objektes in unterschiedlichen Zeitepochen abgeleitet wird. Die Nutzung eines einfachen

geometrischen Modells zur Ableitung von Zuverlässigkeitsmaßen bei der Ermittlung von Deformationen in der Bauwerksüberwachung ist durch ELING, [2009] ausführlich beschrieben.

Auf Grundlage einer ausgleichenden Ebene wird die innere Genauigkeit der abgeleiteten geometrischen Deformationen signifikant gesteigert. Die Nullepoche modelliert ELING, [2009], aufgrund der unbekannten Geometrie des Bauwerkes, auf Basis einer Freiformfläche. Die ausgleichenden Geometrieelemente werden in einem vorab definierten Raster angelegt, so dass Deformationen zu einem messtechnisch erfassten und definierten Ausgangszustand bewertet werden können. Der repräsentative Punkt eines Blockes wird als Schwerpunkt eines Raumelementes abgeleitet (siehe Abbildung 2.22). Diese blockweise Ebenenschätzung und Ableitung repräsentativer Punkte ist für die

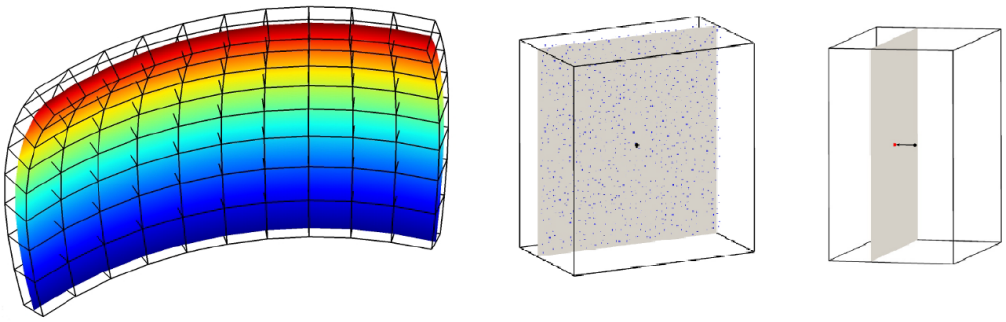


Abbildung 2.22: Grundprinzip der Blockwertmittelbildung [ELING, 2009]

Anwendung an industriellen Großstrukturen nur bedingt geeignet. Durch die vereinfachte Modellierung ergibt sich ein Modellabweichung b, der wie in Abbildung 2.23 dargestellt, in Abhängigkeit vom Krümmungsradius r und der Blockgröße a abgeschätzt werden kann. Der Vorteil der lokalen Modellierung bzw. Mittelung der umliegenden

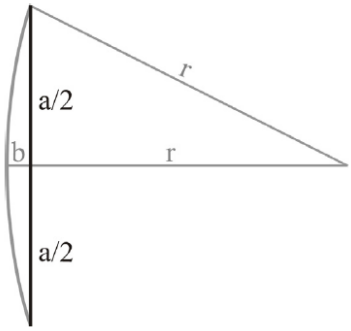


Abbildung 2.23: Modellabweichung Ebene [ELING, 2009]

Punkte zur Bestimmung der örtlichen Formabweichung liegt in der einfachen Berechenbarkeit und geringen Modellkomplexität. Nicht lineare Kurvenverläufe lassen sich damit nur unzureichend modellieren [GARMANN et al., 2014]. Eine Weiterentwicklung

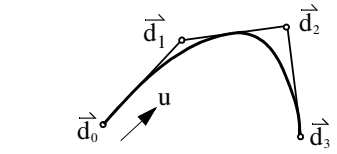
zur Bestimmung der Veränderung zwischen zwei Punktwolken stellt der Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich (M3C2) dar. Dabei wird die Deformation auf Basis von lokalen Ebenen in beiden Punktwolken berechnet. Der Bereich der genutzten Punkte wird vom Anwender durch die Vorgabe von Stützpunkten und einem Zylinderradius zur Datensegmentierung bestimmt. Da ebenfalls nur geometrische Primitive zur Filterung genutzt werden, sei für weiterführende Erklärungen auf Lague et al., [2013] verwiesen. Beide Verfahren können auch den punktwolkenbasierten Modellen zugeordnet werden, da schlussendlich der Abstand zwischen zwei Punkten berechnet wird [Holst et al., 2017].

2.4.3 Geometriebezogene Datenmodellierung mittels Freiformflächen

Die einfachste Form der Datenmodellierung als Übergang zu einer flächenhaften Darstellung der Messdaten ist die Triangulation der Datenpunkte. Die Erstellung von triangulierten Flächen ist nur eine generalisierte Beschreibung der wahren Oberfläche, da u. a. Unstetigkeiten vorkommen und das Messrauschen direkt abgebildet wird. Falls die genaue Geometrie der Oberfläche nicht oder nur unzureichend bekannt ist, werden in diesem Sinne oft oberflächenbasierte Ansätze gewählt, die die Oberfläche durch Freiformflächen darstellen [Holst, 2015]. In [Neuner et al., 2016] wird die Modellierung von kontinuierlichen Flächen, die das gesamte Objekt abbilden, den geometriebasierten Verfahren zugeordnet.

B-Spline bzw. NURBS-Modelle stellen heutzutage die gebräuchlichste Form der Freiformflächenbeschreibung dar. Sie werden in den meisten CAD- und Reverse Engineering-Programmen zur Modellierung verwendet. Die Konstruktion und Auslegung von aerodynamisch oder hydrodynamisch optimierten Flächen erfolgt heute fast ausschließlich durch splinebasierte Verfahren. NURBS stellen eine Verallgemeinerung der B-Splines dar. Als Spline wird eine glatte Kurve bezeichnet, deren Verlauf durch gegebene Punkte bestimmt ist und die eine minimale Krümmung aufweist. Zwischen den Kontroll-, Knoten- bzw. Stützpunkten ist die Kurve stückweise aus Polynomen zusammengesetzt. Der Begriff Spline bzw. Strak stammt ursprünglich aus dem Schiffbau und beschreibt das Verhalten einer biegsamen Holzlatte die an einzelnen Punkten fixiert wird. Die Holzlatte beschreibt dabei in ihrem Verlauf eine Kontur minimaler Krümmung [Munz, 2012].

Jeder Splinekurve kann als Linearkombination von B-Splines dargestellt werden. Eine B-Spline-Kurve besteht aus den Basisfunktionen N und einem Vektor der Knotenfolge d. Eine Übersicht der mathematischen Formulierungen ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Die B-Splines bilden eine lokale und eine globale Basis, sie verfügen über einen kompakten Träger und bilden eine nicht-negative Partition der Eins [Prasiswa, 2009], d. h. die Basisfunktionen summieren sich zu Eins. Durch die Einführung von Gewichten für jeden Kontrollpunkt erfolgt der Übergang zu rationalen B-Spline-Flächen. Grundlage der



$$\vec{C}(u) = \sum_{i=0}^{n} \vec{d}_i N_{ik}(u)$$

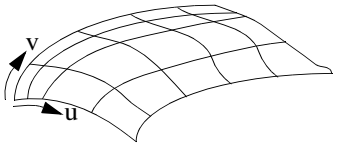
$$N_{i,\,k=1}(u) = \begin{cases} 1 \text{ für } [u_i, u_{i+1}] \\ 0 \text{ sonst} \end{cases}$$

k = Kurvenordnung = Kurvengrad + 1
$\vec{d}_i$= de-Boor-Punkt = Kontrollpunkt
n = Anzahl der Kontrollpunkte +1

k > 1: Rekursionsformel, d.h. Entwicklung aus zwei Polynomen niedrigeren Grades:

$$N_{i,\,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} N_{i,\,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1,\,k-1}(u)$$

Die Polynome $N_{i,k}(u)$ werden mit Hilfe eines Trägervektors $T=(u_0, u_1, ..., u_{n+k})$ definiert. Bei einem „offenen" B-Spline sind die ersten k Werte gleich und die letzten k Werte gleich.



$$\vec{S}(u,v) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} \vec{d}_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v)$$

Abbildung 2.24: B-Spline-Kurven bzw. -Flächen nach de-Boor [Blaurock, 2004]

B-Spline-Repräsentation ist eine reguläres oder nicht reguläres (non-uniform) x,y-Gitter der Kontrollpunkte. Nur die z-Koordinaten der Kontrollpunkte werden variiert [Nuckelt, 2007]. NURBS-Flächen sind abhängig von dem Kontrollgitter, den Gewichten und dem gewählten Grad der Basisfunktionen.

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} d_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v) w_{ij}}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} N_{ik}(u) N_{jl}(v) w_{ij}} \tag{2.4}$$

Die hohe Flexibilität der Splines wird durch eine hohe Anzahl zu bestimmender Parameter „erkauft" [Holst, 2015]. Eine ausführliche Darstellung der Herleitungen sowie dem Einsatz von NURBS für die spezielle Anwendung im Reverse Engineering liefern Piegl et al., [1997] und Farin et al., [2002]. Bureick et al., [2016] geben einen Überblick der Vorgehensweise bei der Modellierung der gitterbasierten Freiformflächenbeschreibungen aus geodätischer Sichtweise. Es werden verschiedene Strategien zur Auswahl der Kontrollpunkte sowie ein eigener Algorithmus dargestellt. Zusammen mit der Bestimmung der Gewichte und Auswahl der Basisfunktionen können dabei Modelle entstehen, die zu stark generalisieren oder eine Überanpassung an die Daten zur Folge haben. Bureick et al., [2016] beschreiben zwei Kriterien die zur Bestimmung der Anzahl freier Parameter einer Approximation genutzt werden können. Diese bewerten den Kompromiss der Komponenten der Approximationsabweichungen (Bias und Varianz) als Basis für die Modellwahl. Die Autoren zeigen auch auf, dass im Bereich der Approximation

verrauschter Daten mit NURBS-Flächen noch Forschungsbedarf besteht. Die optimale Bestimmung der Gewichte, Algorithmen, die mit großen Punktwolken umgehen können und die Verarbeitung verstreuter Datenpunkte sind nach wie vor Forschungsthemen [Bureick et al., 2016]. Aufgrund der Verfügbarkeit in den Standardprogrammen zum Reverse Engineering existieren Anwendungsbeispiele, die das Potential zur Bestimmung von Verformungen aufzeigen.

Den Einsatz von NURBS zur Modellierung von TLS-Daten beschreiben Grimm-Pitzinger et al., [2005] um Deformationen an einer Talsperre zu bestimmen. Die Kontrollpunkte werden auf Basis der Messdaten geschätzt. Wie das Gitter der Kontrollpunkte angelegt ist, wird nicht beschrieben. Die Autoren führen auf, dass das Messrauschen durch Ersetzen der Einzelpunkte mit einer analytischen Fläche von 7 mm auf ca. 3 mm reduziert werden konnte. Die Restabweichungen enthalten die Oberflächenrauheit und verbleibende Abweichungen aus der Flächenberechnung.

In Eling, [2009], Neuner et al., [2016] und Wunderlich et al., [2016] werden weitere geodätische Anwendungsbeispiele aus der Deformationsvermessung beschrieben. Eling, [2009] weist auf die sehr aufwendige und schwierig zu automatisierende Modellierung hin. Bei der praktischen Anwendung von Approximationsschemata ist dabei ein Kompromiss zwischen der Güte der Approximation und der Glattheit erforderlich [Schütze, 1998]. Dies ist umso schwieriger, wenn bei der vollständigen Beschreibung einer Gesamtfläche lokale Abweichungen berücksichtigt werden sollen.

Im Bereich der Industrievermessung nutzen Grewe et al., [2014] terrestrische Laserscanner zur Steuerung des Spachtelprozesses bei Megayachten. Aufgrund der Fertigungsabweichungen ist die Nutzung des ursprünglichen CAD-Modells nicht ausreichend, um die Spachtelschicht zu optimieren. Auf Basis von TLS-Daten werden NURBS-Flächen genutzt, um eine möglichst strakende Fläche aus den Scandaten zu erzeugen. Diese Fläche wird zur Erstellung eines einhüllenden Modells genutzt, dass die durch Materialauftrag zu erreichende Oberflächenbeschreibung darstellt (Opt-Soll). Für die Berechnung der Spachtelvorgaben an definierten Positionen nutzen Grewe et al., [2014] eine geometriebezogene Datenmodellierung (siehe Abbildung 2.25.

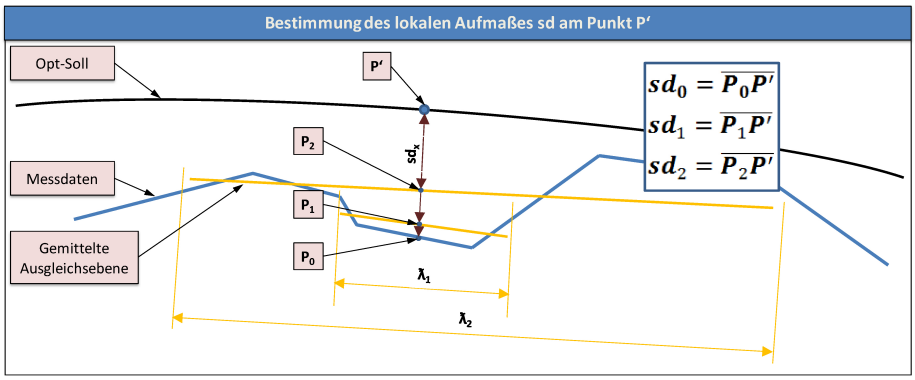


Abbildung 2.25: Ansatz zur lokalen Approximation mittels Ebenen [Grewe, 2014]

Durch die Nutzung einer lokalen Ebene kann eine Filterung der Messdaten erreicht werden. Grewe et al., [2014] beschreiben auch die Schwierigkeiten bei der Wahl der Basislänge. Bei großen Basislängen können mehr Punkte in den Schätzprozess einbezogen werden, gleichzeitig erhöht sich aber die Approximationsabweichung des Modells aufgrund der Krümmung der Oberfläche. Für die Prüfung von Bauteilen mit hohen Genauigkeitsanforderungen oder stärkeren Krümmungen ist der Modellansatz nicht mehr geeignet. Abbildung 2.26 zeigt die Verteilung der Residuen am Beispiel zur Ermittlung einer örtlichen Formabweichung auf einer Schiffsaußenhaut.

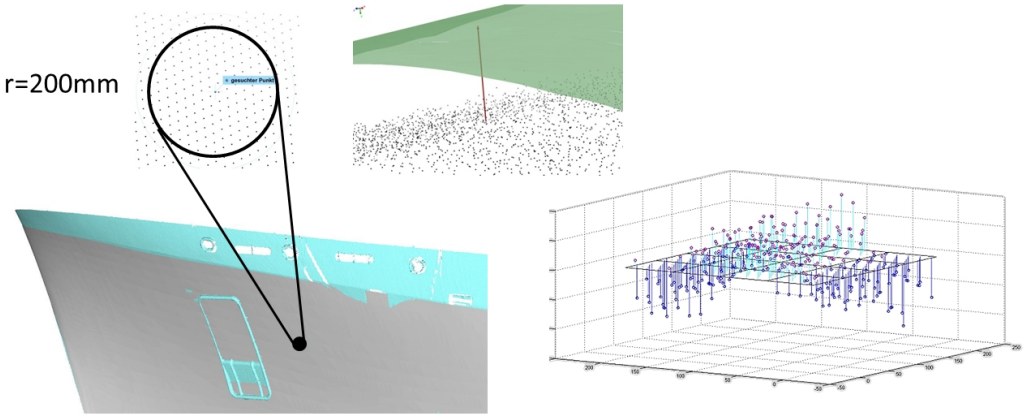


Abbildung 2.26: Residuenanalyse der lokalen Ebene an einem definierten Punkt zur Steuerung des Spachtelprozesses [Geist et al., 2015]

Auf die Modellierung eines hochgenauen Ist-Modells des gesamten Schiffes wird bewusst verzichtet. Zum einen ist die Flächenmodellierung von vollständig krümmungsstetigen Patches auf der Basis von realen Messdaten sehr aufwendig und würde hochauflösende Kurvennetzwerke sowie eine starke Abstraktion des Ist-Zustandes erfordern [Grewe, 2014]. Zum anderen kann die Nutzung lokaler Modelle im Bereich der zur Fertigungssteuerung relevanten Positionen den Auswerteaufwand erheblich reduzieren. NURBS haben zwar lokale Approximationseigenschaften. Problematisch ist in der Praxis das Layout einzelner Flächenabschnitte, also die Abgrenzung der Parameterbereiche. Dies ist nicht vollständig automatisiert und muss in der Regel händisch korrigiert werden [N. Pfeifer et al., 2007]. Bole, [2014] beschreibt typische Flächendefekte und Artefakte, die bei der NURBS-Modellierung realer Schiffsoberflächen entstehen können. Edessa, [2016] setzt sich intensiv mit der Fragestellung der Bereinigung solcher Flächendefekte bei automatischen Reverse-Engineering-Prozessen technischer Großstrukturen auseinander. Die aufgezeigten lokalen Abweichungen angrenzender Flächen liegen im Zentimeterbereich.

Wird eine Filterung nur im Bereich der minimalen und maximalen Abweichungen oder an durch Normen und Spezifikationen vorgegebenen Punkten benötigt, können lokale Modelle genutzt werden. Lokale Modelle haben den Vorteil, die zu verarbeitete Datenmenge auf das Wesentliche (die Abweichungen an den Prüfpunkten) zu reduzieren

und gleichzeitig die Ergebnisse zu verbessern [Seiler, 2012]. Ein Lösungsansatz zur lokalen Approximation optisch glatter Bauteile können nicht-parametrische bzw. semi-parametrische Modelle darstellen, bei denen nur gewisse Regularitätsvoraussetzungen angenommen werden, z. B. die Stetigkeit der Oberfläche.

Werden bei der Datenauswertung sich überlagernde Punktwolken genutzt, können durch die ungleichmäßige Verteilung zusätzliche Verzerrung bei der Parameterschätzung entstehen. Holst, [2015] analysiert umfangreich die Auswirkungen von ungleichmäßigen Punktverteilungen am Objekt bei der Approximation von TLS-Daten. Für den Fall unregelmäßiger Daten sind die sogenannten gitterfreien Methoden (Scattered Data Verfahren) entwickelt worden. Die Vorteile gegenüber gitterbasierten Verfahren sind nach Kaufmann, [1982], Godzierz, [2007], Pfeiffer, [2011], Antoni et al., [2012], Seiler, [2012]:

- Die Berechnung ist an frei wählbaren Stützstellen möglich und somit nicht an eine Gittertopologie gebunden.
- Es kann eine sehr hohe Rechengenauigkeit bei einem relativ kleinen Rechenaufwand erreicht werden.
- Sie sind skalierungsinvariant.
- Die Approximationen weisen weniger bzw. schwächere ungewollte Schwingungen auf, das heißt, dass die Modelle weniger unnötige Oszillationen aufweisen.
- Es wird eine hohe Zuverlässigkeit bei beliebiger Punktverteilungen erzielt, was insbesondere bei sich überlagernden Punktwolken vorteilhaft ist.
- Es sind keine aufwendigen Rechnungen nötig, um die Basisfunktionen zu bestimmen.

Die Vorteile der gitterfreien Methoden sollen in dieser Arbeit zur Bestimmung der Formabweichungen an definierten Prüfstellen genutzt werden. Eine ausführliche Beschreibung und die Darstellung der Grundlagen zu den Methoden erfolgen in Kapitel 5.

2.5 Defizite bei der flächenhaften Bewertung beliebig gekrümmter Oberflächen von Großstrukturen

2.5.1 Instrumentenprüfung terrestrischer Laserscanner

Terrestrische Laserscanner werden hauptsächlich im geodätischen Bereich eingesetzt. Entsprechend existieren eine Vielzahl von Arbeiten die zum Verständnis der Systeme beigetragen haben. Der Fokus liegt in der Beurteilung der Geräte in Anlehnung an die ISO 17123 auf der Ermittlung der Instrumentengenauigkeit gegenüber der Spezifikation

[Hennes, 2010]. Die Übertragung von Prüfverfahren flächenhafter Nahbereichssysteme hat dazu geführt, dass Prüfkörpergrößen deutlich reduziert und Kenngrößen angepasst werden. Dies hat zur Folge, dass die vorgeschlagenen Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner zur Beurteilung der Formtreue und somit zur Angabe der Unsicherheit von örtlichen Formabweichungen nicht geeignet sind. Einerseits wird nur die erreichbare Maßhaltigkeit eines speziellen Auswertungsresultats bei Einpassung regelgeometrischer Elemente geprüft. Andererseits werden Prüfkörper mit idealen Reflektionseigenschaften benutzt, so dass eine Übertragbarkeit auf die Anwendung nur eingeschränkt gegeben ist. Aussagen zur formtreuen Abbildung und somit zur Prüfbarkeit von Formtoleranzen lassen sich aufgrund des lokalen Charakters der Prüfkörper mit den vorgeschlagenen Kenngrößen nicht ableiten. Für den Einsatz der Geräte in der industriellen Messtechnik steht die Eignung des Messsystems für die Ermittlung von Prüfmerkmalen im Vordergrund, wie sie z. B. in der DIN 14253 „Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen“ verfolgt wird. Als Defizit stellt sich insbesondere die Trennung systematischer und zufälliger Abweichungen dar.

Bisher konzentriert sich die Forschung im geodätischen Bereich auf die Modellierung der Instrumentenabweichungen zur Ableitung von 3D-Punktgenauigkeiten. Untersuchungen zur Verwendbarkeit von Laserscanner für spezielle Aufgabenstellungen, wie sie im Bereich der Koordinatenmesstechnik durch die Ermittlung von Prüffähigkeiten und Messsystemanalysen für definierte Szenarien genutzt werden, existieren für TLS nicht. Das liegt u. a. daran, dass in einem Großteil der Untersuchungen versucht wird, dass gesamte Entfernungsspektrum der Systeme abzudecken. Praktische Erfahrungen, die sich mit den Ausführungen anderer Autoren decken, wie z. B. durch Holst et al., [2014b] beschrieben, lassen ein wesentlich größeres Genauigkeitspotential von TLS bei objektbezogenen Betrachtungen vermuten.

Vereinzelt gibt es Bemühungen das Potential der Geräte für objektbezogene, flächenhafte Anwendungen abzuschätzen. Eine Quantifizierung von nachweisbaren Formabweichungen wird von [Neitzel et al., 2010] dargestellt. In einem Laborversuch werden mit Hilfe einer Feinmessschraube definierte Verschiebungen einer weißen, matten Zieltafel erzeugt, die durch eine ausgleichende Ebene repräsentiert wird. Die Untersuchungen bestätigen, dass durch eine geeignete Modellierung eine erhebliche Genauigkeitssteigerung deutlich unter der Systemgenauigkeit erzielt werden kann.

2.5.2 Flächenhafte Analysen zur Toleranzprüfung und Ableitung objektbezogener, geometrischer Qualitätsgrößen

Messtechnisch gilt die Transformation von der punktuellen Messung hin zur flächenhaften Erfassung von Objekten großer Ausdehnung zwar als vollzogen, von der Modellseite ist aber immer noch ein großes Entwicklungspotential vorhanden [Holst, 2015]. Bei der Form- oder Deformationsanalyse ist die Bewertung lokaler Abweichungen von der Sollgeometrie die eigentliche Zielstellung der Modellierung. Diese Abweichungen werden

nur an Einzelpunkten oder mit Hilfe lokaler Ebenen analysiert. Zum Nachweis unbekannter Formabweichungen an industriell gefertigten Freiformflächen ist der Einsatz flexibler Modelle, die ohne eine äußere Parametrisierung in Form von Knotenvektoren auskommen, wünschenswert. NURBS-Modelle verfügen über ein Höchstmaß an Flexibilität. Diese Verfahren sind jedoch konzipiert um neue Objekte zu konstruieren und nicht für die Approximation vorgegebener Punkte [Nuckelt, 2007]. Die Aufstellung eines mathematischen Modells mit B-Splines und Minimierung der Abweichungsquadrate ohne Berücksichtigung von Glattheitsforderungen führt bei der Filterung verrauschter Messdaten zu unerwünschten Ergebnissen und Oszillation der Modellkurven bzw. -flächen [Maresch, 2006].

Für die Formanalyse von Großstrukturen gilt es alternative Verfahren zu untersuchen, die an den durch die Fertigung geforderten oder durch Normen definierten Prüfpunkten eine Filterung der Messdaten ermöglichen. Ansätze durch räumlich begrenzte Parametrisierungen berücksichtigen nur ungenügend die Vorinformation, dass es sich um harmonische, oftmals optisch als glatt begutachtete, Flächenverläufe handelt. Holst, [2015] weist nach, dass die ungleichmäßige Punktverteilung in Kombination mit limitiertem Modellwissen zu einer suboptimalen Konfiguration bei der Approximation von Oberflächen führt. Um Laserscanner zur Steuerung von Fertigungsprozessen oder Aufgabenstellungen der geometrischen Qualitätssicherung einzusetzen, sind belastbare Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit objektbezogener Qualitätsmerkmale und die prozesssichere Bestimmung lokaler Formabweichungen notwendig.

3 Formanalyse

In vielen Bereichen hängt die Güte eines Produkts mit der Qualität seiner Oberfläche zusammen. Die Herstellung hochwertiger Oberflächen stellt aufgrund von visuellen oder technischen Anforderungen eine Herausforderung für die industrielle Fertigung dar. Bei der Herstellung der Oberflächen können Materialtoleranzen oder Schwankungen im Prozess zu unerwünschten Formabweichungen, wie Beulen, Dellen und langwelligen Abweichungen vom gewünschten Strakverlauf führen.

Ziel des Einsatzes von Systemen zur Oberflächeninspektion ist die Ermittlung und Analyse dieser Deformationen. Zur Oberflächenprüfung setzen sich verstärkt optische Messverfahren durch, da sie berührungslos arbeiten und vielfältige Möglichkeiten zur Online-Fehlererkennung und -klassifikation bieten. Abhängig von der Güte der eingesetzten Instrumente werden unterschiedliche Auflösungen im Hinblick auf die Fehlergröße erreicht.

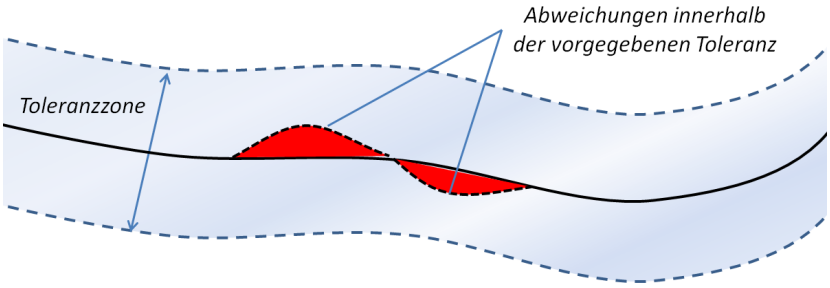


Abbildung 3.1: Prinzipdarstellung zu detektierender Abweichungen bei der Formanalyse (in Anlehnung an [Micro Epsilon, 2016]

Bei der Formanalyse mittels TLS ergeben sich dabei zwei wesentliche Herausforderungen:

- Die zu detektierenden Abweichungen haben oftmals eine Größenordnung, die wesentlich kleiner ist, als die Toleranz der Bauteile (siehe Abbildung 3.1). Lokale Abweichungen bleiben im Verborgenen oder werden dem Messrauschen zugeschrieben.
- Die optische Begutachtung flächenhafter Vergleiche mittels Falschfarbendarstellung führt häufig zu einer subjektiven Bewertung, die von vielen Faktoren abhängig ist. Es werden Verfahren benötigt, die eine reproduzierbare und objektive Bewertung der Abweichungen vornehmen.

3.1 Örtliche Formabweichung als Prüfmerkmal

Die Angabe der Formabweichung beschreibt die aufgrund des Fertigungsprozesses auftretenden Abweichungen einer Prüffläche von der Sollform. Die Flächenformabweichung ist in der DIN 1101 definiert als die Summe der Beträge der größten positiven und negativen Abweichung. Durch die reine Angabe eines Höchstwertes kann allerdings nur begrenzt die Ursache für Formabweichungen identifiziert und die Steuerung von Fertigungsprozessen realisiert werden. Hernla, [1994] definiert die Anforderungen an Prüfmerkmale und Toleranzen wie folgt:

1. Eindeutige und widerspruchsfreie Definition der Prüfmerkmale
2. Funktionsgerechte Prüfmerkmale: sie sollen die Anforderungen an die Werkstückoberfläche qualitativ und quantitativ richtig beschreiben
3. Fertigungsgerechte Prüfmerkmale: sie sollen das Erkennen von Abweichungsursachen und das Ableiten von Korrekturwerten ermöglichen

Die Definition funktions- und fertigungsgerechter Prüfpunkte erfolgt für die Toleranzprüfung von Freiformflächen durch Sollpunkte, die auf der CAD-Oberfläche festgelegt und anschließend gemessen werden. Durch den Soll-Ist-Vergleich der Sollgestaltbeschreibung mit den erfassten Ist-Werten werden lokale Formabweichungen ermittelt [Weckenmann et al., 2007].

Diese örtlichen Formabweichungen sind für viele industriell gefertigte Großstrukturen durch entsprechende Normen und/oder Spezifikationen festgelegt. Sie können sich aber auch aus den Forderungen des Fertigungsprozesses ergeben und in entsprechenden firmenspezifischen Regeln umgesetzt sein. Die Flächenformtoleranz kann je nach Funktion des Bauteils unterschiedliche Werte entlang einer Fläche annehmen. Insbesondere bei aerodynamisch und hydrodynamisch optimierten Flächen sind Prüfpunkte entlang von Schnitten definiert. Die örtliche Flächenformtoleranz richtet sich dann nach den strömungsmechanischen Eigenschaften. Aufgabe der Formanalyse ist die Prüfung der örtlichen Formabweichungen gegenüber den festgelegten Toleranzen. Für die Prüfbarkeit von Toleranzen ist die Messunsicherheit der Messung von entscheidender Bedeutung. Die Messunsicherheit ist bei jeder Toleranzprüfung zu berücksichtigen.

3.1.1 Definition der Messgröße

Die Flächenformabweichung dient zur Ermittlung von Gestaltabweichungen 1. Ordnung. Die Toleranzzone für die Formabweichung einer beliebigen Fläche ist in der DIN 1101 definiert als:

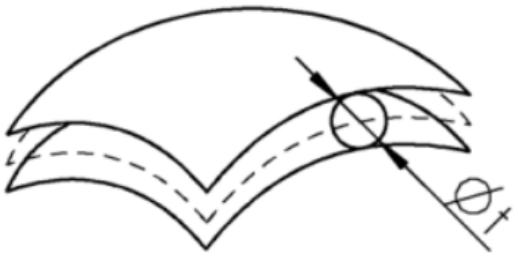
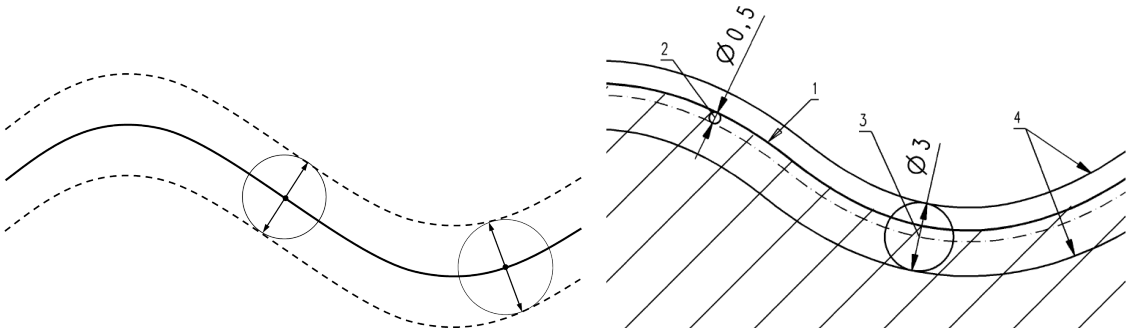


Abbildung 3.2: Toleranzzone der Flächenformabweichung

> Der Bereich, der durch zwei Flächen begrenzt wird, die Kugeln vom Durchmesser t einhüllen und deren Mittelpunkte auf der Fläche mit der theoretisch exakten Form liegen [DIN 1101, 2014]. (siehe Abbildung 3.2)

Die Toleranz ist eingehalten, wenn alle Messpunkte innerhalb der festgelegten Toleranzzone liegen. Für den Bereich der Übereinstimmung ist die Messunsicherheit zu berücksichtigen. Aufgrund der Kenngröße Flächenformabweichung können jedoch noch keine Aussagen über die Form der erfassten Oberfläche getroffen werden.

Für die Formtoleranzen der Rundheit, Geradheit, Ebenheit und Zylindrizität ist die örtliche Formabweichung definiert als kürzester Abstand eines Punktes auf der Oberfläche zu einem Referenzelement, das nach festen Regeln in die Oberfläche eingepasst ist [Normenreihe DIN 12180-1; DIN 12181-1; DIN 12780-1; DIN 12781-1]. Der kürzeste Abstand entspricht der Abweichung entlang des Normalvektors eines Geometrieelementes. Ausgehend von der Definition folgt, dass die zu ermittelnde örtliche Formabweichung für einen festgelegten Prüfpunkt dem Abstand entlang des Oberflächennormalenvektors der Fläche entspricht. Der Prüfpunkt und die Oberflächennormale sind durch das CAD-Modell eindeutig definiert (siehe Abbildung 3.3). Die Formabweichung an definierten Prüfstellen ergibt sich durch den Schnittpunkt mit der wahren Oberfläche.



(a) gesuchte Abweichung (b) Tolerierungsbeispiel

Abbildung 3.3: Prüfpunkt und zu ermittlende Formabweichung

Diese ist bei scannenden Messsystemen durch eine Vielzahl von Punkten beschrieben. Es ist aber nicht möglich, wie bei der taktilen Prüfung, den Abstand direkt zu messen. Bei TLS-Messungen sind in der Regel Punktabstände im Bereich mehrerer Millimeter zu erwarten. Durch eine geeignete Interpolation bzw. Approximation F der wahren Oberflächengestalt kann der Schnittpunkt S ermittelt werden (siehe Abbildung 3.4). Gleichzeitig kann eine Filterung der Messwerte durch dieses Vorgehen erreicht werden.

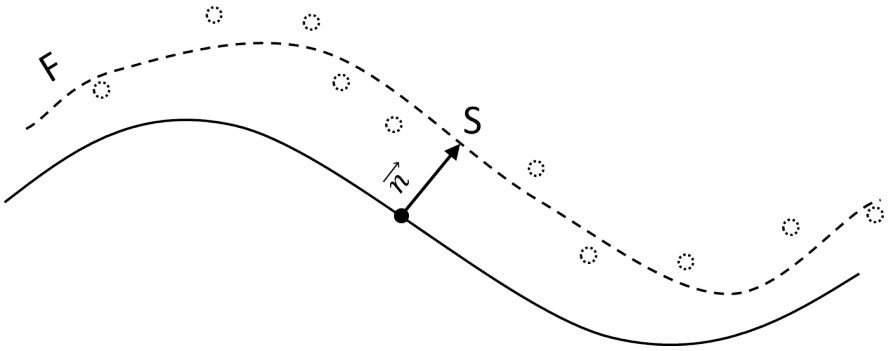


Abbildung 3.4: Gesuchte Abweichung von der Solloberfläche

Das mathematische Modell zur Bestimmung der lokalen Formabweichungen t_{lokal} ergibt sich somit zu:

$$t_{lokal} = S + \lambda \vec{n} \cap F \tag{3.1}$$

In der Praxis wird oftmals nur der Abstand des nächstliegenden Messpunktes zur Soll-Oberfläche bestimmt. Es handelt sich dann um eine nicht kontrollierte, nicht reproduzierbare Messung mit unbekannter Messunsicherheit [Eling, 2009].

3.1.2 Messunsicherheit der örtlichen Formabweichung

Das mathematische Modell der örtlichen Formabweichung ergibt sich als Abstand der Ist-Oberfläche von der Soll-Oberfläche entlang des Normalenvektors des spezifizierten Prüfpunktes. Die Messunsicherheit des Abstandes ist u. a. abhängig von den Regeln zur Einpassung des Soll-Elementes und der verwendeten Approximation der Fläche. Wird dieselbe Oberfläche mit verschiedenen Regeln zur Einpassung und verschiedenen Verfahren zur Beschreibung der wahren Gestalt ausgewertet, sind die mathematischen Modelle prinzipiell voneinander verschieden. Deshalb können die verschiedenen Ergebnisse und die zugeordneten Messunsicherheiten nur bedingt miteinander verglichen werden [Neugebauer, 2013]. Die Regeln zur Einpassung des Referenzelementes sind aufgabenspezifisch zu bewerten und zumeist in den Spezifikationen festgelegt.

Darüber hinaus haben die zufälligen und systematischen Instrumentenabweichungen des verwendeten Messsystems Einfluss auf die Messunsicherheit der örtlichen Formabweichungen. Werden Messunsicherheiten dabei nur über teilweise unbekannte analytische

Zusammenhänge abgebildet, entstehen folgende Probleme bei der Anwendung zur Toleranzprüfung im Fertigungsprozess:

- Jede nicht erkannte Unsicherheit ist ein verzögertes Problem, das in der Anwendung zum Tragen kommt.
- Nicht erkannte systematische Abweichungen führen zu Folgekosten sowie Misstrauen gegenüber der Technik.
- Systematische Abweichungen oder eine erhöhte Streuung der Messwerte werden dem Fertigungsprozess zugeschlagen. Prozessoptimierungen würden an der falschen Stelle ansetzen und erhebliche Mehrkosten verursachen.

Eine Unterteilung der Messunsicherheit nach den Ursachen kann in grobe Fehler, zufällige und systematische Messabweichungen vorgenommen werden [Weissensee, 2011]. Grobe Messabweichungen sind durch Sorgfalt, Kontrolle und Plausibilitätsprüfungen zu vermeiden. Sie beruhen meist auf Irrtümern, ungeeigneten Messbedingungen, defekten Geräten oder menschlichen Fehlern. Sie gelten prinzipiell als vermeidbar. Bei der Messung mit terrestrischen Laserscannern können grobe Fehler nur selten vor Ort erkannt werden. Bei Einzelpunktmessungen gibt es keine Möglichkeit grobe Abweichungen zu erkennen, da der wahre Wert unbekannt ist [Weissensee, 2011]. Gerade im industriellen Umfeld ist es für Anwender dabei umso wichtiger, grobe Fehler, die durch Unzulänglichkeiten des Messgerätes selbst hervorgerufen werden, durch Prüfung der Geräte zu detektieren.

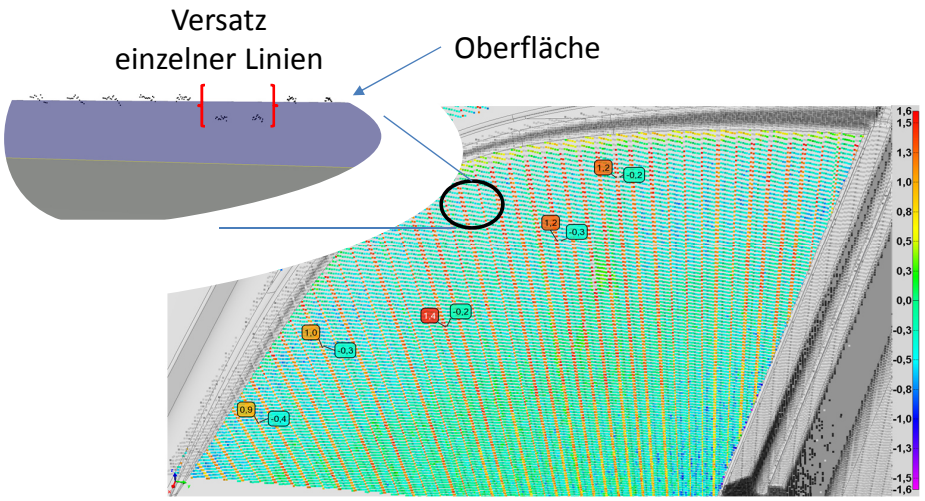


Abbildung 3.5: Grobe Fehler im Scan hervorgerufen durch einen elektronischen Fehler

Abbildung 3.5 zeigt grobe Fehler im Datenmaterial eines Z+F Imager 5010 hervorgerufen durch einen elektronischen Fehler. Bei der Messung einer optisch glatten Fläche weichen einzelne Linien des Scans deutlich bis zu 2 mm von den umgebenden Daten ab. Bei Prüfkörpern mit einer zu kleinen Ausdehnung kann die Detektierbarkeit der Fehlfunktion

des Instrumentes zumindest angezweifelt werden. METTENLEITER et al., [2015] leiten für den Z+F Imager 5010 eine 3D-Gesamtunsicherheit von ±2 mm (ohne Distanzrauschen) für eine Entfernung von 10 m her. Der dargestellte Fehler entsprechen nach dieser Betrachtung der Spezifikation. Die Fähigkeit des Instrumentes, die Fläche formtreu abzubilden, ist jedoch nicht gegeben.

Systematische Abweichungen verfälschen das Messergebnis in einer gesetzmäßigen Weise [JCGM, 2012]. Sie sind oftmals im Messsystem selbst begründet und können hervorgerufen werden durch unzureichende Justierung, äußere Einflüsse auf das Messgerät oder den Einfluss des Bedieners. Die Wirkung systematischer Messabweichungen ist meist schwerwiegender als die Wirkung zufälliger Messabweichungen, welche das Ergebnis unsicher machen [WEISSENSEE, 2011]. Die Ermittlung systematischer Abweichungen stellt für Laserscanner eine besondere Herausforderung dar. Systematische Abweichungen gehen oftmals im Messrauschen unter oder werden den zufälligen Messabweichungen zugeordnet.

Als zufällige Abweichungen werden ungleichsinnig wirkende unvermeidbare Abweichungen bezeichnet. Positive und negative Werte treten gleich häufig auf. Die Einflüsse zufälliger Messabweichungen lassen sich durch Wiederholungsmessungen und Mittelbildung sowie durch Überbestimmung der Messelemente reduzieren [SCHWARZ, 2004]. Bei Laserscannern werden diese Abweichungen üblicherweise als Messrauschen bezeichnet.

Eine vereinfachten Betrachtungsweise der Komponenten der Messunsicherheit ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Erkannte systematische Abweichungen können zur Verbesserung des Messergebnisses beitragen. Unbekannte systematische Abweichungen und Restabweichungen aus Kalibrierungen zusammen mit den zufälligen Anteilen bilden die dem Messergebnis zuzuordnende Messunsicherheit [HERNLA, 1996].

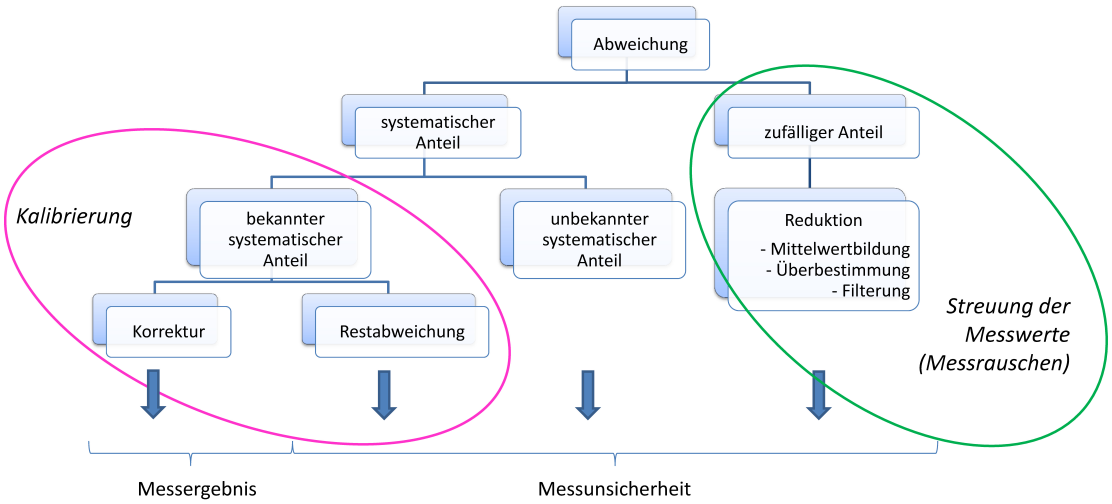


Abbildung 3.6: Komponenten der Messabweichungen und ihre Berücksichtigung bei der Ermittlung des Messergebnisses sowie der Messunsicherheit

Auf Seiten des Messmodells führen darüber hinaus scannerinterne Abweichungen und vernachlässigte Korrelationen zu auftretenden Unsicherheiten [Holst, 2015]. Für das Objektmodell gilt dies aufgrund von Unschärfe und Unvollständigkeit der Modellbildung. Unschärfe bezeichnet die unsichere Kenntnis über die Wirklichkeit, z. B. systematische Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung [Neumann, 2009]. Die Einführung der Begriffe für geodätische Anwendungen erfolgte durch H.Kutterer [Holst, 2015]. Ihre Berücksichtigung kann durch eine erweiterte Unsicherheitsmodellierung für Parameterschätzungen in linearen Ausgleichsmodellen erfolgen. Dabei werden zusätzliche Modellunsicherheiten zu Beschreibung verschiedener Arten von Messunsicherheiten eingeführt. Anstelle des Kleinste-Quadrate-Schätzers werden systematisch wirkende Unsicherheiten getrennt von den zufälligen Abweichungen im Ausgleichsmodell eingeführt. Dies kann über die Intervallmathematik oder die Fuzzy-Theorie [Neumann, 2009] erfolgen. Ziel der Arbeiten ist eine adäquate Trennung, Berücksichtigung und Modellierung systematischer Abweichungen sowie eine realistische Beurteilung der zu erwartenden Messunsicherheiten, wie sie für interdisziplinäre Zusammenarbeiten durch den Leitfaden „Leitfaden zur Bestimmung der Messunsicherheit beim Messen“ (GUM) gefordert wird.

Für die Bestimmung der Messunsicherheit erschien im Jahr 1993 die erste Version des GUM. Dieser Leitfaden hat zum Ziel ein einheitliches Vorgehen bei der Ermittlung von Messunsicherheiten zu gewährleisten. Im Folgenden sollen die Möglichkeiten des Leitfadens zur Abschätzung der Messunsicherheit der Ergebnisse einer TLS-Messung dargestellt werden.

3.1.3 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen

Der Leitfaden wird verwendet, um die Messunsicherheit einer Messgröße aus dem kompletten Messunsicherheitsbudget abzuleiten. Der GUM liefert eine durch Bayes-Statistik begründete Methode zur Integration von systematischen Effekten in die Angabe der Messunsicherheit. Mit der klassischen geodätischen Herangehensweise, der Korrektur der systematischen Abweichungen und der Angabe einer empirischen Standardabweichung als Genauigkeitsmaß, kann der steigenden Komplexität der Messinstrumente und der zunehmenden Bedeutung systematischer Effekte nur unzureichend Rechnung getragen werden [Gordon, 2008]. Das komplexe Zusammenspiel der Komponenten eines Laserscanners, das ungenügende Wissen über den Aufbau der Instrumente und die mangelnde Berücksichtigung äußerer Einflüsse hat oftmals eine zu positive oder zu negative Abschätzung der Messunsicherheit zur Folge.

Standardverfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit

Der GUM stellt ein umfassendes Regelwerk zur Ermittlung der Messunsicherheit dar. Grundlage der Vorgehensweise ist, dass nach der Beseitigung aller erkannten systematischen Einflüsse keine weitere Differenzierung zwischen systematischen und zufälligen Messabweichungen mehr stattfindet [Weissensee, 2011]. Das Standardverfahren nach

GUM geht von einer mathematischen Modellgleichung aus, bei der alle Größen, die an der Messung beteiligt sind, in einen funktionalen Zusammenhang gebracht werden.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, ...) \tag{3.2}$$

Die Messunsicherheit der Größe Y setzt sich zusammen aus den Unsicherheitsbeträgen aller Eingangsgrößen X_i. Dies sind alle Größen, die den Messprozess beeinflussen können. Das Standardvorgehen nach GUM beinhaltet sieben wesentliche Teilschritte [Sommer et al., 2014; Weissensee, 2011]:

1. Beschreibung der Messaufgabe sowie Definition der zu messenden Größe Y.
2. Zusammenstellung aller Kenntnisse über den Messprozess, die beteiligten Eingangsgrößen und Aufstellung des Ursache-Wirkung-Zusammenhangs sowie eine Korrektur der systematischer Abweichungen.
3. Modellierung der funktionalen Beziehungen der Eingangsgrößen einschließlich der Berücksichtigung aller wesentlichen Korrelationen.
4. Charakterisierung der Eingangsgrößen durch Angabe ihrer Erwartungswerte und ihrer Standardunsicherheiten unter Kenntnis/Annahme ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung (nach Ermittlungsmethode Typ A oder Typ B).
5. Zusammenfassung aller Einflüsse zur kombinierten Standardunsicherheit unter Berücksichtigung der aus dem Modell abgeleiteten Sensitivitätskoeffizienten.
6. Berechnung der erweiterten Messunsicherheit.
7. Angabe des vollständigen Messergebnisses und Bewertung.

Im Standardverfahren nach GUM werden allen als relevant betrachteten Eingangsgrößen, die Einfluss auf die Messgröße haben, Unsicherheiten zugeordnet. Bei der Ermittlung der Unsicherheit werden zwei Ermittlungsarten unterschieden.

- Unsicherheiten der **Ermittlungsmethode Typ A** beziehen sich auf statistische Analysen von Messreihen unkorrelierter Zufallsgrößen (z. B. die Standardabweichung als Standardunsicherheit).
- Unsicherheiten der **Ermittlungsmethode Typ B** beruhen auf anderen Erkenntnissen. Es werden möglichst alle verfügbaren Informationen über Abweichungen bei der Erfassung von Einflussgrößen berücksichtigt. Dies können Daten aus früheren Messungen, Herstellerangaben, Kalibrierscheine und Zertifikate, Expertenwissen oder andere Quellen sein.

Die Ermittlungsmethode Typ B kommt in der Praxis häufiger vor als die Methode Typ A. Sie kann aber nur für klar identifizierte Einflussgrößen angewendet werden, über die genügend Kenntnisse vorhanden sind [DKD, 2012]. Durch das Aufstellen der funktionalen Zusammenhänge und unter Anwendung des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes können

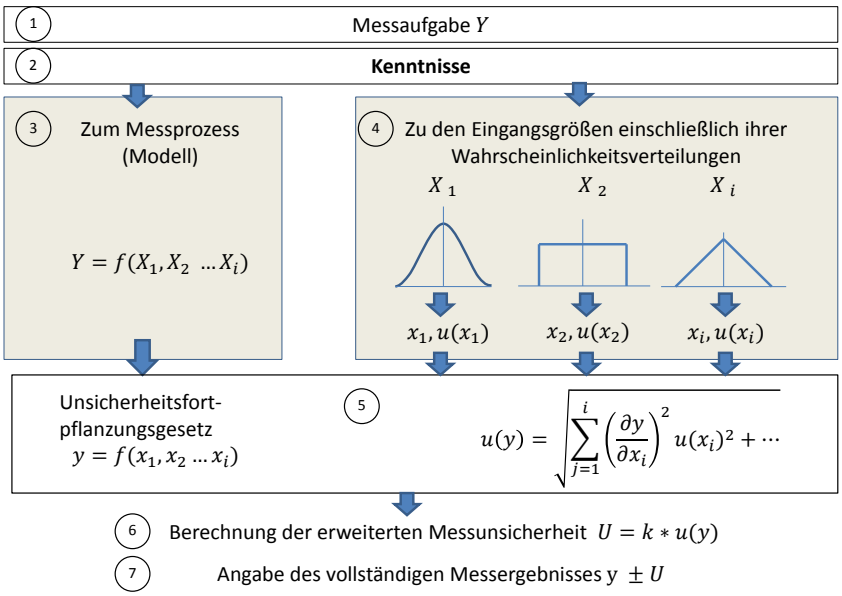


Abbildung 3.7: Vorgehen zur Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit

die Einflussgrößen zur kombinierten Standardunsicherheit zusammengefasst werden (siehe Abbildung 3.7). Unter Berücksichtigung der Korrelationen und Verteilungsfunktionen ergibt sich für die kombinierte Standardunsicherheit:

$$u(Y)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 u_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial f}{\partial X_i} \frac{\partial f}{\partial X_j} u_i u_j r(X_i, X_j) \tag{3.3}$$

mit dem Korrelationskoeffizienten

$$\rho(X_i, X_j) = \frac{u(X_i, Y_i)}{u(X_i) u(X_j)} \tag{3.4}$$

Die kombinierte Standardunsicherheit wird mit einem Erweiterungsfaktor k multipliziert.

$$U = k * u_c \tag{3.5}$$

Es ergibt sich die erweiterte Messunsicherheit U. Der Faktor k wird in Abhängigkeit vom gewünschten Vertrauensniveau gewählt. Kann für die Messgröße eine Normalverteilung angenommen werden, wird standardmäßig der Faktor $k = 2$ für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95.45% (Vertrauensniveau 0.9545) gewählt. Ist hingegen eine dominante Abhängigkeit von einer einzelnen geschätzten Größe gegeben, ist es in der Regel nicht möglich, einfach einen Überdeckungsfaktor von $k = 2$ anzunehmen, um das entsprechende Vertrauensniveau zu erreichen [Pesch, 2003]. Nach Berechnung der erweiterten Messunsicherheit erfolgt die Angabe des vollständigen Messergebnisses.

$$Y = y \pm U_k(k = 2) \tag{3.6}$$

Die Voraussetzungen zur Anwendung des Standardverfahrens nach GUM für TLS-Systeme ist aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Einflussfaktoren auf den Messprozess, unbekannten Korrelationen und den nicht vollständig offen gelegten Funktionsprinzipien nach wie vor Bestandteil der ingenieurgeodätischen Forschung. Bis heute ist es nicht gelungen ein vollständiges stochastisches Modell terrestrischer Laserscans zu entwickeln [Holst et al., 2017]. Folgende Probleme ergeben sich bei der Herleitung der Messunsicherheit einer Formabweichung nach GUM, die auch aus anderen Bereichen bekannt sind [Schwenke, 1999; Schwenke et al., 2000; Weissensee, 2011]:

- Die Herleitung der Modellgleichung ist bei komplexen Messprozessen sehr aufwändig.
- Die analytische Ermittlung von Sensitivitätskoeffizienten bei nichtlinearen Modellgleichungen ist teilweise nicht möglich.
- Die Ermittlung von Korrelationen der Eingangsgrößen ist teilweise nicht möglich (z. B. bei vielfältig korrelierten Messpunkten).
- Die Korrektur der systematischen Abweichungen ist oft problematisch.
- Die Repräsentation von systematischen Messabweichungen und von Kombinationen aus zufälligen und systematischen Messabweichungen als normalverteilte Daten ist in der Literatur oft umstritten.

3.2 Relevante Arbeiten und eigene Untersuchungen

Bei der Beurteilung der Messunsicherheit terrestrischer Laserscanner sind insbesondere zwei Fragestellungen von Interesse [Schulz, 2008].

1. Wie genau ist eine Einzelmessung?
2. Wie genau sind aus der Punktwolke abgeleitete geometrische Größen?

Geodätische Arbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit der Bestimmung der Messunsicherheit einer Einzelmessung. Grundlage für die Bestimmung ist bei fast allen Arbeiten die Annahme, dass es sich bei der TLS-Messung um eine zur Tachymetermessung äquivalente Messung handelt. Ein Ansatz zur Schätzung der Messunsicherheit eines 3D-Punktes für TLS entwickelte Gordon, [2008]. Grundlage ist ein stochastisches Modell in Abhängigkeit von der Entfernung s, dem Auftreffwinkel ϕ und einem konstanten Term, der die Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit und der Oberflächenfarbe zusammenfasst.

$$\sigma^2 = a_0^2 + a_1^2 s^2 + a_2^2(\cot\phi - 2sin(4\phi)) \tag{3.7}$$

Entfernungsabhängige periodische Korrekturen werden nicht berücksichtigt. Stattdessen wird ein sinusförmiger Term dem Auftreffwinkel zugeordnet.

3.2.1 Laboruntersuchung Auftreffwinkel

Um Aussagen über die Messunsicherheit in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel treffen zu können, wurde im Messlabor der Fraunhofer Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik ein eigener Versuchsaufbau realisiert. Für die Untersuchung stand ein Z+F Imager 5010 zur Verfügung.

Abbildung 3.8: Versuchsaufbau im Messlabor der FhG zur Untersuchung der Abhängigkeit der Messunsicherheit vom Auftreffwinkel

Entlang der in Abbildung 3.8 dargestellten Pfeiler des Labors wurden ebene Zielmarken verteilt. Die Ebenheitsabweichung der genutzten Marken der mittleren Reihe ist kleiner gleich 0.1 mm. Für diesen Aufbau ist eine Kombination von hochgenauen Industriemesssystemen zur Erzeugung des flächenhaften Sollmodells des Prüfaufbaues genutzt worden. Zur Digitalisierung der Pfeiler einschließlich der Marken kam ein Streifenlichtprojektor

Tabelle 3.1: Technische Daten: Messsysteme zur Digitalisierung des Prüfaufbaus [Herstellerangaben]

Streifenlichtprojektor			Photogrammetriesystem		
GOM ATOS III 600			Aicon 3D-Systems DPA		
	Scanzeit	ca. 2.0 s		Kamera	Nikon D300s
	Auflösung	2048x2048 (4 Megapixel)		Auflösung	4288x2848 12 Megapixel
	Messfeld-größe	500x500 mm^2		Messbereich	bis ca. 30 m^3
	Punkt-abstand	0.24 mm		Messmarken	Standard
	Mess-genauigkeit (Zertifikat)*	8 µm *spacing* 25 µm *probing* 12 µm *flatness*		Mess-genauigkeit	3 µm+ 7 µm/m *(3Sigma)*

* nach VDI2634

der Firma GOM in Verbindung mit einem Industriephotogrammetriesystem zur Verknüpfung der Aufnahmen zum Einsatz. Die beiden Systeme und ihre Genauigkeiten sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Zusätzlich wurde die photogrammetrische Bündelblockausgleichung mit Passpunkten gestützt. Mittels eines Lasertrackers wurde ein übergeordnetes Referenzsystem für alle Systeme geschaffen. Mit einem Industrietachymeter erfolgte

Tabelle 3.2: Technische Daten: Lasertracker und Präzisionstachymeter [Herstellerangaben]

Lasertracker			Präzisionstachymeter		
Leica AT 901-B			Sokkia Net 05		
	Messvolumen Messrate	60 m 1000 Pkt/s		Messbereich Messrate	1 m bis 200 m Manuell 0,5 s/Punkt
	Messgenauigkeit			Messgenauigkeit	
	volumetrisch	±15 µm + 6 µm/m		Streckenmessgenauigkeit*	Reflektorfolie ±0.1 mm + 1 ppm
				Winkelgenauigkeit	0.5″

* Typische Genauigkeit DMT-Kalibration

die Bestimmung der Zentrumspunkte der Schachbrettzielmarken (siehe Tabelle 3.2). Vorteil des gewählten Versuchsaufbaus ist, dass ein möglichst repräsentatives Spektrum an Auftreffwinkeln in einer Aufnahme abgebildet werden kann. Es besteht keine Abhängigkeit von einer drehbaren Mechanik, wie z. B. in Mechelke et al., [2008]. Nachteilig ist der extrem hohe Aufwand durch die Kombination mehrerer Instrumente und die Tatsache, dass auch der Streifenlichtprojektor nur unzureichende Flächenbeschreibungen der schwarzen Flächen der Schachbrettzielmarken liefert. Werden nur die weißen Bereiche der Zielmarken genutzt, kann trotzdem eine Aussage zur Auftreffwinkelabhängigkeit getroffen werden. Die in Abbildung 3.9 gezeigten Auftreffwinkel wurden bei diesem Versuch realisiert.

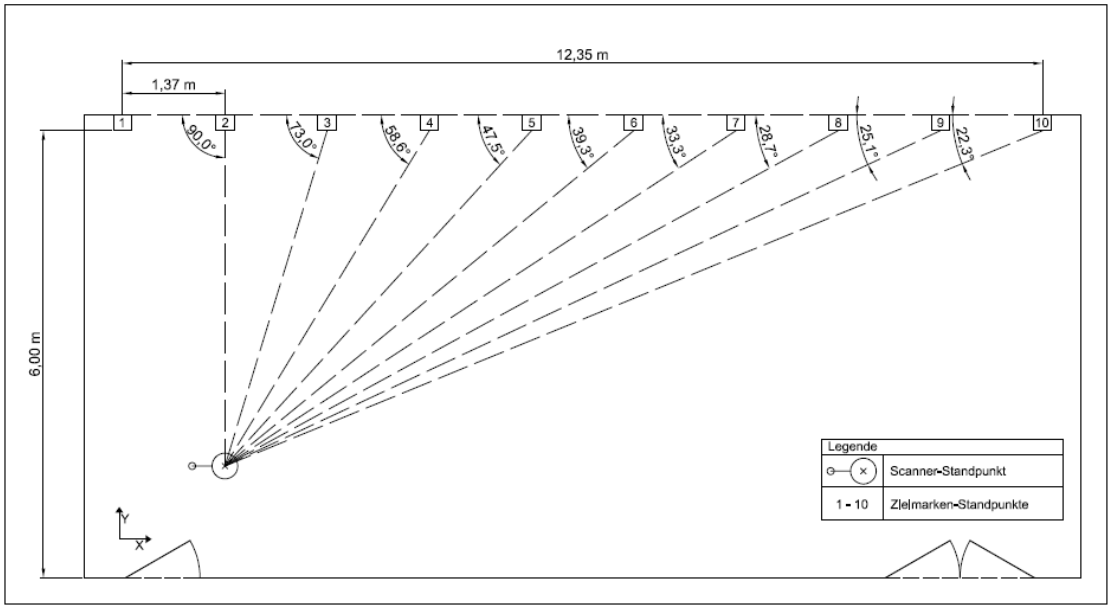


Abbildung 3.9: Auftreffwinkel für den gewählten Versuchsaufbau

In Anlehnung an die lokale Approximation mittels Ebenen kann für ein weißes Feld der Schachbrettzielmarke eine ausgleichende Ebene bestimmt werden. Der Abstand der Schwerpunkte der Ebenen vom Sollmodell liefert Kennwerte in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel. Die in Tabelle 3.3 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass mit dem verwendeten

Tabelle 3.3: Abstände lokaler Ebenen vom Sollmodell des Versuchsaufbaus

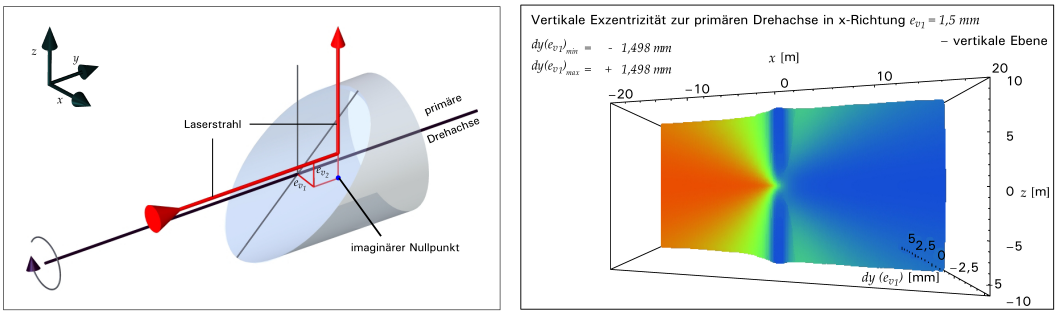
Auftreffwinkel	flächenhaft orthogonaler Abstand Ebene Sollmodell [mm]	punktuell korrespondierender Abstand Zielmarke Tachymeter [mm]
Pfeiler1 73°	0.0 ± 0.3	+0.0
Pfeiler2 90°	0.1 ± 0.3	+0.1
Pfeiler3 73°	0.1 ± 0.2	-0.1
Pfeiler4 59°	-0.1 ± 0.2	-0.2
Pfeiler5 48°	0.1 ± 0.2	+0.4
Pfeiler6 39°	0.1 ± 0.2	+0.5
Pfeiler7 33°	0.1 ± 0.2	+0.4
Pfeiler8 29°	0.2 ± 0.2	+0.4
Pfeiler9 25°	0.3 ± 0.2	+0.2
Pfeiler10 22°	0.2 ± 0.2	+0.2

Laserscanner Messunsicherheiten im 1/10 Millimeterbereich auch bei ungünstigeren Auftreffwinkeln erreicht werden können. Die Anforderungen an Prüfkörper und Prüfverfahren sind entsprechend hoch. Der von Gordon, [2008] aufgestellte funktionale Zusammenhang zwischen Messunsicherheit und Auftreffwinkel kann nicht als allgemeine Formel für Laserscanner mit einem rotierenden Spiegel bestätigt werden.

Ebenfalls in Tabelle 3.3 wird deutlich, dass durch die Nutzung von Zielmarken zusätzliche signifikante Unsicherheiten eingeführt werden, die zu unrealistischen Abschätzungen von Kennwerten bezüglich der Formtreue bzw. Modellierungsgenauigkeit führen. Dies kann bedingt durch den Algorithmus zur Ermittlung des Markenmittelpunktes sein oder durch die schlechten Reflektionsverhältnisse im schwarzen Bereich der Zielmarke. Die Untersuchung von Einflüssen bei der Rückführung auf einen definierten Punkt ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die erreichten Unsicherheiten der flächenhaften Betrachtung decken sich mit den Ergebnissen anderer Autoren. Gielsdorf, [2013] zeigt, dass bei der Ausrichtung von Einzelscans mit korrespondierenden Ebenen ebenfalls Unsicherheiten im Submillimeterbereich erreicht werden können.

In Gordon, [2008] und Holst et al., [2014a] wird versucht die Auswirkungen von Instrumentenabweichungen einzelner Komponenten durch eine flächenhafte Betrachtung zu untersuchen. Beide Autoren nutzen eine Ebene mit einer möglichst großen Ausdehnung, um TLS-Messungen der Fläche zu simulieren.

Gordon, [2008] führt eine Sensivitätsanalyse modellierter Einflussgrößen insbesondere des Achssystems durch. Die Untersuchungen dienen zur Ableitung der Deformationsgröße, die durch Exzentrizitäten und Schiefstellungen zwischen den Rotationsachsen sowie der Strahlführung entstehen. Zusätzlich wird eine fehlerhafte Nullpunktskorrektur bei der Streckenmessung simuliert. In Abbildung 3.10 ist exemplarisch die Deformation der Ebene durch einen Versatz von Strahl und primärer Rotationsachse und der daraus resultierende Abbildungsfehler dargestellt. Aus den dargestellten Ergebnissen wird klar,



(a) Parallelversatz des Laserstrahls (b) Deformation einer ebenen Punktwolke

Abbildung 3.10: Auswirkungen der vertikalen Exzentrizität [Gordon, 2008]

dass Achsabweichungen Verzerrungen der Ebene mit harmonischen Verlauf verursachen. Bei real auftretenden Fehlerbildern sollte es also möglich sein, die Größe der Abweichungen durch eine harmonische Funktion zu beschreiben. Die von Gordon, [2008] gewählte Messkonfiguration (Abstand zur Ebene 1 m) und Fehlergrößen sind bewusst extrem gewählt. Sie kommt zu dem Schluss, dass:

- die untersuchten Instrumentenabweichungen wenig bis keinen Einfluss auf eine horizontale Fläche haben,
- größere Auswirkungen bei frontalen Visuren zu erwarten sind,
- einige Abweichungen sich insbesondere unter kleinem Auftreffwinkel auswirken,
- und einige Einflussgrößen sich sehr ähnlich auswirken. Dies kann zur Folge haben, dass diese sich je nach Vorzeichen aufheben oder verstärken. Eine weitere Folge ist eine erhebliche Korrelation der Einflussgrößen, was sich negativ auf die Signifikanz innerhalb eines Schätzprozesses auswirkt.

Bei entsprechender Rauschreduktion sind somit sehr hohe Genauigkeiten bei der Ermittlung von objektbezogenen Prüfmerkmalen zu erwarten.

Holst et al., [2014b] simulieren ebenfalls systematische Abweichungen eines TLS-Systems auf einer Ebene, allerdings in einer realitätsnahen Messkonfiguration von 10 m Objektabstand. Abstände in dieser Größenordnung sind hauptsächlich aufgrund der Platzverhältnisse in Produktionshallen vorzufinden. Mehr als 20 m sind selten realisierbar. Es werden drei verschiedene Instrumentenabweichungen simuliert. Dazu zählen Abweichungen in der Spiegelgeometrie, Exzentrizitäten zwischen den Achsen und Ausrichtung

der Achsen zueinander. Es ergeben sich Abweichungen der resultierenden Punktwolke von 3 bis 6 mm, dargestellt als Helmertscher Punktfehler und als Abweichung der ursprünglichen polaren Messelemente. Aussagen zur Größenordnung der Abweichungen von der Sollgestalt werden nicht getroffen. Die Fehlerbilder weisen ebenfalls harmonische Flächenverläufe auf.

3.2.2 Untersuchung Farbgebung

Aus der Literatur sind Unverträglichkeiten eines Mensi GS100 Laserscanners mit roter Farbgebung eines Objektes bekannt [Kersten et al., 2005]. Um die Einflüsse der Objektfarbe beurteilen zu können, ist ein Testkörper mit unterschiedlicher Farbgebung genutzt worden. Als Referenzfläche wurde eine Platte mit einer matten Lackschicht präpariert und dabei vier verschiedene Farbtöne mit Lackfarben des selben Herstellers erzeugt. Anschließend wurde die Platte mit einem Streifenlichtprojektor digitalisiert.

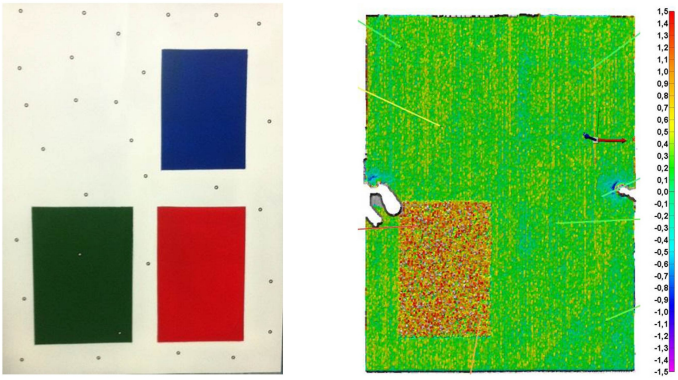


Abbildung 3.11: Farbtafel zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Farben (links), Soll-Ist Vergleich eines Scans (rechts)

Abbildung 3.11 zeigt die Farbtafel und den Soll-Ist-Vergleich zur Aufnahme mit dem Z+F Imager 5010. Im Bereich des grünen Feldes kommt es zu einem erhöhten Messrauschen. Tabelle 3.4 stellt die Ergebnisse der einzelnen Felder gegenüber. Der Versuch zeigt

Tabelle 3.4: Vergleich der Ergebnisse aus der Farbuntersuchung Entfernung 3 m

Farbe	Standardabweichung [mm]	mittlere Abweichung [mm]	Intensitätswert [%]
Rot	0.20	-0.03	67.2
Blau	0.21	-0.01	71.1
Grün	0.66	0.05	25.0
Weiß	0.20	0.01	80.1

eine Vervierfachung des Messrauschens für den grünen Farbbereich. Systematische Abweichungen, wie sie von Zamecnikova et al., [2014] bei der reflektorlosen Erfassung von dunkelgrünen Flächen mit einer Leica MultiStation MS50 beschrieben werden, können nicht signifikant nachgewiesen werden. Die Leica Multistation arbeitet mit einem sichtbaren roten Laser [Leica Geosystems, 2016]. Die Laserquelle des Z+F Imager 5010 nutzt eine Wellenlänge von 1500 nm (infrarot) [Zoller+Fröhlich, 2016]. Der Mensi GS100 hingegen arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren mit einem grünen Laser. Das unterschiedliche farbbedingte Verhalten ist physikalisch in der Absorption von Licht unterschiedlicher Wellenlängen begründet. Der Farbeindruck von nicht selbstleuchtenden Körpern entsteht dadurch, dass nur ein Teil des Lichts mit einer veränderten spektralen Zusammensetzung reflektiert wird. Das heißt, dass ein Körper bestimmte Wellenlängen des Lichtes besonders gut absorbiert. Wird nun ein bestimmter Wellenlängenbereich stärker absorbiert als die übrigen, so gibt die Komplementärfarbe den Ausschlag für das Aussehen der Oberfläche [Dreisch et al., 2013]. Zwar sind die Zusammenhänge aufgrund von Reflektionsanteilen, Streulicht und chemischer Zusammensetzung der Oberfläche komplexer, es sollte aber beachtet werden, dass auch die Farbgebung Einfluss auf die Messunsicherheit hat, da z. B. bei einem grünen Objekt sehr viel Licht eines roten Lasers absorbiert wird. Die Reflektivität des Objektes und somit die Genauigkeit der Streckenmessung nimmt signifikant ab [Kersten et al., 2005]. Dies kann sowohl systematische Abweichungen von der Sollfläche als auch eine Erhöhung der zufälligen Anteile zur Folge haben.

3.2.3 Auswirkungen auf die Formanalyse

Eigene Erfahrungen mit einer Vielzahl von Geräten zeigen in Übereinstimmung mit anderen Autoren u. a. Holst et al., [2014b] ein wesentlich höheres Genauigkeitspotential als die Genauigkeit eines 3D-Punktes bei der Ermittlung objektspezifischer Prüfmerkmale. Wird die Flächenformabweichung als Prüfmerkmal definiert, haben systematische Abweichungen der Instrumente erhebliche Auswirkungen auf die Prüfbarkeit von Toleranzen. Hier spielt die Präzision des Gerätes eine erhebliche größere Rolle gegenüber der Genauigkeit. Das klassische Modell der Präzision und Genauigkeit ist aber nicht direkt auf TLS übertragbar, da u. a. die Distanz zu einem reproduzierbaren Einzelpunkt nicht untersucht werden kann [Zamecnikova et al., 2014].

Instrumentenbedingte Abweichungen führen zu einer Verzerrung der aufgenommenen Fläche. Bei einer realen Messung zur Formanalyse würden die entstehenden Abweichungen von der Fläche zur Interpretation als Formabweichungen des Bauteils führen und dem Fertigungsprozess zugeschrieben werden. Bei der Deformationsanalyse im geodätischen Bereich entstehen Scheindeformationen, die durch Geräteabweichungen verursacht werden. Im Bereich der Präzisionsmessungen spielen solche Abbildungsfehler des Gerätes eine entscheidende Rolle, da Formabweichungen lokal bedingte Abweichungen von der Sollgestalt sind. Bei der Einpassung von Regelgeometrien werden nicht erkannte systematische Abweichugnen als Formabweichungen bzw. Deformationen

interpretiert. Die ermittelten Formabweichungen enthalten sowohl die Abweichungen durch den Fertigungsprozess als auch Abweichungen die im Messprozess begründet sind. Bei der Messung mittels TLS wird die Interpretation von Formabweichungen zusätzlich durch das erhöhte, inhomogene Signal-Rauschverhältnis erschwert.

Für die Ermittlung prüfmerkmalsbezogener Unsicherheiten spielen die äußeren Faktoren eine erhebliche Rolle, da sich Messunsicherheiten nicht ausschließlich aus Restabweichungen des Instrumentes ergeben. Dazu zählt u. a. die Abhängigkeit vom Auftreffwinkel sowie Reflektivität des Objektes und der damit verbundene Einfluss auf die Streckenmessung. Da bei polar messenden Systemen die Winkelgenauigkeit erst ab einer bestimmten Entfernung überwiegt, sind Messunsicherheit hervorgerufen durch die Entfernungsmessung von größerer Bedeutung für die beschriebenen Anwendungen.

3.3 Experimentelles Verfahren zur Unsicherheitsermittlung

Für komplexe Messprozesse mit einer hohen Anzahl an Einflussgrößen und umfangreich auftretenden Korrelationen ist das Standardverfahren nach GUM in der Regel nicht mehr geeignet [Schwenke, 1999; Weissensee, 2011]. Aus diesem Grund werden als Erweiterung des GUM bereits alternative Verfahren für die Unsicherheitsermittlung bereitgestellt. Zu nennen ist hier insbesondere die Messunsicherheitsermittlung mittels Monte-Carlo-Simulation, bei der aber ebenfalls umfangreiche Kenntnisse zur Modellgleichung und zu Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen Voraussetzung sind. Einen umfangreichen Überblick der Möglichkeiten zur Bestimmung von Messunsicherheiten am Beispiel bildverarbeitender Messverfahren in der Fertigungsmesstechnik gibt Weissensee, [2011].

Bei der industriellen Fertigung von Bauteilen werden die benötigten Toleranzen zunehmend enger spezifiziert. Entlang der Rückführungskette zur Bestimmung der Messunsicherheit verschärft sich dabei die Problematik sämtliche am Prozess der Messung beteiligten Größen realistisch zu bewerten. Idealisierte und damit bauteilfremde Prüfkörper werden zwar mit geringem Aufwand hochgenau kalibriert, die Überwachung oder Steuerung von Fertigungsprozessen wird dadurch jedoch nicht verbessert. Es wird daher zunehmend versucht Prüfkörper so zu gestalten, dass nur ein geringer Transferverlust zur realen Prüfaufgabe besteht [Jusko et al., 2007]. Für die Unsicherheitsbestimmung von Messgrößen ist für die Messungen mit Koordinatenmessmaschinen aus diesem Grunde die DIN 15530-3 entstanden.

Für komplexe Messprozesse stellt die Norm ein prüfmerkmalsbezogenes Verfahren zur Unsicherheitsermittlung durch Wiederholungsmessung zur Verfügung. Der Anwendungsbereich der DIN umfasst Koordinatenmessgeräte und deren Ergebnisse unter Verwendung von kalibrierten Werkstücken [DIN 15530-3, 2012]. Dazu wird das kalibrierte Bauteil oder ein Normal wiederholt auf dieselbe Weise gemessen, wie das zu prüfende Werkstück.

Die Messung kann mit oder ohne Substitution erfolgen. Bei der Messung mit Substitution wird sowohl ein Werkstück als auch ein Prüfnormal bei gleicher Messanordnung gemessen. Zum einen wird die Messgröße gemessen und anschließend durch eine Vergleichsgröße ersetzt. Durch eine entsprechende Auswertung der beobachteten Unterschiede wird der eigentliche Messwert bestimmt [Pesch, 2009]. Bei Messungen ohne Substitution wird der Anzeigewert des Messgerätes verwendet.

Für die Unsicherheitsbestimmungen gilt das Ähnlichkeitsprinzip, d. h. dass die Messungen in ähnlicher Weise vorgenommen werden, wie die beabsichtigte Messung. Folgende Bedingungen sollten dafür erfüllt sein:

- Größe und Form von Normal und zu prüfendem Werkstück sollten ähnlich sein.
- Die Messabläufe sollten denen der eigentlichen Messung ähnlich sein.
- Während der Unsicherheitsbestimmung und der eigentlichen Messung sollten die Umgebungsbedingungen ähnlich sein.
- Es sollten die gleichen Prüfmerkmale ausgewertet werden.
- Die Messparameter bzw. Sensorkonfigurationen sollten ähnlich sein.

Die Messunsicherheit setzt sich dann aus folgenden Unsicherheitsbeträgen zusammen:

1. Der Kalibrierung des Normals u_{Kal}.
2. Der Unsicherheit des Messverfahrens u_{zuf}.
3. Der Unsicherheit aus den systematischen Abweichungen, die sich aufgrund des Normals ergeben u_{syst}.

Das kalibrierte Werkstück bzw. Normal wird in der Norm mehrfach gemessen. Aus den Messungen wird der Mittelwert und die Standardabweichungen für ein Prüfmerkmal berechnet. Der Mittelwert kann auch aus Messungen, die über einen längeren Zeitraum verteilt sind, gebildet werden. Durch den Vergleich zum Normal ergeben sich die systematischen Abweichungen b. Entsprechend den Empfehlungen des GUM sind diese zu korrigieren. Kann keine Korrektur der systematischen Abweichungen vorgenommen werden, kann das Messergebnis Y angegeben werden als

$$Y = y - b \pm U \tag{3.8}$$

Die Standardunsicherheiten werden entsprechend des GUM quadratisch aufaddiert und vorzugsweise mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ für ein Vertrauensniveau von 95% multipliziert.

$$U = k\sqrt{u_{Kal}^2 + u_{zuf}^2 + u_{syst}^2} \tag{3.9}$$

4 Anwendungsspezifische Untersuchung terrestrischer Laserscanner

Für Genauigkeitsuntersuchungen ist es sinnvoll die spezifischen Messaufgaben und –bedingungen nachzustellen. Um Erkenntnisse bezüglich der Formtreue der Laserscanner zu erlangen, wurden Versuchsmessungen an einem Ersatzkörper durchgeführt. Die Versuchsmessungen dienen als Grundlage für die Entwicklung eines allgemeinen Prüfkörpers für Aufgabenstellungen des Reverse Engineerings von Freiformflächen und der Toleranzprüfung von Formabweichungen. Ziel der in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen ist:

- die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Systeme zur formtreuen Abbildung eines Objektes,
- eine Trennung von systematischen und zufälligen Abweichungen,
- der Nachweis und die quantitative Beurteilung systematischer Abweichungen,
- ein Vergleich der untersuchten Systeme ohne die Abhängigkeit von herstellerspezifischen Zielmarken,
- die Betrachtung eines dem Einsatzbereich des Instrumentes entsprechenden Teil des Messvolumens,
- eine realistische Unsicherheitsbestimmung der zu ermittelten Formabweichungen,
- sowie die Ableitung der Anforderungen an einen flächenhaften Prüfkörper.

Da die Methoden zur Bestimmung der Unsicherheit oftmals sehr komplex sind, besteht die Gefahr einer unrealistischen Abschätzung bei Angabe merkmalsbezogener Unsicherheiten. Dies gilt insbesondere für komplexe Systeme wie terrestrische Laserscanner, bei denen die internen Funktionsprinzipen und herstellerseitigen Korrekturen bis dato nicht bekannt sind. Die Trennung von systematischen und zufälligen Komponenten wird durch die mangelnde Kenntnis der internen Gerätekonfigurationen und dem komplexen Zusammenwirken der Einflussgrößen zusätzlich erschwert. Eine experimentelle, merkmalsbezogene Bestimmung der Messunsicherheiten an einem kalibrierten werkstückähnlichen Prüfkörper soll deshalb zur realistischen Abschätzung für die beschriebenen Anwendungen genutzt werden.

In der Literatur werden standardmäßig Kugeln und Ebenen als Prüfkörper für Laserscanner vorgeschlagen. Beide Prüfkörper müssen mit einer wesentlich höheren Genauigkeit als die zu prüfenden Größen gefertigt werden. Laserscanner erreichen laut Spezifikation mittlerweile eine Präzision im Submillimeterbereich. Die Fertigung hochgenauer Prüfkörper mit sehr großen Ausdehnungen ist als nicht wirtschaftlich zu betrachten. Die Ermittlung der Soll-Gestalt eines Referenzkörpers kann mit Messsystemen übergeordneter Genauigkeit erfolgen.

4.1 Prüfverfahren

Die DIN 15530-3 verfolgt den Ansatz, dass Messungen in derselben Weise vorgenommen werden, wie die eigentlichen Messungen, aber mit kalibrierten Prüfkörpern ähnlicher Abmessungen und Form anstelle der unbekannten zu messenden Bauteile. Um einen entsprechenden Prüfkörper für die Prüfung von Laserscannern hinsichtlich ihrer Formtreue zu entwickeln, wird zunächst ein Ersatzkörper genutzt. Dazu ist es notwendig ein Messobjekt mit einer wesentlich größeren Ausdehnung zu nutzen, um so eine flächenhafte Untersuchung der Scanergebnisse zu ermöglichen. Die ausgewählte Fläche steht an der Fraunhofer Fraunhofer Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik in Form einer Messwand zur Verfügung deren Ausdehnung 7.5 m beträgt (siehe Abbildung 4.1). Der Aufbau des Ersatzkörpers ist dabei an ein Stufennormal angelehnt. Die rote Farbgebung des Prüfkörpers wurde in Anlehnung an die im Schiffbau zum temporären Schutz von Stählen eingesetzten Fertigungsbeschichtungen (sogenannte shop primer) gewählt.

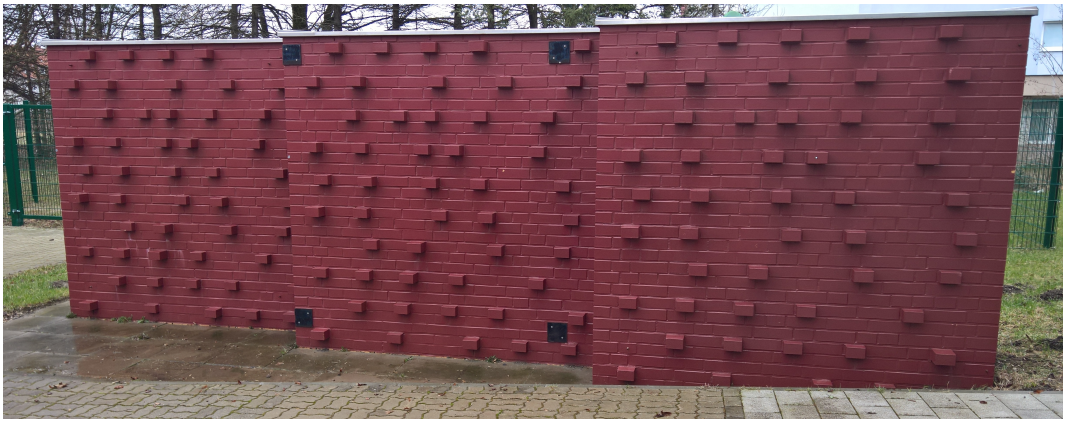


Abbildung 4.1: Messwand als Testkörper in Anlehnung an ein Stufennormal
Ausdehnung $7.5 \times 1.5 \times 2.5$ m

Um diese Messwand als Referenzkörper nutzen zu können, muss die wahre Gestalt der Oberfläche mit einer übergeordneten Genauigkeit bekannt sein. Streifenlichtprojektoren bieten in Verbindung mit einem Industriephotogrammetriesystem die Möglichkeit, auch große Objekte mit einer für die Aufgabe hinreichenden Genauigkeit flächenhaft zu

erfassen. Für die Digitalisierung der Messwand wurde ein Streifenlichtprojektor der Firma GOM verwendet. Für die Referenzierung der Aufnahmen zueinander wurde ein Referenzpunktfeld mit einem Industriephotogrammetriesystem der Firma Aicon geschaffen. Die beiden Systeme und ihre Genauigkeiten sind in Abschnitt 3.2.1 dargestellt.

Die Erstellung eines Flächenmodells erfolgt durch die Transformation der Einzelaufnahmen in das Referenzsystem und anschließender Polygonisierung durch die mitgelieferte GOM-Software. Es wurde eine durchschnittliche Transformationsabweichung von 0.07 mm erreicht. Aufgrund der intern nachgelagerten Scanbearbeitung durch flächenbasierte Ausrichteverfahren und Zusammenführung sich überlagernder Aufnahmen kann von einer zusätzlichen Verbesserung ausgegangen werden. Die Genauigkeit der digitalen Abbildung des Referenzkörpers kann bei einem zu erwartenden Messrauschen von ca. 0.5 mm als ausreichend angenommen werden kann.

4.1.1 Versuchsanordnung und -bedingungen

In Anlehnung an die Forderungen der DIN 15530-3 wurden die nachfolgend dargestellten Messungen unter möglichst vergleichbaren Bedingungen für die verschiedenen Scanner durchgeführt. Die nachfolgenden Bedingungen wurden für alle Messungen eingehalten:

- Annähernd gleiche Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur und äußerer Einflüsse.
- Ausrichtung der Startrichtung der Scans parallel zum Objekt (Objekt nicht im Überlappungsbereich).
- Keine Sonneneinstrahlung auf dem Objekt (bedeckter Himmel).
- Vergleichbare Datenrate und Punktauflösung am Objekt, die auch typischerweise in der Anwendung genutzt wird (Auflösung 6 mm@10 m bei einer Scanzeit von ca. 6 min).

Für die Auswertung wurde ein automatisierter Ablauf entwickelt, um subjektive Einflüsse eines Bedieners zu minimieren. Der Ablauf der Auswertung erfolgte nach einem festen Ablaufschema.

1. manuelle Reduzierung der Punktwolke auf das relevante Messobjekt
2. Filterung von Streupunkten mit der Herstellersoftware
3. Vorausrichtung über Kugeln am Messobjekt
4. Einpassung des Prüfkörpers durch eine Minimierung der Abweichungsquadrate

Durch den Aufbau des Prüfkörpers als Stufennormal und die ausgebildete Vielzahl von Geometrieelementen kann die notwendige Bestimmung aller 6 Freiheitsgrade gewährleistet werden. Durch die Best-Fit-Einpassung des Prüfkörpers in die Punktwolke wird dem Unabhängigkeitsprinzip von Form- und Lagetoleranzen entsprochen. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen standen von den in Tabelle 2.1 dargestellten typischen Vertretern von Phasenvergleichsscannern für industrielle Anwendungen jeweils ein Gerät zur Verfügung. Die Geräte befinden sich bei Forschungseinrichtungen und Firmen in der Anwendung. Vom Faro Focus X120 standen zwei Instrumente zur Verfügung. Der im Folgenden als Faro Focus X120 I bezeichnete Scanner wurde direkt an die werksseitige Kalibrierung durch den Hersteller untersucht, während die weiteren Geräte bereits durchgeführte Betriebsstunden im praktischen Einsatz aufweisen können.

4.1.2 Analyse von Kenngrößen für TLS

Aus den in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Prüfverfahren für TLS-Systeme können aus den vorgeschlagenen Kenngrößen nur eingeschränkt Aussagen bezüglich der Eignung der Instrumente für die Ermittlung von Formabweichungen oder zur formtreuen Abbildung abgeleitet werden. Die verwendeten Kugel-Prüfkörper sind in ihrer Größe nicht ausreichend, weswegen die Untersuchungen mit einem wesentlich größeren Prüfkörper, der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Messwand, weitergeführt werden. Die Kenngrößen Antastabweichung und Ebenheitsabweichung unterschieden sich rechnerisch nur in der Definition des Prüfkörpers. Es kann für den gewählten Prüfkörper ebenfalls eine Kenngröße auf Basis der Abstände zum Prüfkörper nach der Einpassung in die Punktwolke definiert werden.

Die Kenngröße Antastabweichung beschreibt das Abweichungverhalten des flächenhaft messenden optischen 3D-Messsystems in einem kleinen Teil des Messvolumens [VDI/-VDE, 2002]. Um die Kenngröße Antastabweichung auf ihre Aussagekraft bezüglich der Formtreue zu beurteilen, werden zunächst die in der Literatur vorgeschlagenen Kenngrößen von nur einem Standpunkt berechnet, der den Forderungen der VDI im Verhältnis Messvolumen und Prüfkörpergröße für die Ermittlung der Ebenheitsabweichung entspricht.

Die Empfehlung der VDI/VDE, [2002] für die Prüfkörpergröße in Bezug zur Raumdiagonalen, des das Messvolumen kleinstmöglich umschreibenden Quaders L_v, gibt für die Ebenheitsabweichung $0.5\,L_v$ an. Ausgehend von einem durch das Anwendungsgebiet eingeschränkten Messvolumen von ungefähr 15 m kann ein Abstand von ca. 7.5 m zum Prüfkörper abgeleitet werden. Um einen Vergleich mit den zumeist auf 10 m spezifizierten Herstellerangaben zu ermöglichen wird zusätzlich die Kenngrößenermittlung für einen Abstand von 10 m durchgeführt. Dies entspricht nur einer geringfügigen Änderung des Verhältnisses Prüfkörper zu Messvolumen, so dass nur geringe Unterschiede aufgrund der Entfernungsabhängigkeit der Lasermessung zu erwarten sind.

Tabelle 4.1: Darstellung der Antastabweichung nach Heister, [2006] und Kern, [2008] in unterschiedlichen Entfernungen zum Objekt und Gegenüberstellung mit den Herstellerangaben

Entfernung	[Heister, 2006] 7.5 m [mm]	[Heister, 2006] 10 m [mm]	[Kern, 2008] 7.5 m [mm]	[Kern, 2008] 10 m [mm]	Spezifikation* 10 m [mm]
Z+F Imager 5010	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
Faro Focus S120 I	0.7	0.9	0.8	1.0	0.9
Faro Focus S120 II	0.7	0.8	0.9	1.0	
Trimble FX	0.3	0.4	0.4	0.5	0.8
Leica HDS 6000	0.6	0.9	0.7	1.0	1.1

* interpolierte Herstellerangabe für 10 m und 50 % Reflektivität

Tabelle 4.1 zeigt, dass die Antastabweichung für die geprüften Scanner erwartungsgemäß zwischen den Entfernungen (7.5 m und 10 m) nur geringfügig steigt. Lediglich für den Leica HDS 6000 ist für beide Berechnungsmethoden ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen. Die ermittelte Kenngröße für 10 m liegt aber immer noch innerhalb der Herstellerspezifikation für das Messrauschen. Die Kenngröße gilt als eingehalten, wenn der Wert die maximal zulässige Antastabweichung nicht überschreitet [Kern, 2010]. Als maximale zulässige Abweichung gilt die Herstellerangabe, wenn nicht anders vereinbart. Die bewusst anwendungsnahe Farbgebung der Messwand führt zu einer Reflektivität von ca. 50 %. Aus den Herstellerangaben kann für den Prüfkörper das zu erwartende Messrauschen abgeschätzt (siehe Tabelle 4.1) und den Herstellerangaben gegenübergestellt werden.

Bei der Gegenüberstellung der ermittelten Antastabweichungen würden lediglich die beiden Faro Focus S120 I und II oberhalb der zulässigen Antastabweichung abschneiden. Da bei der Prüfgröße nach Kern, [2010] und Heister, [2006] aber ein wesentlich kleinerer Prüfkörper mit idealer Reflektivität vorgeschlagen wird, ist davon auszugehen, dass alle Scanner eine Prüfung im Vergleich zur Spezifikation bestehen würden.

Aufgrund der Abhängigkeit der Messunsicherheit von der Entfernung und dem Auftreffwinkel des Laserscanners zum Objekt werden durch Gordon, [2008] Kennlinien für die unterschiedlichen Einflussgrößen vorgeschlagen und beispielsweise in Mechelke et al., [2008] umgesetzt. Mit dem genutzten Prüfkörper können ebenfalls Kennlinien über die Entfernung zum Objekt generiert werden. Für die geprüften Scanner liegen Kennlinien der Antastabweichung bis zu einer Distanz von 30 m vor. Größere Entfernungen sind im industriellen Bereich nur äußerst selten zu realisieren. Im Entfernungsbereich unterhalb von 5 m wird nur der Mittelteil des Prüfkörpers benutzt, da ansonsten der Einfluss des Auftreffwinkels zu groß werden würde.

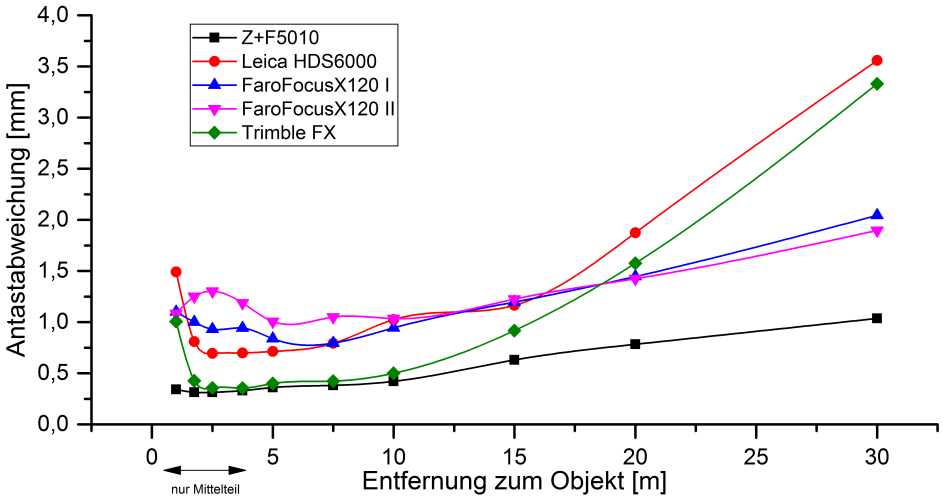


Abbildung 4.2: Kennlinien der Antastabweichung nach KERN, [2008] in Abhängigkeit von der Entfernung

Für alle Scanner kann bestätigt werden, dass es sich beim Messrauschen um eine nichtlineare Funktion handelt (siehe Abbildung 4.2). Umso wichtiger ist es für den Anwender solche Kennlinien aufgrund von Prüfkörpern zu ermitteln, um eine realistische Abschätzung der Messunsicherheit aus der Punktwolke abgeleiteter geometrischer Größen vornehmen zu können. Auffällig sind aufgrund der Kennlinien insbesondere die Bereiche unterhalb von 10 m. Die beiden Faro Scanner weichen hier signifikant von einem zu erwartenden harmonischen Kurvenverlauf ab. Ursache können Nahbereichseffekte sein, wie sie durch WEHMANN et al., [2007] beschrieben werden. Zur Analyse soll zunächst eine Trennung zwischen entfernungs- und auftreffwinkelabhängigen Einflüssen vorgenommen werden.

Für die Ermittlung von Kennlinien in Abhängigkeit von der Antastabweichung hat der gewählte Prüfkörper den Vorteil, dass von einem einzigen Standpunkt der gesamte relevante Auftreffwinkelbereich abgedeckt werden kann. Dieser Bereich geht nach LINDSTAEDT et al., [2012] für Laserscanner im Allgemeinen bis ca. 45°. Bei einer Entfernung von 5 m zum Prüfkörper kann somit ein ausreichender Bereich der Punktwolke abgedeckt

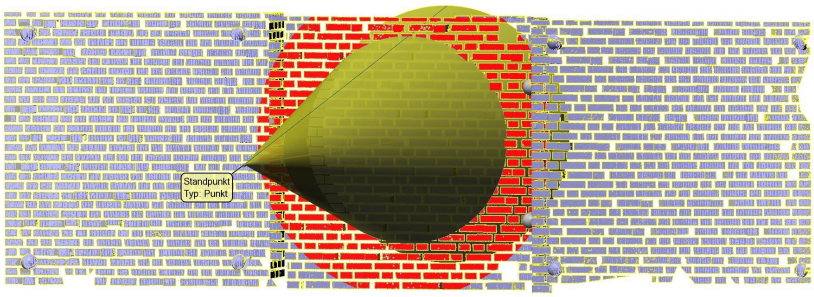


Abbildung 4.3: Segmentierung von Punkten annähernd gleichen Auftreffwinkels

werden ohne in den Bereich von Übersteuerungen im Nahbereich zu kommen. Auf einer gedachten Ebene, die von einem zentralen Standpunkt erfasst wird, entsprechen die Bereiche gleichen Auftreffwinkels einem Kreis um den Durchstoßpunkt der Lotrechten und der Ebene. Im Räumlichen beschreiben die Verbindungen der Punkte gleichen Auftreffwinkels mit dem Scannerzentrum somit einen Kegel (siehe Abbildung 4.3). Aufgrund dieser geometrischen Betrachtung kann der Prüfkörper in Zonen annähernd gleichen Auftreffwinkels unterteilt werden. In Abbildung 4.4 ist die Einteilung des Prüfkörpers in 5° Zonen dargestellt.

Abbildung 4.4: Einteilung des Prüfkörpers entsprechend des Auftreffwinkels [Geist et al., 2013]

Aus der Berechnung der Antastabweichung ergeben sich Kennlinien in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel. Keiner der untersuchten Scanner weist einen signifikanten Anstieg der Antastabweichung innerhalb des untersuchten Auftreffwinkelbereiches auf (siehe Abbildung 4.5). Lediglich die beiden Faro Focus Scanner weisen ein nichtlineares Verhalten auf.

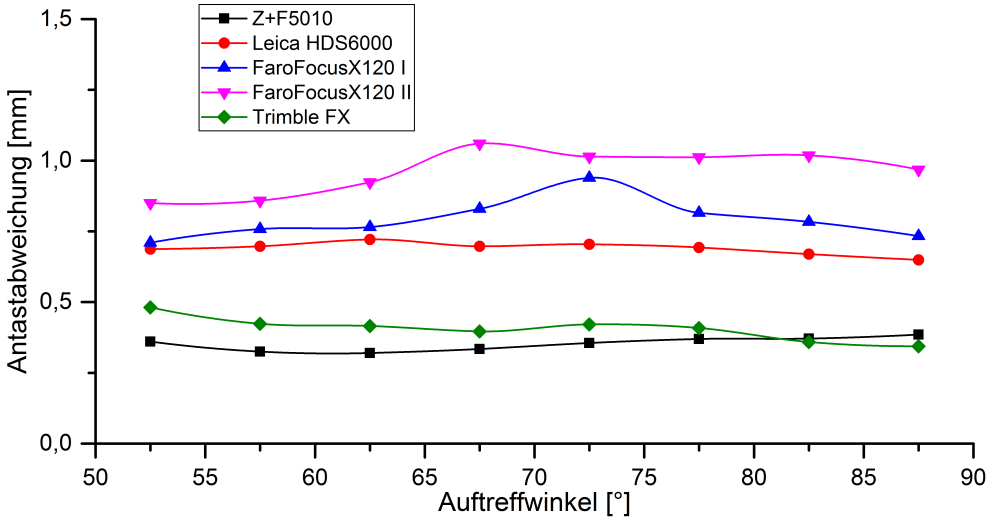


Abbildung 4.5: Kennlinien der Antastabweichung nach Kern, [2008] in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

Bei allen anderen Scannern steigt das Messrauschen nur geringfügig an. Untersuchungen anderer Autoren zeigen für den betreffenden Bereich Anstiege bis 2 mm [Lindstaedt et al., 2012]. Aus dem von Gordon, [2008] entwickelten funktionalen Zusammenhang zwischen Messunsicherheit und Auftreffwinkel ist ebenfalls einen signifikanter Anstieg zu erwarten.

Wird für die in Abbildung 4.4 dargestellten Zonen anstatt der Antastabweichung nach Kern, [2008] die Antastabweichung nach Heister, [2006] berechnet, ergeben sich die in Abbildung 4.6 dargestellten Abweichungen von der Sollgeometrie.

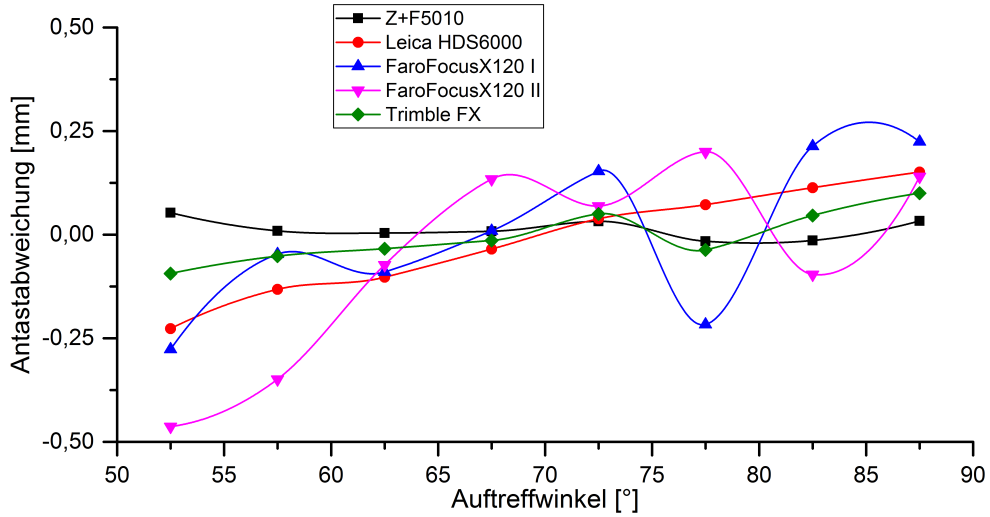


Abbildung 4.6: Kennlinien der Antastabweichung nach Heister, [2006] in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel

Aus der Berechnung der Kenngröße für die Einzelzonen wird ersichtlich, dass systematische Abweichungen von der Referenz vorliegen. Die Berechnung kann entsprechend der VDI/VDE, [2002] als Spanne zwischen minimaler und maximaler Abweichung (siehe Tabelle 4.2) erfolgen. Da es sich jedoch ebenfalls nur um eine Mittelwertbildung

Tabelle 4.2: Spanne der Soll-Ist-Abweichungen auf Grundlage der Antastabweichungen nach Heister, [2006]

Scanner	Min-Max Spanne [mm]
Z+F Imager 5010	0.07
Faro Focus S120 I	0.50
Faro Focus S120 II	0.66
Trimble FX	0.19
Leica HDS 6000	0.38

für einen Teilbereich handelt, kann noch keine zuverlässige Aussage zum auftretenden Betrag der Abweichungen getroffen werden. Des Weiteren kann der Prüfkörper zwar in Zonen gleichen Auftreffwinkels unterteilt werden, ein Zusammenhang ist aber nicht gegeben.

4.1.3 Beurteilung der Ergebnisse und Fazit

Aussagen zur Formtreue können die berechneten Kenngrößen der Antastabweichungen bei den dargestellten Kennlinien weder im Lokalen (Kugel, Einteilung in Segmente) noch auf einem wesentlich größeren Prüfkörper liefern. Aus der Analyse der bisherigen Prüfverfahren und Kenngrößen für TLS-Systeme lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen, die bei einem Vorschlag für einen Prüfkörper zur experimentellen Bestimmung der Messunsicherheit berücksichtigt werden sollen.

- Durch die geringe Prüfkörpergröße und die stochastische Bewertung in Form der Mittelwertbildung werden systematische Abbildungsfehler nicht erkannt.
- Nur die ursprüngliche Forderung der VDI/VDE, [2002] Min – Max (Spanne der Abweichungen) ist tatsächlich ein Maß für die Formtreue eines Instrumentes.
- Aufgrund der wesentlich stärker ausgeprägten zufälligen Effekte bei TLS wird dazu übergegangen die Standardabweichung zu nutzen, diese beschreibt nicht die Formtreue eines Instrumentes.
- Die Standardabweichung ist aber ein Maß für das üblicherweise zu erwartende Messrauschen auf der Oberfläche und somit eine wichtige Eingangsgröße für die Polygonisierung und die Modellierung in Bezug auf den Grad der zu verwendenden Glättung von Freiformflächen.
- Das Messrauschen ist ein wichtiger Bestandteil zur Abschätzung der Messunsicherheit einer TLS-Messung.
- Zur Ermittlung der Korrektur und Berücksichtigung systematischer Abweichungen sind diese entsprechend zu ermitteln. Diese kann bei TLS-Messungen mit einem Messrauschen im Bereich von wenigen Millimetern nur durch eine angepasste Mittelwertbildung oder Filterung der zufälligen Anteile erfolgen.
- Eine zuverlässige Erkennung von nicht tolerierbaren Messabweichungen kann durch die bisher vorgeschlagenen Prüfverfahren nicht gewährleistet werden. Ein flächenhaftes Messverfahren sollte flächenhaft beurteilt werden.
- Die Approximation von lokal begrenzten Zielmarken in der Punktwolke eignet sich nicht zur Bewertung von Instrumentenabweichungen, da wie das Beispiel der Laboruntersuchungen zeigt, der Einfluss der Erkennungsalgorithmen signifikant ist.

- Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchung von Phasenvergleichsscannern zeigen, dass für die Beurteilung der Formtreue der Systeme eine weitergehende Beurteilung der Abweichungen von einem Sollkörper notwendig ist.

4.2 Analyse der Formtreue

Eine zentrale Forderung des GUM und der Messtechnik im Allgemeinen ist die Feststellung und wenn möglich Korrektur systematischer Abweichungen des Messsystems. Systematische Abweichungen können über die Verteilung der Residuen analysiert werden. Wie durch Mettenleiter et al., [2015] dargestellt, bilden die zu ermittelnden Residuen in der Modellvorstellung ein „Sandwich“ von Punkten um die eigentliche Sollgestalt bei der Berechnung der Antastabweichung (siehe Abbildung 4.7).

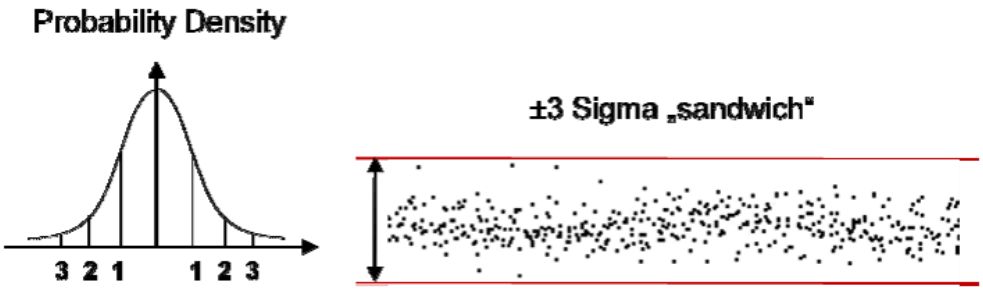


Abbildung 4.7: Modellvorstellung der Residuenverteilung [Mettenleiter et al., 2015]

Bei zu geringen Prüfkörpergrößen oder einem erhöhten Messrauschen, z. B. aufgrund der Entfernung zum Objekt, lassen sich systematische Abweichungen nur unzureichend nachweisen. Die Rückführung auf einen definierten Punkt, beispielsweise bei der Approximation von Kugeln, führt ebenfalls dazu, dass die eigentlich hohe Redundanz beim Scanning reduziert wird. Oftmals werden nur noch wenige Werte für eine Analyse herangezogen, sodass systematische Effekte bei der Bewertung kaschiert werden oder im Messrauschen untergehen. Bei der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Prüfkörpergröße ergibt sich die Möglichkeit auf Grund der hohen Messpunktanzahl auf dem Prüfkörper die Fehlerverteilungen detaillierter zu analysieren.

4.2.1 Vorgehen zur Ermittlung systematischer Abweichungen

Zur Charakterisierung einer Oberfläche und den Vergleich mit der Modellvorstellung (siehe Abbildung 4.7) kann die erfasste Messpunktwolke in einzelne Profile unterteilt werden. Die sich ergebenden Residuen der untersuchten Scanner können für den jeweiligen Schnitt extrahiert über dem idealen Verlauf aufgetragen werden.

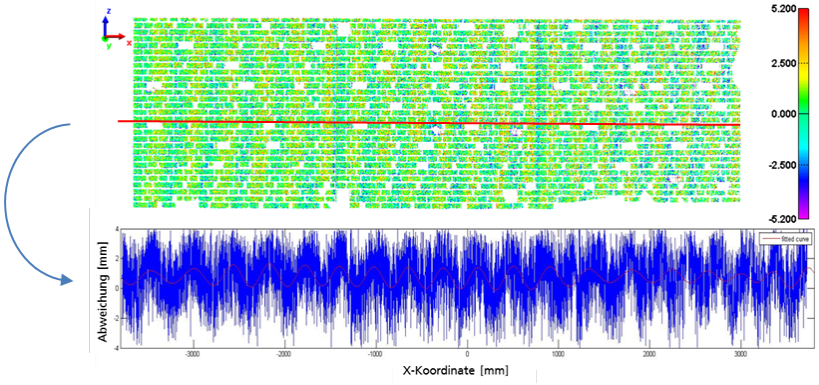


Abbildung 4.8: Auswirkungen von Instrumentenabweichungen

Die Abbildung 4.8 stellt die Verteilung der Residuen für den Längsschnitt eines fehlerbehafteten Scanners aus den ersten Vorversuchen zur Messwand dar. Die Profilanalyse zeigt die systematischen Abweichungen, die bei der Erfassung der Fläche entstanden sind. Für die Prüfung gegenüber der Spezifikation oder die Bewertung der Fähigkeit des Gerätes zur formtreuen Abbildung ist eine Trennung zwischen systematischen und zufälligen Anteilen notwendig. Aufgrund der Größe der Abweichungen im Verhältnis zum Messrauschen ist ein Instrumentenfehler zu vermuten. Formanalysen an Freiformflächen oder die Modellierung eines unbekannten Flächenverlaufes werden bei unbekanntem Wissen der Instrumenteneigenschaften fehlerbehaftet, da derartige Abweichungen direkt Auswirkungen auf die abgeleiteten Größen hätten. Zufällige Unsicherheitskomponenten können durch eine geeignete Filterung bzw. Oberflächenmodellierung reduziert werden. Systematische Abweichungen verfälschen entweder das Ergebnis oder erfordern eine erhebliche Generalisierung einer zu modellierenden Fläche.

4.2.2 Splinefilter zur Trennung der Abweichungsarten

Für die Anwendung auf profilhaften Messungen gibt es seit dem Jahr 2008 die umfangreiche Normenreihe DIN 16610, in der die Anwendung von Filterverfahren spezifiziert ist. Die Normen für die flächenhafte Filterung befinden sich derzeit noch in der Entstehung, so dass in dieser Arbeit zunächst Profilfilter eingesetzt werden sollen, um die systematischen und zufälligen Anteile zu trennen.

Bei der Anwendung der Filter erfolgt die Einteilung des Signals in einen langwelligen und einen kurzwelligen Anteil, der über einer Profilmittellinie aufgetragen wird. Wird bei der Prüfung eines Laserscanners durch Messung eines kalibrierten Normals die Sollgestalt als Mittellinie interpretiert, lassen sich die Residuen über dieser Mittellinie auftragen. Sie beinhalten sowohl das Messrauschen als auch die zu ermittelnden Abbildungsfehler des Messinstrumentes. Durch die Anwendung eines Filterverfahrens können die Fehlereinflüsse getrennt werden. Das Rauschen ist von anderen Profilformen als der Referenzlinie abzutrennen.

Die Abbildung 4.8 verdeutlicht die systematischen Abweichungen entlang des Referenzprofils am Beispielscan eines Trimble CX. Hierbei handelt es sich um eine rein periodische Abweichung mit konstanter Wellenlänge und Amplitude von der idealen Gestalt. Die Komplexität des Zusammenspiels der Komponenten eines Laserscanners lässt eine Vielzahl unterschiedlicher Fehlerbilder vermuten. Die Simulationen verschiedener Instrumentenabweichungen von Gordon, [2008] zeigt, dass für alle beschriebenen Achsfehler kontinuierliche Fehlerbilder zu erwarten sind. Für die Entfernungsmessung sind auf Grund des Phasenvergleichsverfahrens ebenfalls harmonische Verläufe zu erwarten.

Kann ein gutes mathematisches Modell nicht mit ausreichender Sicherheit angegeben werden, so sollte mit Ausgleichssplines gearbeitet werden [Engeln-Müllges et al., 2011]. Diese werden auch als Spline-Filter oder Glättungssplines bezeichnet. Die Anwendung von Spline-Filter wurden insbesondere von Krystek, [1996] vorangetrieben und führten 2006 für den 2D-Fall zur Einarbeitung des Verfahrens in die Normen des internationalen ISO-Standards. Spline-Filter beheben die bei der Filterung mit dem ebenfalls in den Normen definierten Gaußverfahren auftretenden Nachteile einer notwendigen Vor- und Nachlaufstrecke sowie die Verzerrung von Profilen, die durch Polynome beschrieben werden können [Hernla, 2000].

Darüber hinaus lassen sich Spline-Filter durch ihren wesentlich schnelleren, speicherplatzsparenden und rundungsfehlertoleranteren Algorithmus effizient zur Verarbeitung großer Datenmengen einsetzen [Krystek, 2009]. Es wird unterschieden zwischen periodischen und nicht periodischen Funktionen. Periodische Spline-Filter werden u. a. zur Filterung von Rundheitsprofilen und der Bestimmung ihrer Formabweichungen angewendet [Weckenmann et al., 2007]. Im Folgenden soll sich nur auf die Profilauswertung mit nicht-periodischen Splines zur Bestimmung der Abbildungsfehler bezogen werden. Spline-Filter beruhen im Wesentlichen auf der Approximation der Messwerte durch eine möglichst harmonische Funktion. Unter Verwendung natürlicher kubischer Splines handelt sich dabei um eine Funktion, die stückweise aus Polynomen 3. Grades zusammengesetzt ist, die an den Übergangsstellen stetig ineinander übergehen.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{s}(x) = s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \\ x \in [x_i, x_{i+1}],\ i = 1 \text{ bis } n \text{ und } n = \text{Anzahl der Punkte} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Um eine Filterung der zufälligen Abweichungen ϵ_i zu erreichen wird eine ausgleichende Funktion gesucht

$$y_i = f(x_i) + \epsilon_i \tag{4.2}$$

Neben der Forderung einer Minimierung der Abweichungsquadrate wird zusätzlich ein Term hinzugefügt, der die Gesamtkrümmung minimiert

$$\gamma \sum (y - s(x))^2 + (1 - \gamma) \int_{x_0}^{x_n} f''(x)^2 dx \Rightarrow min. \quad \gamma \in [0, 1] \tag{4.3}$$

Dabei ist γ ein vorgegebener Parameter, der den notwendigen Kompromiss zwischen Datentreue und Glattheit der Funktion bestimmt. Die Beziehungen der Koeffizienten und die Bedingungen in den Übergangsstellen führen zu einem linearen Gleichungssystem, das sich nicht direkt lösen lässt. Es kann in zwei separate Gleichungssysteme für a_i und c_i gegliedert werden [Wodny et al., 2003]. Das Gleichungssystem hat dann die Form:

$$A * a = B * c \tag{4.4}$$

Eine ausführliche Herleitung nicht-parametrischer Ausgleichssplines für ungleichmäßige Punktabstände Δx_i ist in Engeln-Müllges et al., [2011], Wodny et al., [2003] und Pollock, [1999] dargestellt. In Matrixschreibweise ergibt sich mit den Randbedingungen $c_1 = c_n = 0$ und $a_1 = a_n = 0$ eines natürlichen Splines:

$$3 \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta x_1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -(\frac{1}{\Delta x_1} + \frac{1}{\Delta x_2}) & \frac{1}{\Delta x_2} & 0 & \vdots & \vdots \\ \frac{1}{\Delta x_2} & (\frac{1}{\Delta x_2} + \frac{1}{\Delta x_3}) & \frac{1}{\Delta x_3} & \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{1}{\Delta x_3} & (\frac{1}{\Delta x_3} + \frac{1}{\Delta x_4}) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \frac{1}{\Delta x_{n-2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -(\frac{1}{\Delta x_{n-2}} + \frac{1}{\Delta x_{n-1}}) \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{\Delta x_{n-1}} \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ \ddots \\ a_{n-2} \\ a_{n-1} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 2(\Delta x_1 + \Delta x_2) & \Delta x_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \Delta x_2 & 2(\Delta x_2 + \Delta x_3) & \Delta x_3 & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \Delta x_3 & 2(\Delta x_3 + \Delta x_4) & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \Delta x_4 & \ddots & \Delta x_{n-3} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 2(\Delta x_{n-3} + \Delta x_{n-2}) & \Delta x_{n-2} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & \Delta x_{n-2} & 2(\Delta x_{n-2} + \Delta x_{n-1}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ \ddots \\ c_{n-2} \\ c_{n-1} \end{bmatrix}$$

Der integrale Ausdruck in Formel (4.3), d. h. die Forderung nach einem harmonischen Kurvenverlauf, kann mathematisch durch einen quadratischen Term der Form $c^T Bc$ ausgedrückt werden [Maresch, 2006].

$$\gamma \sum (y_i - a_i)^2 + (1 - \gamma)(c^T Bc) \Rightarrow min. \tag{4.5}$$

Durch Umstellen, Einsetzen von Formel (4.4) und Nullsetzen der partiellen Ableitung ergibt sich das Minimum in Formel (4.5) als Lösung eines linearen Gleichungssystems [Pollock, 1999].

$$(\mu\ A^T A + B)\widehat{x} = A^T y \tag{4.6}$$

mit

$$\mu = \frac{2(1 - \gamma)}{3\gamma} \tag{4.7}$$

Aus dem Lösungsvektor $\hat{x}$ können die Koeffizienten des jeweiligen Splinestückes berechnet werden [Krystek, 1996].

$$\begin{aligned} a &= y - \mu A\hat{x} \qquad c = (0, \hat{x}, 0)^T \\ d_i &= \frac{c_{i+1} - c_i}{3\Delta x_i} \qquad b_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{\Delta x_i} - \frac{c_{i+1} + 2c_i}{3\Delta x_i} \end{aligned} \tag{4.8}$$

Durch eine geeignete Wahl des Glättungsparameters μ kann ein tiefpassgefiltertes Profil erzeugt werden. Durch die Filterung erfolgt eine Abtrennung der zufälligen Anteile. Die ermittelte Funktion beschreibt die systematischen Abweichungen von der wahren Oberflächengestalt. In der DIN 16610 wird die Wahl der Gewichtung zwischen Glattheit und Annäherung an die Messdaten von einem Parameter α übernommen, der durch eine vorzugebende Grenzfrequenz gesteuert werden kann [Muralikrishnan et al., 2009].

$$\mu = \alpha^4 \quad \text{mit} \quad \alpha = \left(2sin\frac{\pi}{\lambda_c}\right)^{-1} \tag{4.9}$$

Funktionen unterhalb der Grenzwellenlänge λ_c werden unterdrückt. Um die Abweichungen von der Sollgestalt zu extrahieren, sollte die Grenzwellenlänge genügend groß gewählt werden und kann u. a. in Anlehnung an die Modulationsfrequenz der Distanzmessung erfolgen. Zur Vermeidung von Überschwingen und Aliasing-Effekten dürfen nur noch niedrige Frequenzen in der approximierten Funktion vorhanden sein. Für eine vorgegebene Wellenlänge bzw. gesuchte Frequenz sollte das Verhältnis ungefähr $\lambda_f \approx 5\lambda_c$ betragen [Krystek, 1996]. Für die Formextraktion in der Koordinatenmesstechnik können solche Grenzwellenlängen verschiedenen Regelwerken entnommen werden. Für die Trennung von zufälligen und systematischen Anteilen sind feste Grenzfrequenzen nur bedingt geeignet.

4.2.3 Ermittlung des Glättungsparameters

Für die Berechnung eines ausgleichenden kubischen Splines spielt die Wahl des Glättungsparameters μ eine entscheidende Rolle. Für $\mu = 0$ ergibt sich der interpolierende natürliche Spline. Für $\mu \to \infty$ nähert sich der Spline der Ausgleichsgeraden an. Für die Wahl des Glättungsparameters gibt es verschiedene Ansätze zur Bestimmung des optimalen Wertes. Kriterien zur Auswahl des Parameters können auf Erfahrungswerten oder einer visuellen Auswahl der Ergebnisse beruhen. Sind die Standardabweichungen a priori bekannt, kann auf das Verfahren nach dem Diskrepanzprinzip zurückgegriffen werden. Dabei wird der Glättungsparameter in Abhängigkeit von der bekannten zufälligen Abweichung gewählt, aus der eine Fehlerschranke abgeleitet wird. Weitere Methoden beruhen z. B. auf Kreuzvalidierungsverfahren oder dem L-Kurven-Kriterium [Kaschenz, 2006]. Für jedes Verfahren können Fälle gefunden werden, in denen sie bessere Ergebnisse liefern, ohne das ein bestimmtes Auswahlkriterium bevorzugt werden kann [Richter, 2015].

Der bei der Filterung abgetrennte Anteil beschreibt die zufälligen Abweichungen. Bei der Approximation einer ausgleichenden Funktion wird normalerweise angenommen, dass die Verbesserungen unkorreliert sind. Unter dieser Annahme sollte eine zu einem bestimmten Zeitpunkt eintretende Abweichung unabhängig von den zuvor oder danach gemessenen Abweichungen sein. Bei realen Messungen tritt dieser Zustand aber nur selten ein. Die in Abbildung 4.8 dargestellte Profillinie lässt sich idealisiert als Zeitreihe eines kontinuierlichen Signals interpretieren (siehe Phasenvergleichsverfahren Abschnitt 2.2.3). Der Grad der Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Werten einer geordneten Reihe kann durch die Autokorrelation beschrieben werden. Es wird also untersucht, ob die Verbesserungen des Ausgleichssplines mit sich selbst korreliert sind. Die Verbesserungen ergeben sich aus:

$$v = -\mu A\widehat{x} \tag{4.10}$$

Zur Berechnung des Autokorrelationskoeffizienten werden aus der Serie der vorliegender Verbesserungen zwei Reihen gebildet, die zueinander um den Index 1 verschoben sind.

$$(v_2, v_1), (v_3, v_2), ..., (v_n, v_{n-1})$$

Aus den beiden Reihen berechnet sich der Autokorrelationskoeffizient 1. Ordnung.

$$\rho_1 = \frac{\sum\limits_{t=2}^{n} v_t v_{t-1}}{\sum\limits_{t=1}^{n} v_t^2} \tag{4.11}$$

Durch eine iterative Annäherung an den minimalen Autokorrelationskoeffizienten ergibt sich der Glättungsparameter μ als Zustand bei möglichst unkorrelierten Verbesserungen. Mit diesem Parameter ist der Ausgleichsspline eindeutig beschrieben. Durch die minimale und maximale Abweichung des Ausgleichssplines von der Referenzline ergibt sich der Abbildungsfehler als Maß für die Formtreue des Laserscanners. Die Reststreuung ergibt sich mit der Anzahl der Freiheitsgrade des Ausgleichsproblems, auch Gesamtredundanz genannt, $r = n - u$ und kann als Summe der Diagonalelemente der Hat-Matrix berechnet werden [Niemeier, 2002]. Die Hat-Matrix H ist definiert aus der Beziehung der ursprünglichen und ausgeglichenen Beobachtungen $\widehat{y} = Hy$ und läßt sich durch das Einsetzen von Formel (4.6) in Formel (4.8) ableiten.

$$s_0^2 = \frac{v^T v}{\sum\limits_{i=1}^{n} r_i} \tag{4.12}$$

$$mit\ r_i = 1 - h_{ii}, \quad h_{ii} = sp((I + \mu A(B)^{-1}A^T)^{-1})$$

Dies entspricht der zufälligen Unsicherheitskomponente des TLS-Systems. Der Kennwert s_0 beschreibt das unter den nachgestellten Bedingungen zu erwartende Messrauschen.

4.3 Beurteilung der untersuchten TLS-Systeme

Zur Quantifizierung der Instrumentenabweichungen wurde für alle in Abschnitt 2.2.2 dargestellten Laserscanner jeweils ein Längsprofil aus der digitalen Abbildung des Prüfkörpers Messwand extrahiert. Durch die Anwendung der in Abschnitt 4.2.2 eingeführten Splinefilterung erfolgt eine experimentelle Ermittlung der Messunsicherheiten sowie Trennung systematischer und zufällige Abweichungen Zum Vergleich der Scannertypen wird der Standpunkt mit einem Objektabstand von 7.5 m zur Messwand gewählt. Dadurch kann der Einfluss des Auftreffwinkels minimiert werden und gleichzeitig der Empfehlungen der VDI/VDE, [2002] für die Prüfkörpergröße entsprochen werden.

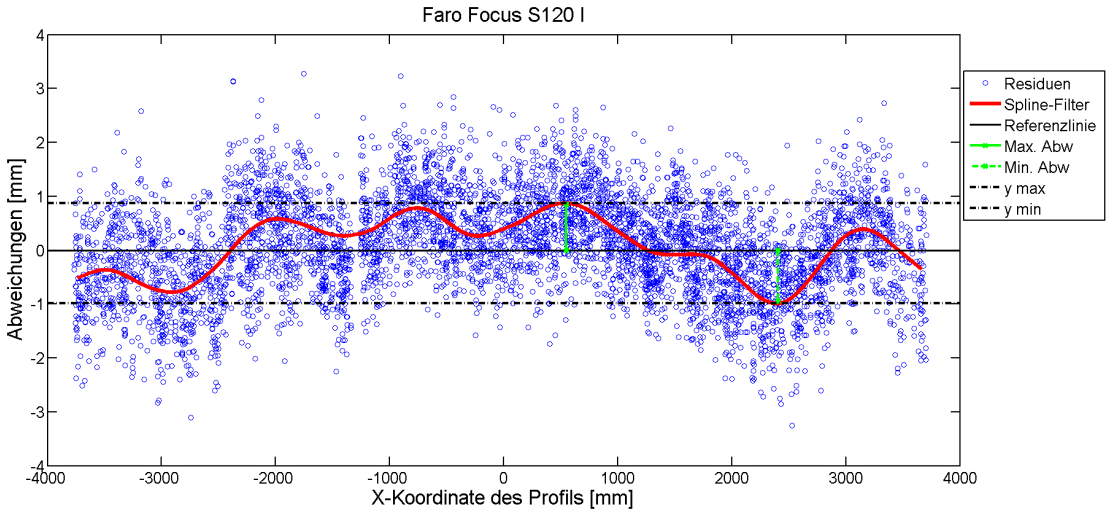


Abbildung 4.9: Splinefilterung und Bestimmung des Abbildungsfehlers Faro Focus S120 I

In Abbildung 4.9 ist die Residuenverteilung des untersuchten Faro Focus S120 I dargestellt. Durch die Approximation mittels Splinefilter ergibt sich ein Abbildungsfehler von 1.8 mm. Die Verteilung der Residuen zeigt unregelmäßige periodische Abweichungen, die kein eindeutiges homogenes Fehlerbild ergeben. Diese unregelmäßigen Schwingungen zeigen deutlich, die Notwendigkeit kein starres Modell zu verwenden, da feste parametrische Modelle zu Verzerrungen führen würden. Das Rauschen beträgt 0.7 mm und entspricht somit den Herstellerangaben.

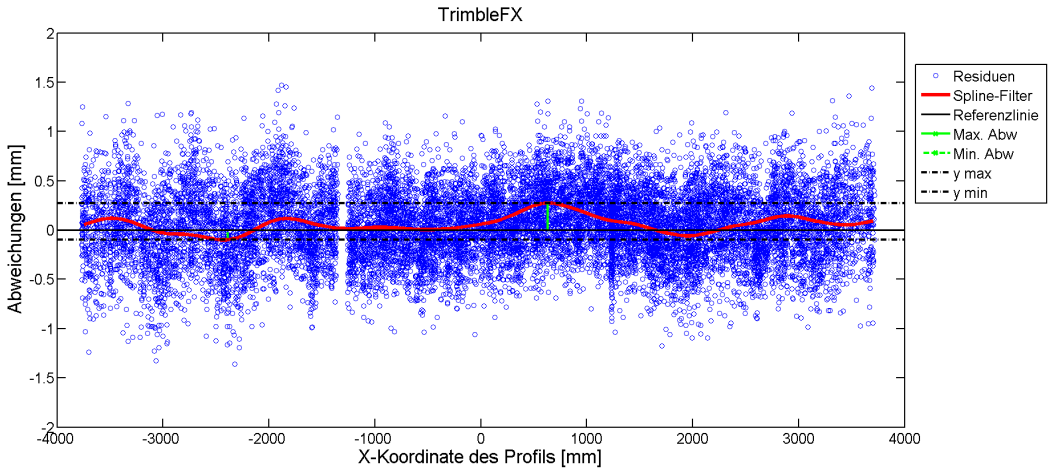


Abbildung 4.10: Splinefilterung und Bestimmung des Abbildungsfehlers Trimble FX

Abbildung 4.10 zeigt die Abweichungen des Trimble FX. Aus der Verteilung der Residuen sind ebenfalls sehr unregelmäßige Schwingungen zu erkennen. Der Abbildungsfehler beträgt 0.4 mm. Das Rauschen beträgt 0.4 mm.

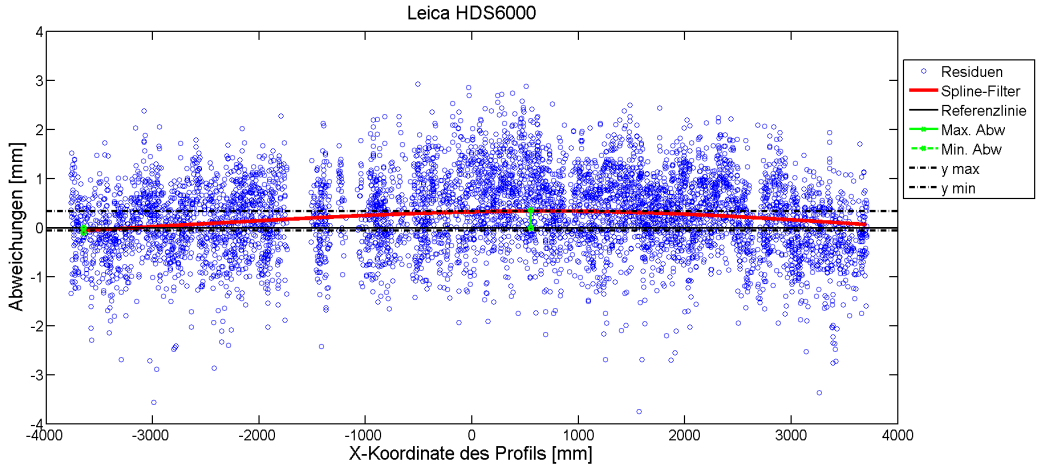


Abbildung 4.11: Splinefilterung und Bestimmung des Abbildungsfehlers Leica HDS 6000

Für die Überprüfung des Leica HDS 6000 ergibt sich ein Abbildungsfehler von ebenfalls 0.4 mm (siehe Abbildung 4.11). Die Fehlerverteilung ist im Gegensatz zum Trimble oder Faro wesentlich homogener. Sie kann auch annähernd durch ein Polynom 2. Grades beschrieben werden. Statt einer linearen Nulllinie ergibt sich eine symmetrische Verzerrung der Oberfläche. Das Rauschen beträgt 0.8 mm.

Die geringsten Abbildungsfehler der zu Verfügung stehenden Scanner zeigen sich beim Z+F Imager 5010 (siehe Abbildung 4.12). Die ermittelte Min-Max-Spanne ist kleiner

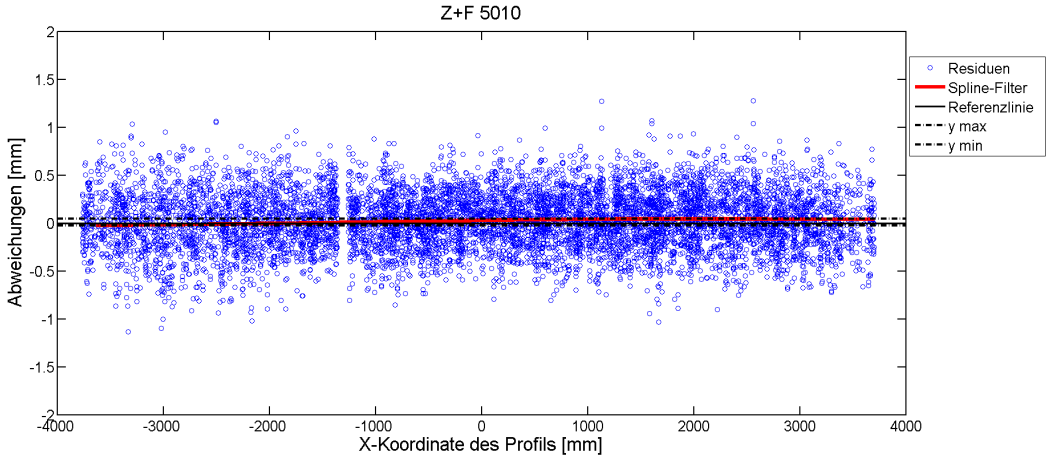


Abbildung 4.12: Splinefilterung und Bestimmung des Abbildungsfehlers Z+F Imager 5010

0.1 mm und damit nicht signifikant nachweisbar. Das Messrauschen kann mit 0.3 mm ermittelt werden. Die Fehlerverteilung entspricht visuell der in Abbildung 4.7 dargestellten Modellvorstellung der Punktverteilung.

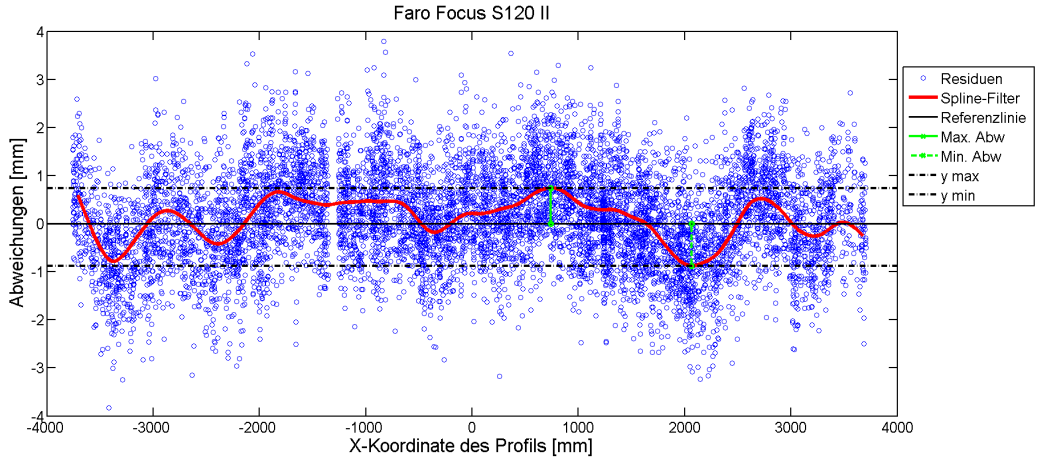


Abbildung 4.13: Splinefilterung und Bestimmung des Abbildungsfehlers Faro Focus S120 II

Abbildung 4.13 zeigt die Fehlerverteilung des zweiten zur Verfügung stehenden Laserscanner vom Typ Faro Focus S120 II. Es können ebenfalls unregelmäßige Welligkeiten mit einem Abbildungsfehler von 1.7 mm nachgewiesen werden. Das Rauschen beträgt 0.8 mm.

Tabelle 4.3: Ermittelte Abbildungsfehler für eine Entfernung von 7.5 m

Typ	Abbildungs-fehler	Rauschen	Herstellerangabe	
			systematische Abweichungen	Rauschen
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Z+F Imager 5010	≤0.1	0.3	±1.0	0.4
Faro Focus S120 I	1.8	0.7	±2.0	0.9
Faro Focus S120 II	1.7	0.8		
Trimble FX	0.4	0.4	k.A.	0.4
Leica HDS 6000	0.4	0.9	1.0*	1.1

* interpolierte Modellierungsgenauigkeit

In Tabelle 4.3 erfolgt eine Zusammenfassung der ermittelten Abbildungsfehler der untersuchten Scanner bei einer Entfernung von 7.5 m zwischen Scannerstandpunkt und Objekt. Für die untersuchten Laserscanner konnten zwei grundsätzliche Arten des Abbildungsfehlers festgestellt werden. Dabei handelt es sich zum einen um systematische Verzerrungen der Oberfläche und zum anderen um periodische Abweichungen, bei denen sich kurz- und langwellige Ausprägungen überlagern können.

Eine zentrale Forderung des GUM ist sowohl das Feststellen der systematischen Abweichungen als auch die (wenn möglich) Kompensation der systematischen Abweichungen. Um einen entsprechende Abweichung kompensieren zu können, muss die Ursache geklärt sein und eine Reproduzierbarkeit gegeben sein. Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit können unterschiedliche Entfernungen zum Prüfkörper herangezogen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Reproduzierbar sind im Rahmen

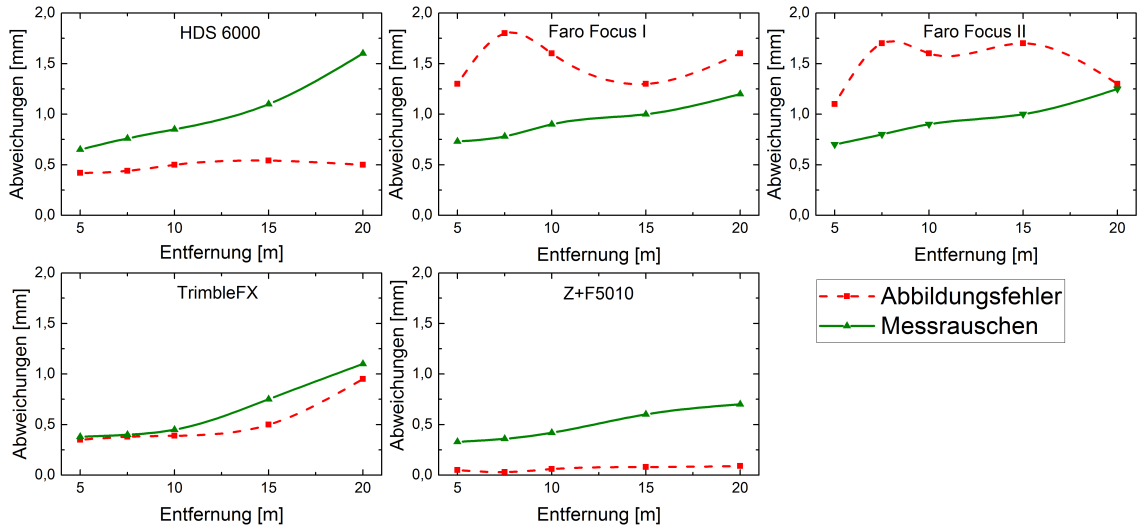


Abbildung 4.14: Verhältnis von Abbildungsfehler und Messrauschen in Abhängigkeit von der Entfernung

der erreichbaren Genauigkeit lediglich der Abbildungsfehler des Leica HDS 6000. Die systematischen Abweichungen der beiden Faro Focus schwanken im Bereich von 0.6 mm. Die Abweichungen des Trimble FX steigen mit zunehmender Entfernung zum Objekt. Ohne Kenntnis der internen Berechnungen und angebrachten Kalibrierfunktionen sollte die Korrektur den Herstellern überlassen werden. Aus diesem Grund werden die vorliegenden Abbildungsfehler als nicht korrigierbare Restabweichungen unter Angabe einer Min-Max-Fehlergrenze aufgefasst. Grundsätzlich lassen sich zwei Abweichungsarten, periodische Abweichungen und Verzerrungen, unterscheiden. Aus den dargestellten Abbildungsfehlern lassen sich aufgrund der abgeschätzten Wellenlängen Prüfkörpergrößen ableiten.

Tabelle 4.4: Arten der systematischen Abweichungen

Scanner	*Ausprägung*	*Anforderung an Prüfkörpergröße*
Verzerrung		
Leica HDS 6000	konstant über die Entfernung	möglichst groß
	Abweichung abhängig von Objektgröße	ca. 0.05 mm je Meter
periodische Abbildungsfehler		
Trimble FX	abhängig von der Entfernung	mind. 2 m
Faro Focus	unabhängig von der Entfernung	mind. 1 m
Trimble CX	unabhängig von der Entfernung	mind. 0.5 m

Eine Zusammenfassung der ermittelten Abbildungsfehler, ihrer Ausprägung und die sich ergebende Anforderung an die Größe eines Prüfkörpers erfolgt in Tabelle 4.4. Bezogen auf die Zielstellung des Kapitels hat sich gezeigt, dass die experimentelle Bestimmung der Messunsicherheit von Formabweichungen folgende Vorteile gegenüber anderen Verfahren bietet:

- Systeme können nach ihrer Fähigkeit zur formtreuen Abbildung bewertet werden. Eine Kenngröße *erreichbare Modellierungsgenauigkeit* könnte für den Einsatz im Industriebereich und Reverse Engineering dem Nutzer eine Vergleichbarkeit von Geräten ermöglichen. Die Kenngröße muss aber einen direkten Bezug zu maximalen und minimalen Abweichungen von einer Sollgeometrie haben.
- Es wird eine getrennte Bewertung von systematischen und zufälligen Abweichungen ermöglicht. Zusätzlich kann die Prüffähigkeit von Toleranzen beurteilt und Restriktionen bezüglich der Aufnahmegeometrie abgeleitet werden.
- Ein einzelner Prüfkörper bietet den Vorteil einer hohen Vergleichbarkeit verschiedener Systeme, da die Genauigkeit der Zielmarkenerkennung keine Rolle spielt.
- Durch die Betrachtung eines dem Einsatzbereich entsprechenden Teils des Messvolumens kann eine realistische Abschätzung der Messunsicherheit vorgenommen werden.

4.4 Entwurf eines Prüfkörpers und einer Prüfmethodik

Die angedachte Instrumentenprüfung fokussiert nicht wie in der Geodäsie üblich auf die Ermittlung der Instrumentengenauigkeit im Vergleich zur Spezifikation sondern vielmehr auf die Eignung des Instrumentes zur Ermittlung von objektbeschreibender Geometrieinformation. Der Prüfvorschlag stellt also eine Instrumentenprüfung im Sinne der VDI/VDE, [2002] und DIN 14253 dar, die Eignung des Messgerätes bezogen auf eine definierte Messaufgabe zu bewerten [Hennes, 2010].

Bei einer Beurteilung nach der DIN 15530-3 wird ein Instrument unter praxisnahen Bedingungen geprüft. Das Messprinzip sollte dem Prinzip der beabsichtigten Erfassung gefertigter Struktur entsprechen, so dass die ermittelten Kenngrößen in direktem Zusammenhang mit der Eignung des Instrumentes stehen. Messunsicherheitsermittlungen unter Einbeziehung eines kalibrierten Normals sind zwar immer mit einem erhöhten Aufwand und Kosten verbunden, andererseits sind Untersuchungen zur Vergleichbarkeit wesentlich aussagekräftiger und die ermittelten Messunsicherheiten beinhalten alle relevanten systematischen Einflüsse.

4.4.1 Aufbau eines Prüfkörpers zur Bestimmung der Formtreue

In Abbildung 4.15 ist in Anlehnung an die bei den Untersuchungen verwendete Messwand der Entwurf eines Prüfkörpers abgebildet.

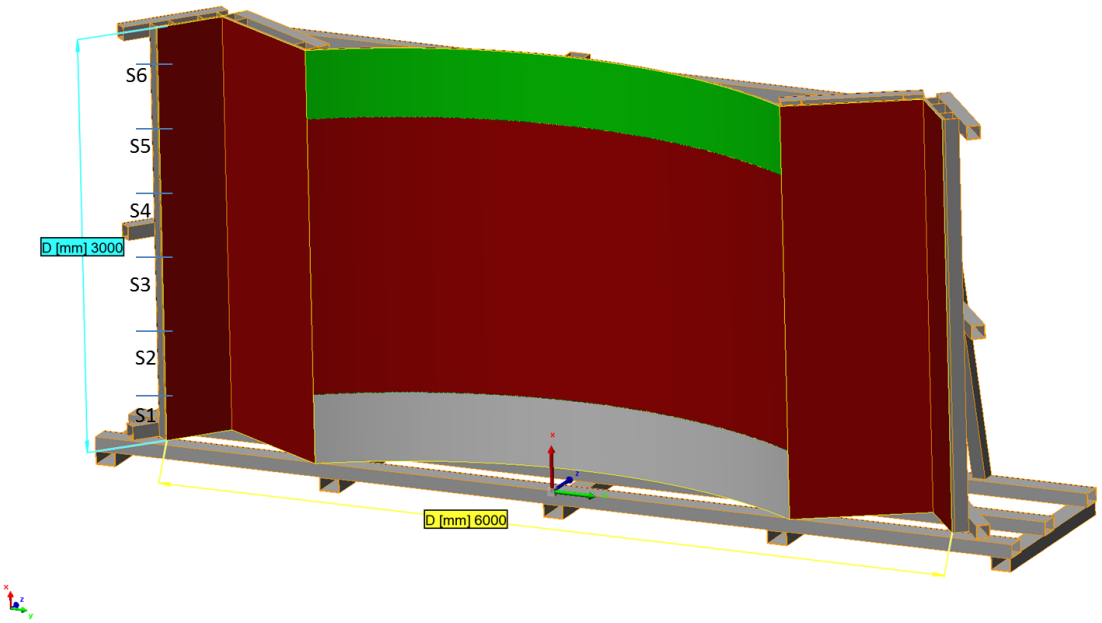


Abbildung 4.15: Vorschlag eines Prüfkörpers

Bezogen auf die Messaufgaben ist der Aufbau und das Vorgehen zur Prüfung gekennzeichnet durch:

- Die Größe und Form entsprechen der Aufnahmesituation eines Einzelstandpunktes.
- Für die Ausdehnung des Prüfkörpers sind 6 m x 3 m ausreichend, um die experimentell bestimmten Effekte zu erfassen.
- Es ist eine Reflektivität (überwiegend rote Farbgebung) von ca. 50 % gewählt, da ideale Reflektionsverhältnisse nur selten vorkommen.
- Die Prüfstandpunkte sollten in kalibrierten Abständen zum Prüfkörper definiert werden. Vom Standort des Prüfkörpers sollten Entfernungen bis ca. 20 m realisierbar sein.
- Der Prüfkörper sollte aus Flächen unterschiedlicher Oberflächenorientierung aufgebaut sein, um eine Einpassung der Punktwolke zu ermöglichen. Soll die Instrumentenprüfung von freien Standpunkten erfolgen, sind Restriktionen bezüglich der Freiheitsgrade bei der Einpassung festzulegen oder zusätzliche abgeschrägte Flächen einzuplanen.
- Bereiche unterschiedlicher Intensität des rückgestreuten Signals sind vorgesehen, um Effekte in Abhängigkeit von der Reflektivität bzw. Farbe zu erfassen. Diese Flächenanteile sind in Bezug auf die Untersuchung zur Farbgebung in Grün gestaltet bzw. ein Bereich mit idealen Reflektionsbedingungen (in grau dargestellt) ist vorzusehen.

4.4.2 Prüfablauf

Die Anforderungen der DIN 15530-3 für taktile Koordinatenmessgeräte sehen eine Unsicherheitsermittlung durch Wiederholungsmessungen vor. Da eine „echte“ Wiederholungsmessung mit TLS-Systemen nicht möglich ist, wird diese Vorgehensweise durch eine Filterung der Messdaten ersetzt. Für diese Filterung können unterschiedliche Verfahren zur Anwendung kommen. Splinefilter für die Profilauswertung sind bereits in Normen definiert. Die Normen zielen zwar auf die Trennung der Gestaltabweichungen einer Oberfläche ab, insbesondere Rauhigkeit und Welligkeit. Interpretiert man die Rauhigkeit als zufällige Abweichungen können die Vorgehensweisen zur Filterung problemlos übertragen werden. Zur Durchführung von Prüfmittelfähigkeitsuntersuchungen ist in Abhängigkeit von der Zielstellung der Prüfung die Art und der Umfang eines Prüfvorganges festzulegen. Für turnusmäßige Prüfvorgänge kann eine geringe Anzahl an Messungen ausreichend sein.

Bei einer entsprechenden Festlegung des Prüfumfangs, angepasst an die Messaufgabe, können Restriktionen der Aufnahmekonfiguration abgeleitet werden. Die Prüfung der Maßstabstreue der Instrumente kann durch zusätzliche Zielzeichen oder Kenngrößen, z. B. durch die Lage definierter Flächen zueinander, erfolgen. Im Vordergrund dieser

Arbeit steht die Bewertung der Formtreue der Messgeräte. Eine detaillierte Konstruktion, Auslegung und Evaluierung eines Prüfkörpers soll späteren Arbeiten vorbehalten sein. Dabei sollte auch der Ansatz einer Rückwärtsmodellierung der entstandenen Abweichungen und der Fehlerursachen berücksichtigt werden. Zur Ableitung von Kenngrößen und die vergleichende Beurteilung der untersuchten Scanner wird nachfolgend auf die Ergebnisse unter Nutzung der Messwand eingegangen.

4.4.3 Kenngrößen

In den bisherigen Prüfverfahren wird die Kenngröße Antastabweichung sowohl als Kennwert für das Abweichungsverhalten des TLS-Systems in einem kleinen lokalen Teil des Messvolumens beschrieben (Formtreue) [Kern, 2011a], aber auch als Wert für das zu erwartende Messrauschen genutzt [Kern, 2008]. Die Kenngröße kann durch das vorgeschlagene Verfahren in zwei Teilgrößen getrennt werden.

Aus der Punktwolke des Prüfkörper sollte in äquidistanten Schritten *S1 -S6* (siehe Abbildung 4.15) die Abweichungen zum Referenzprofil ermittelt werden. Die Kenngröße *Formtreue* eines Schnittes wird definiert als größte positive örtliche Abweichung addiert zum Betrag der größten negativen Abweichung eines gefilterten Profils/Fläche auf einem flächenhaften Prüfkörper. Sie beschreibt die erreichbare Modellierungsgenaugigkeit eines TLS-Systems. Anzugeben ist der maximale Wert aller Profilschnitte. Die definierte Kenngröße entspricht dem eigentlichen Sinn der Größe Antastabweichung in der VDI/VDE, [2002] erweitert um eine Bereinigung der zufälligen Abweichungen. Die Kenngröße *Rauschverhalten* beschreibt den zufälligen Anteil eines Profils/Fläche, der bei der Filterung abgeschnitten wird. Sie entspricht dem zu erwartenden Messrauschen auf der Oberfläche.

Kleinste prüfbare Toleranz

Zur Beurteilung der Eignung eines Messsystem oder -prozesses sind Grenzwerte festzulegen. Diese werden im Normalfall zwischen Kunde und Auftragnehmer festgelegt. Der Grenzwert Q legt fest, wie groß die Ausnutzung des Spezifikationsbereiches ist [Kistner et al., 2015]. Das bedeutet, wie in Abbildung 4.16 ersichtlich, dass der festgelegte Grenzwert Q den Anteil der Toleranzzone T beschreibt, der von der Unsicherheit U des Messsystems bzw. -prozesses aufgebraucht werden darf. Richtwerte für den Grenzwert sind 15 % für das Messsystem Q_{MS} und 30 % für den Messprozess Q_{MP}. Die Eignung eines Messsystems in Bezug zu einer vorgegebenen Toleranz kann durch diese Grenzwerte beziffert werden.

$$q = \frac{2U_{MS}}{T} * 100\% \tag{4.13}$$

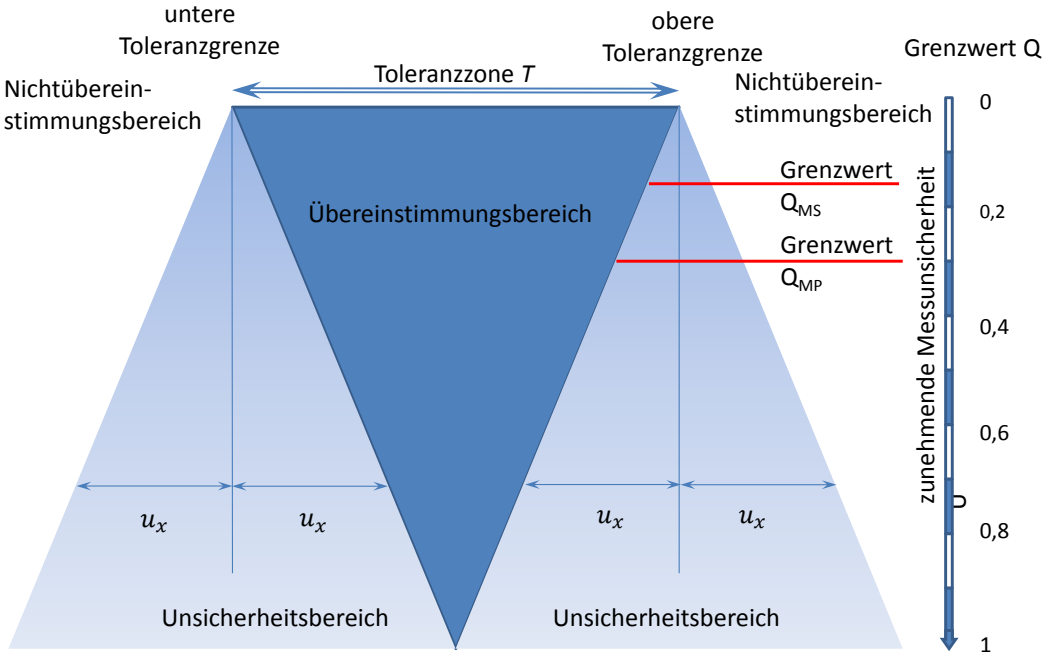


Abbildung 4.16: Zusammenhang Übereinstimmungsbereich Toleranz, Unsicherheit, Q_{MS} und Q_{MP} (in Anlehnung an [Kistner et al., 2015])

Die kleinste prüfbare Toleranz ergibt sich nach Kistner et al., [2015] mit $q_{MS} \leq Q_{MS}$ als

$$T_{MIN-U_{MS}} = \frac{2U_{MS}}{Q_{MS}} * 100\% \tag{4.14}$$

4.4.4 Anwendungsbereich

Das vorgestellte Verfahren dient der Überprüfung terrestrischer Laserscanner in Bezug auf die Formtreue. Unvermeidliche unbekannte oder nicht korrigierbare systematische Abweichungen in der Entfernungsmessung oder den Achssystemen führen zu Abweichungen zwischen der wahren und der erfassten Geometrie. Diese Abweichungen sollen mittels der Prüfverfahren ermittelt werden und für die realistische Angabe einer Messunsicherheit für Formabweichungen genutzt werden. Die Forderung des GUM, dass systematische Abweichungen wenn möglich zu korrigieren sind, bleibt bestehen. Das vorgestellte Prüfverfahren kann gegenüber Kunden dazu dienen, einen Nachweis zur Fähigkeit des Instruments bezüglich der Prüfbarkeit von spezifizierten Flächentoleranzen zu führen.

Anhand der dargestellten Untersuchungen kann zum Abschluss des Kapitels eine Bewertung der untersuchten Scannertypen in Bezug auf ihre Eignung zur Prüfung von Flächentoleranzen erfolgen. Aus den in Tabelle 4.3 dargestellten Kenngrößen Formtreue

als systematische Komponente u_{syst} und Messrauschen als zufällige Komponente u_{zuf} können die untersuchten Laserscanner auf Basis der kleinsten prüfbaren Flächentoleranz verglichen werden. Der definierte Kennwert Formtreue F wird abgeleitet aus den ermittelten Ober- y_+ und Untergrenzen y_- innerhalb der sich das gefilterte Profil befindet. Sind Größen durch eine Min- und Max-Fehlergrenze gekennzeichnet, kann eine rechteckförmige Wahrscheinlichkeitsverteilung angenommen werden. Die Unsicherheit berechnet sich dann als

$$u_{syst} = \frac{(y_+ - y_-)}{2\sqrt{3}} = \frac{F}{2\sqrt{3}} \tag{4.15}$$

Das Messrauschen ergibt sich als Reststreuung s_0 des Splineprofils (siehe Abschnitt 4.3). Für den Prüfkörper wird aufgrund der durchschnittlichen Transformationsabweichungen der Streifenlichtprojektoraufnahmen 0.05 mm als Standardunsicherheit u_{Kal} angenommen. Die erweiterte Messunsicherheit U_{MS} ergibt sich durch Einsetzen der Unsicherheitskomponenten in Formel (3.9) mit $k = 2$. Bei einem Grenzwert von $Q_{MS} = 15\%$ kann unter Beachtung der beidseitigen Einschränkung einer symmetrischen Toleranzzone die kleinste prüfbare Flächentoleranz nach Formel (4.14) angegeben werden.

Tabelle 4.5: Vergleich der Laserscanner anhand der minimal prüfbaren Flächentoleranz

Scanner	Unsicherheitskomponenten			erweiterte Unsicherheit	prüfbare Toleranz
Typ	u_{zuf}	u_{syst}	u_{Kal}	U_{MS}	T_{min}
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Z+F Imager 5010	0.3	0.0	0.07	0.6	±4
Faro Focus S120 I	0.7	0.5	0.07	1.7	±12
Faro Focus S120 II	0.8	0.5	0.07	1.9	±13
Trimble FX	0.4	0.1	0.07	0.8	±6
Leica HDS 6000	0.9	0.1	0.07	1.8	±12

Die in Tabelle 4.5 angegebenen Unsicherheiten und minimal prüfbaren Toleranzen gelten für das Messsystem und den beschriebenen Prüfaufbau, lassen sich aber auch auf andere Anwendungen sowie ähnliche Messkonfigurationen übertragen. Für die Bewertung der Eignung eines Messgerätes bei vorgegebener Toleranz kann auf Basis des Prüfaufbaus die Erstellung von Kennlinien über die Entfernung erfolgen. Diese Kennlinien der prüfbaren Toleranz können zur Ableitung von Einschränkungen der Aufnahmekonfiguration genutzt werden. Zur Prüfmittelüberwachung kann eine Frist für eine wiederkehrende Messmitteluntersuchung festgelegt werden.

Insbesondere für den industriellen Einsatz ist das Erkennen und Bewerten der Messunsicherheiten von Bedeutung, da nicht erkannte Unsicherheiten bei jeder Messung dem zu bestimmenden Produktmerkmal zugeordnet werden. Systematische Abweichungen oder ein erhöhtes Messrauschen werden dem Fertigungsprozess zugeschrieben, was erhebliche

Folgekosten verursachen kann. Dies gilt insbesondere für die Anwendung bei Großstrukturen mit überwiegend Kleinserien und Unikatfertigungen. Das vorgestellte Verfahren bietet die Möglichkeit einer realistischen Abschätzung der systematischen und zufälligen Anteile der Messunsicherheit bei der Formanalyse an Großstrukturen. Die Ermittlung der Formtreue eines Laserscanners liefert für objektbezogene Auswertungen einen Kennwert für die Genauigkeit, die durch eine geeignete Modellierung der Punktwolke erreicht werden kann. Gleichzeitig kann aus der Art der Abbildungsfehler Rückschlüsse auf die Fehlerursachen gezogen werden. Dieser Ansatz der Rückwärtsmodellierung auftretender Abweichungen von einem Normal kann einen zukünftigen Schwerpunkt weiterer Forschungsarbeiten darstellen.

5 Lokale Approximation zur Bestimmung der Formabweichungen

Zur Bewertung verschiedener TLS-Systeme wurde die kleinste prüfbare Flächentoleranz experimentell ermittelt. Die zugrunde liegende Messunsicherheit setzt sich aus einer systematischen und einer zufälligen Komponente zusammen. Sie kann für die Angabe einer merkmalsspezifischen Unsicherheit nach Ermittlungsmethode Typ A des GUM (siehe Abschnitt 3.1.3) genutzt werden. Der Vorteil scannender Systeme gegenüber taktilen Verfahren liegen in der hohen Informationsdichte. Eine Fläche kann durch eine Vielzahl von Punkten beschrieben werden. Bei der Messdatenerfassung ist auf ein sinnvolles Verhältnis zwischen Spotgröße und Auflösung am Objekt zu achten [Rietdorf, 2005]. Bei entsprechender Wahl des Verhältnisses kann eine fast lückenlose Beschreibung der Fläche erreicht werden (siehe Abbildung 5.1).

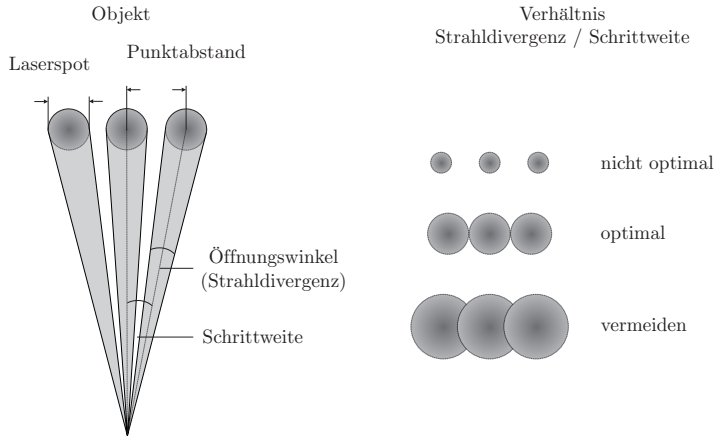


Abbildung 5.1: Zusammenhang zwischen Strahlendivergenz und Auflösungsvermögen [Rietdorf, 2005]

In der Praxis ist das dargestellte optimale Verhältnis am gesamten Objekt aufgrund der sich ändernden Entfernung und Auftreffwinkel nie zu erreichen und auch meist wirtschaftlich nicht sinnvoll. Anderseits kann auch bei idealem Verhältnis ein vorgegebener Punkt nie genau getroffen werden. Die örtliche Formabweichung ist in Abschnitt 3.1.1 definiert als Schnittpunkt der Oberflächennormale im Prüfpunkt mit der wahren Oberfläche. Zur Bestimmung des vorhandenen Oberflächenverlaufes kann durch die Wahl einer geeigneten Ansatzfunktion die Oberfläche approximiert werden. Dabei wird unterschieden zwischen globalen und lokalen Modellen. Globale Approximationen rekonstruieren die

gesamte Oberfläche, lokale Modelle nutzen nur einen relevanten Teil der Messpunkte zur Bestimmung geometrischer Informationen. Die Wahl der Modellierung und Ansatzfunktion hängt von der Zielstellung der Messaufgabe ab. Beide Modelle können zur Reduzierung der zufälligen Abweichungen genutzt werden.

5.1 Maßnahmen zur Verringerung der Messunsicherheit

Die Verwendung genauerer Messverfahren, die Korrektur bekannter systematischer Abweichungen und die Mehrfachmessung dienen der Reduktion der Messunsicherheit. Die Mittelwertbildung kann dabei zur Verringerung zufälliger Abweichungen genutzt werden [Keferstein et al., 2008]. Die Korrektur systematischer Abweichungen sollte bei der mangelnden Kenntnis der Funktionsweise den Herstellern überlassen werden [Kern et al., 2008]. Die Verwendung genauerer Messverfahren ist bei Bauteilgrößen von mehreren Metern aus wirtschaftlichen Gründen meist nicht vertretbar.

Werden punktuell messende Verfahren eingesetzt, kann eine Reduzierung der zufälligen Abweichungen durch Mehrfachmessung erreicht werden. Die Streuung des Mittelwertes ist dabei um die Wurzel der Anzahl der Messungen kleiner als die Streuung einer Einzelmessung. Der sich ergebende Vorteil ist zudem die statistische Beurteilung des Messergebnisses durch die Standardabweichung. Für scannende Systeme, wie die beschriebenen Panoramascanner, ist die Möglichkeit einer Wiederholungsmessung eines einzelnen Punktes in der Regel nicht möglich und im praktischen Einsatz auch nicht gewollt. Hier besteht gerade der Vorteil solcher Systeme mit einer möglichst großen Anzahl an Einzelpunkten eine Fläche mit einer sehr hohen Informationsdichte beschreiben zu können. Die Messunsicherheit lässt sich dann durch die Berücksichtigung möglichst vieler Messpunkte bei der Merkmalsextraktion reduzieren. Das Potential der Unsicherheitsreduzierung durch den Einsatz scannender Systeme verdeutlicht Abbildung 5.2. Handelt es sich beim Ziel der Datenerfassung um die Rekonstruktion bekannter Geometrien,

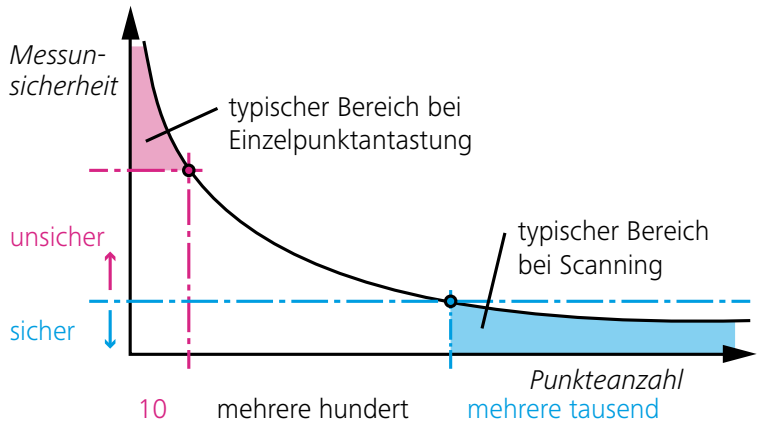


Abbildung 5.2: Reduzierung der Messunsicherheit durch viele Messpunkte [Zeiss, 2013]

können die entsprechenden regelgeometrischen Elemente in die Punktwolke eingepasst werden. Die hohe Redundanz beim Scanning kann für die Ableitung einer Genauigkeitsaussage genutzt werden. Eine in die Punktwolke eingepasste Ebene kann durch die hohe Anzahl von Überbestimmungen eine sehr hohe Genauigkeit erreichen, vorausgesetzt systematisch wirkende Effekte werden berücksichtigt.

5.2 Methodischer Ansatz zur lokalen Approximation

Für die Prüfung von Freiformflächen mit hohen Genauigkeitsanforderungen oder stärkeren Krümmungen ist der geometriebasierte Modellansatz nicht mehr ausreichend. Die generalisierte Parametrierung führt zu Modellunsicherheiten aufgrund der Vernachlässigung von Objektdetails. Unregelmäßige Punktverteilungen führen zu einer verzerrten Parameterschätzung und damit zu weiteren systematisch wirkenden Modellunsicherheiten [Holst, 2015]. Zur Weiterentwicklung des Ansatzes einer lokal begrenzten Nutzung umliegender Punkte zur Bestimmung von Formabweichungen soll eine Approximationsmethode gewählt werden, die:

- eine flächenhafte Betrachtung der umliegenden Punkte zur Verringerung der Messunsicherheit umzusetzt,
- die Oberflächencharakteristik C2-stetiger Flächenverläufe berücksichtigt (zweimal stetige Differenzierbarkeit als Eignungskriterium für Freiformflächen),
- eine Gewichtung der umliegenden Datenpunkte in Abhängigkeit vom Abstand zum Prüfmerkmal einbezieht,
- in Kombination mit der Ansatzfunktion robust gegen die beim Laserscanning auftretenden Rauschverhältnisse ist,
- sowie keine Einschränkungen bezüglich der Datenverteilungen vorgibt, da insbesondere bei der Überlagerung von Scans unregelmäßige Punktverteilung zu erwarten sind.

Ein Ansatz zur Bestimmung der Formabweichung kann die Nutzung von Interpolationsmethoden sein, wie z. B. die gewichtete Mittelwertbildung. Unter der Annahme, dass weiter entfernte Punkte einen geringeren Einfluss haben, kann der vermutlich wahre Wert des gesuchten Oberflächenpunktes geschätzt werden. Näher am Prüfpunkt gelegene Punkte haben dann einen größeren Anteil am Mittelwert. Die Festlegung der Gewichtung ist dabei der entscheidende Faktor. Im Folgenden werden Methoden zur Oberflächenbeschreibung, die auf einer Distanzgewichtung beruhen, näher erläutert.

5.2.1 Shepard-Methode

Die Inverse-Distanz-Methode wurde von SHEPARD, [1968] entwickelt und basiert auf einer Gewichtung der umgekehrten proportionalen Distanz der Datenpunkte zu einem gesuchten Punkt. Die Methode entspricht dem in der Geodäsie als gewichtete Mittelwertbildung bezeichneten Verfahren [BORKOWSKI, 2004].

$$y(\widehat{x}) = \sum_{i=1}^{n} w_i(x) * y_i \tag{5.1}$$

Die Methode wird häufig verwendet, um den Funktionswert y an einer definierten Stelle $\widehat{x}$ zu schätzen. Die Gewichtsfunktion (Basisfunktion) w definiert SHEPARD, [1968] als Reziproke des Abstandes r zu einer beliebigen positiven Potenz m.

$$w(i) = \frac{r_i(x)}{\sum_{j=1}^{n} r_j(x)} \text{ mit } r_i = \frac{1}{\|\widehat{x} - x\|^m} \text{ und } \sum w_i = 1 \tag{5.2}$$

Der Nachteil der Methode ist, dass in den Stützstellen x_i entweder Knicke oder Gradientennullstellen entstehen [GODZIERZ, 2007]. Die Stetigkeit und Differenzierbarkeit der Funktion ist nicht gesichert. Mit dem Ansatz können Interpolationswerte an definierten Stellen berechnet werden.

5.2.2 Radiale Basisfunktionen

Um entsprechend der Definition in Formel (3.1) den Schnittpunkt mit der wahren Oberfläche zu ermitteln wird eine analytisch beschriebene Funktion gesucht. Der häufigste Fall der Beschreibung von Flächen beruht auf der Vorgabe einer Gitterstruktur, die die Charakteristik der Flächen bestimmt. Die bekanntesten Vertreter sind die aus dem Reverse Engineering bekannten B-Spline-Flächen und ihrer Erweiterung zu NURBS (siehe Abschnitt 2.4.3). Die Gitterstruktur beruht auf der paarweise Bildung von Produkten der Basisfunktionen und wird als Tensorprodukt bezeichnet [FAHRMEIR et al., 2009]. In dieser Arbeit sollen Verfahren auf Grundlage der Radialen Basisfunktionen zur Berücksichtigung der Objektcharakteristik genutzt werden. Diese Ansatzfunktionen werden als Gitterfreie Methoden bezeichnet.

Radiale Basisfunktionen sind distanzgewichtete Funktionen deren Wert nur vom Abstand zum Ursprungspunkt der Funktion abhängig ist. Allgemein sind die Funktionen definiert als Funktion der euklidischen Distanz zwischen einem definierten Punkt, auch als Zentrum bezeichnet, und einem Datenpunkt. Die Bezeichnung Gitterfreie Methoden ergibt sich, da die Position der Zentren frei wählbar ist und nicht, wie bei B-Splines üblich, in einem funktionsbeschreibenden Gitter vorgegeben wird. Dabei können die Datenpunkte selbst als Zentren dienen oder nur eine Teilmenge der Datenpunkte gewählt werden, wodurch sich die Basisfunktionen im Gegensatz zum Tensorproduktansatz der splinebasierten Verfahren automatisch den Beobachtungen anpassen [FAHRMEIR et al., 2009]. Zur

Beschreibung einer analytischen Fläche wird eine Linearkombination der Basisfunktionen verwendet. Für eine Interpolation der k Stützpunkte gilt:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{n} \beta_k \phi(\|x - x_k\|_2) \tag{5.3}$$

Die Koeffizienten β_k werden durch die Lösung eines linearen Gleichungssystems mit dem Vektor der Beobachtungen l bestimmt.

$$A * \beta_k = l \tag{5.4}$$

A ist die Designmatrix der radialen Basisfunktionen in Abhängigkeit vom Abstand zu den Zentren. Mit $r = (\|x - x_k\|))$ ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} \phi(r_{11}) & \phi(r_{12}) & \dots & \phi(r_{1n}) \\ \phi(r_{21}) & \phi(r_{22}) & \dots & \phi(r_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(r_{n1}) & \phi(r_{n2}) & \dots & \phi(r_{nn}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ \vdots \\ f(x_n) \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

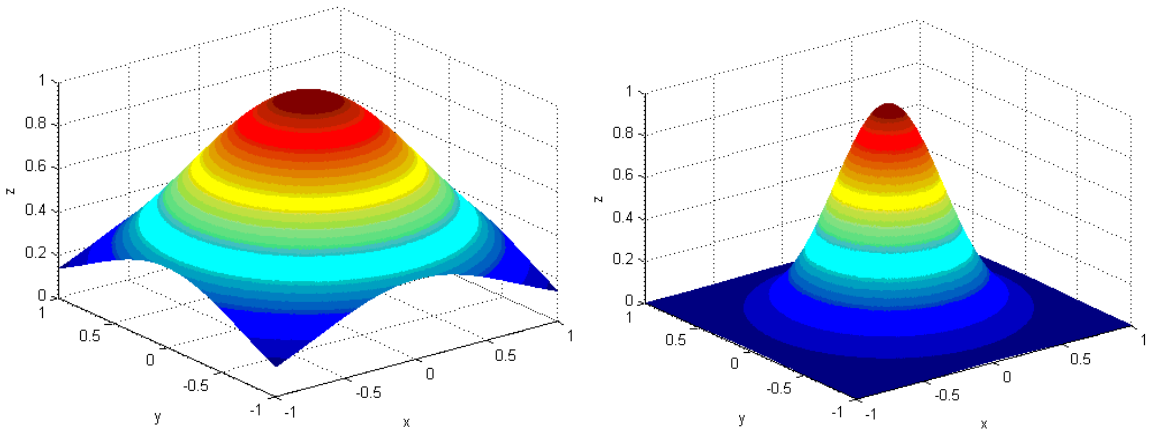
Die bekanntesten und meist verwendeten Radialen Basisfunktionen sind in der Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Radiale Basisfunktionen

Name	**Radiale Basisfunktion**
linear	$\phi(r) = \varepsilon r$
Gauß	$\phi(r) = e^{(-\varepsilon r)^2}$
Wendland (C2-stetig)	$\phi(r) = (1 - \varepsilon r)^4 + (4\varepsilon r + 1)$
Thin-Plate-Splines	$\phi(r) = (\varepsilon r)^2 \log(\varepsilon r)$
Hardys Multiquadric	$\phi(r) = \sqrt{(\varepsilon r)^2 + c^2}$

* ε Formparameter der Basisfunktion $\varepsilon > 0$

Durch die Veränderung des Parameters ε kann, wie in Abbildung 5.3 dargestellt, der Einflussbereich der Radialen Basisfunktion gesteuert werden. Aus diesem Grund wird ε als Formparameter bezeichnet [Fasshauer, 2008a]. Für die Anwendung an technischen Strukturen sind insbesondere die Wendlandfunktionen und die Thin-Plate-Spline-Funktion von Interesse. Mit den Wendlandfunktionen wird es möglich unterschiedliche Stetigkeit der erzeugten Fläche zu fordern. Die von Wendland entwickelten Funktionen haben außerdem einen kompakten Träger. Sie eignen sich somit besonders bei der Anforderung eines geringen Rechenaufwandes. Der Thin-Plate-Spline (TPS) wird in der Literatur als 2D-Erweiterung der kubischen Splines bezeichnet [Pyttel, 2007], die im Abschnitt 4.2.2 dargestellt sind. Die Thin-Plate-Splines haben darüber hinaus auch einen physikalischen Hintergrund. Duchon, [1976] stellt die Thin-Plate-Splines als Fundamentallösung einer biharmonischen Gleichung vor. Die Lösung repräsentiert



(a) Gauß RBF mit $\varepsilon = 1$ (b) Gauß RBF mit $\varepsilon = 5$

Abbildung 5.3: Einfluss des Formparameters am Beispiel der Gauß-Funktion

näherungsweise das Verhalten einer dünnen Metallplatte. Wird eine Platte an festen Punkten gebogen, so nimmt sie einen Zustand der minimalen Biegeenergie ein. Es ist also eine besondere Eignung für technisch gefertigte Strukturen ist zu erwarten. Die eigentliche Platte wird dabei durch das Hinzufügen einer Ebenengleichung zur Formel (5.3) beschrieben.

5.2.3 RBF-Approximation

Der hinzugefügte Term liefert die Eigenschaft der polynomialen Präzision, d.h. für Daten, die von einem Polynom abgetastet wurden, ist der Interpolant mit einem Polynom (minimalen Grades) identisch [Hering-Bertram, 2006]. Durch das Hinzufügen einer Ebenengleichung ergibt sich für den räumlichen Fall:

$$f(x,y) = a_1 x + a_2 y + a_3 + \sum \beta_k \phi(r) = \sum P(x,y)c + \sum \beta_k \phi(r) \tag{5.6}$$

Ein Polynom kann dargestellt werden als Linearkombination einzelner Polynome P mit $p_n = [1, x_n, y_n]$, die Monome genannt werden, und den gesuchten Koeffizienten c. Der Modellansatz lautet in Matrixform.

$$f(x,y) = Pc + A\beta + \epsilon \tag{5.7}$$

In Analogie zum natürlichen kubischen Spline ergibt sich für das zu minimierende Funktional eine Zielfunktion, die neben der Minimierung der Abweichungsquadrate die Gesamtkrümmung minimiert.

$$\sum (f_i - f(x,y))^2 + \mu \int_{\mathbb{R}^2} \Delta f(x,y))^2 \Rightarrow min. \tag{5.8}$$

Dabei ist $\Delta f(x, y)$ der Laplace-Operator für den gilt:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{5.9}$$

Das Verhältnis der beiden Terme wird analog zu Formel (4.3) durch einen zu bestimmenden Glättungsfaktor μ und der integrale Teil der Gleichung durch $\beta' A\beta$ ausgedrückt. Die zu minimierende Funktion ergibt sich dann mit den a-priori Einträgen q_i der Kofaktorenmatrix Q_{ll} als:

$$\sum q_i^{(-1)}(f_i - f(x, y))^2 + \mu\beta' A\beta \Rightarrow min. \tag{5.10}$$

Einsetzen von Formel (5.7) und Nullsetzen der partiellen Ableitungen nach den Unbekannten β und c führt zu einem linearen Gleichungssystem, mit dem die gesuchten Koeffizienten des polynominalen Teils und der radialen Basisfunktionen ermittelt werden können [Maresch, 2006].

$$\begin{bmatrix} A + \mu Q_{ll}^{(-1)} & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Die Lösung des Minimierungsproblems führt zu einem linearen Ausgleichsproblem mit Bedingungen zwischen den Unbekannten. Anzumerken ist, dass nur die gleichzeitige Minimierung der Abweichungsquadrate und der Kovarianzfunktion zu einer Minimierung der Sobolev-Seminorm führt. Diese Norm misst sowohl die Größe als auch die Regelmäßigkeit einer Funktion und spielt in der Mathematik eine bedeutende Rolle bei der Approximation glatter Funktionen. Die Schätzer für die gesuchten Koeffizienten ergeben sich mit $M = A + \mu Q_{ll}$ aus:

$$c = [P^T M^{-1} P]^{-1} P^T M^{-1} l; \tag{5.12}$$

und

$$\beta = M^{-1}(l - Pc) \tag{5.13}$$

Die Lösung der RBF-Approximation stimmt formal überein mit den Lösungen des intrinsischen Kriging und der Kollokation, die aus der Geostatistik bekannt sind [Kampshoff, 2005]. In der deterministischen Interpretation werden Glattheitsbedingungen eingeführt, was streng genommen zur Folge hat, dass der Schätzer nicht mehr erwartungstreu ist. Wird die Regularisierung als Erwartungswert und Varianz einer Vorinformation interpretiert kann der Schätzer im Sinne der Bayes-Statistik als optimal und erwartungstreu angenommen werden [Brockmann, 2008]. Im Unterschied zu der geostatistischen Herangehensweise werden für Basisfunktionsansätze die Parameter der Korrelationsfunktion vorab ausgewählt [Fahrmeir et al., 2009].

Der Glättungsparameter μ, der den Kompromiss zwischen Glattheit und Datentreue festlegt, verbleibt als ein unbekannter Parameter und kann durch ein geeignetes Verfahren ermittelt werden (siehe Abschnitt 4.2.3). Ziel der Kollokation ist die Filterung der Daten und die Prädikation von Neupunkten durch die Aufteilung in einen Signal- und einen Rauschanteil. Der Signalanteil wird beim Basisfunktionsansatz durch die Wahl der radialen Basisfunktion vorgegeben. Die Gewichtsfaktoren der Basisfunktionen entsprechen dem Korrelatenvektor β, wodurch die Oberflächenbeschreibung in Formel (5.7) bestimmt ist. Entsprechend der Definition in Abschnitt 3.1.1 ergibt sich die Formabweichung als Schnittpunkt des Oberflächennormalenvektors im Prüfpunkt mit dieser Funktion. Der Schnittpunkt berechnet sich durch Gleichsetzen der Funktion mit dem Parametervektor und entsprechendes Auflösen der sich ergebenden Gleichungssysteme. Für die Kovarianzmatrix der ermittelten Funktion gilt:

$$C_{ff} = PC_{cc}P^T + AC_{\beta\beta}A^T \tag{5.14}$$

mit

$$\begin{aligned} C_{cc} &= (P^T M^{-1} P)^{-1} \\ C_{\beta\beta} &= M^{-1} - M^{-1} P C_{cc} P^T M^{-1} \end{aligned} \tag{5.15}$$

da es per Definition keine Korrelation zwischen Korrelaten und den Parametervektor c gibt [Niemeier, 2002]. Die Unsicherheit der Formabweichung ist durch die Standardabweichung des Schnittpunktes bedingt und kann durch einfache Anwendung des Unsicherheitsfortpflanzungsgesetzes ermittelt werden.

5.2.4 Moving Least Square

Die zweite Ansatzfunktion, die in dieser Arbeit zur Filterung der Messdaten verwendet werden soll, beruht auf der Methode der gewichteten kleinsten Quadrate. Anstatt für den gesamten Definitionsbereich eine Funktion zu approximieren, wird für jeden Punkt eine einzelne Funktion entwickelt. Für die Berechnung müssen nur lineare Gleichungssysteme geringer Größe gelöst werden, die anschließend aufsummiert werden [Fasshauer, 2008a]. Es handelt sich wieder um eine Linearkombination einfacher Basisfunktionen.

$$s(x,y) = \sum_{i=1}^{n} P_i(x,y) c_i(x,y) \tag{5.16}$$

Das Konzept ist analog der RBF-Approximation. Jeder Datenpunkt ist mit einer Approximation verbunden. Zur Oberflächenrekonstruktion wird für den jeweiligen Punkt ein örtlich begrenzter Bereich durch ein Polynom niedrigen Grades beschrieben. Die Approximation der ortsgebundenen Funktion erfolgt durch ein Approximation nach der Methode der gewichteten kleinsten Quadrate. Als Wichtungsfunktion wird eine radiale Basisfunktion eingesetzt. Durch die Funktion werden die Eigenschaften eines harmonischen Flächenverlaufs, Symmetrie und der Einflussbereich festgelegt. Die Menge

an lokalen Funktionen wird anschließend zu einer Gesamtfunktion für den Bereich zusammengefügt. Das Grundprinzip geht auf LANCASTER et al., [1981] zurück und definiert die Ermittlung der gesuchten Koeffizienten im Stützpunkt $S_i(x, y)$ durch Minimierung der gewichteten Abweichungsquadrate. Als Lösung des linearen funktionellen Modellansatzes der Regression mit dem Vektor l der Beobachtungen in den Stützpunkten $S_i(x, y)$ ergibt sich:

$$c_{S_i} = (P^T W P)^{-1} P^T W l \tag{5.17}$$

Die Designmatrix P entspricht der Monome-Darstellung für $p_n = [1, x_n, y_n]$ bei der Wahl einer Ebene als Basisfunktion.

$$P = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

Als Gewichtungsfaktoren werden a priori-Informationen eingeführt. Die Gewichtsmatrix wird aus der gewählten Radialen Basisfunktion und den Distanzen der Datenpunkte gebildet.

$$W_n = \begin{bmatrix} \phi(r_1) & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & \phi(r_n) \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

Für jeden Stützpunkt werden mittels Ausgleichsrechnung die Koeffizienten der Polynome berechnet. Diese sind nur für die entwickelte Stelle gültig. Für jeden weiteren Stützpunkt erfolgt eine separate Berechnung der Koeffizienten. Daraus ergibt sich eine Reihe von räumlich begrenzten Näherungen in jedem Zentrum. Zur Rekonstruktion der Gesamtfunktion müssen diese Annäherungen kombiniert werden, um eine Approximation für das Parametergebiet zu bilden. Da die Gesamtfunktion gewichtet ist, hat diese Kombination der Basisfunktionen die gleichen Kontinuitätseigenschaften [COOMBE, 2006]. Das Zusammensetzen der gesuchten Funktion erfolgt auf Basis der Technik der Partition der Eins.

$$\Phi_i(r) = \frac{\phi_i(r)}{\sum_{j=1}^{n} \phi_j(r)} \text{ mit } \sum \Phi_i \equiv 1 \tag{5.20}$$

Die Vorgehensweise beruht auf dem von SHEPARD, [1968] entwickelten Verfahren. Es besteht in Analogie zur Berechnung der B-Splines-Basisfunktionen deren Gewichte sich ebenfalls zu Eins summieren [WENDLAND, 2010]. Die gesuchte Funktion berechnet sich dann aus:

$$s(x, y) = \sum_{i=1}^{n} p_i(x, y)^T \Phi_i c_i(x, y) \tag{5.21}$$

Das Vorgehen entspricht für den abstrakten Fall eines Polynoms 0. Grades der inversen Distanzgewichtung, wie sie dem von SHEPARD, [1968] entwickelten Verfahren zugrunde liegt [LANCASTER et al., 1981]. Veranschaulicht bedeutet das Vorgehen, dass die Beschreibung des Oberflächenverlaufes durch die Verschiebung der Ansatzfunktion über das gewählte Parametergebiet erfolgt. Daraus leitet sich der Name Moving-Least-Square (MLS) ab.

Das MLS-Verfahren gehört zur Gruppe der linearen Glättungsverfahren. Für diese Verfahren gilt, dass die Glättungsmatrix G der Prädikationsmatrix bzw. Hat-Matrix entspricht [FAHRMEIR et al., 2009]. Die Glättungsmatrix der gesuchten Fläche setzt sich aus den Koeffizienten der gewichteten kleinsten Quadrate-Schätzung an den Stützstellen und den modifizierten Gewichten Φ zusammen. Da die Koeffizienten und Gewichte abhängig von der Entwicklungsstelle sind, werden sie für jede Stelle separat berechnet.

$$G_{s(x,y)} = \begin{bmatrix} g_{S_1} \\ g_{S_2} \\ \vdots \\ g_{S_i} \end{bmatrix} \quad g_{S_i} = p_i \Phi(x_i, y_i) \begin{bmatrix} (P^T W_1(S_1) P)^{-1} P^T W_1(S_1) \\ (P^T W_2(S_2) P)^{-1} P^T W_2(S_2) \\ \vdots \\ (P^T W_n(S_i) P)^{-1} P^T W_n(S_i) \end{bmatrix} \tag{5.22}$$

Aus der Glättungsmatrix $G_{s(x,y)}$ lässt sich der Varianzfaktor s_0^2 ableiten.

$$s_0^2 = \frac{v^T v}{n - sp(G)} \tag{5.23}$$

Die Varianz eines Einzelpunktes berechnet sich für lineare Glättungsverfahren nach FAHRMEIR et al., [2009] aus:

$$Var(f(x,y)) = s_0^2 g(x,y)^T g(x,y) \tag{5.24}$$

5.2.5 Kreuzvalidierung zur Schätzung der unbekannten Parameter

In Abschnitt 4.2.3 wurde bereits auf die Bedeutung und die verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Glättungsparameters am Beispiel des natürlichen kubischen Splines hingewiesen. Diese Verfahren lassen sich auch auf die vorgestellten Ansatzfunktionen zur Glättung räumlicher Daten übertragen. Dabei gilt es, einen optimalen Kompromiss zwischen Datentreue und Glattheit der Fläche zu finden. Ein Maß für die Güte der Approximation ist die Residuenquadratsumme, die sich allerdings nicht zur Schätzung von Glättungsparametern eignet. Abhilfe schafft der Übergang zur Prognose der Abweichungsquadrate für neue Beobachtungen [FAHRMEIR et al., 2009]. In den meisten Fällen gibt es jedoch keine weiteren Beobachtungen, dann kann das Kreuzvalidierungsverfahren eingesetzt werden. Es beruht auf der Einteilung der Daten in Teilbereiche und Schätzung des Prognosefehlers einer Teilmenge für die verbleibenden Daten. Ein Spezialfall

ist die Leave-one-out Kreuzvalidierung, bei dem jeweils nur ein Datensatz entfernt wird. Alle anderen Beobachtungen werden zur Schätzung des Funktionswertes an dieser Stelle verwendet. Die Vorhersagefehler $f_i - (f(x,y)_\varepsilon)^{-i}$ werden für alle Datenpunkte ermittelt und quadratisch aufaddiert, sodass sich mit $(f(x,y)_\varepsilon)^{-i}$ als Bezeichnung für den Leave-one-out-Schätzer das Kreuzvalidierungskriterium ergibt [Fahrmeir et al., 2009].

$$CV = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_i - (f(x,y)_\varepsilon)^{-i})^2 \tag{5.25}$$

Durch Minimierung des Kriteriums CV für unterschiedliche Formparameter ε der Radialen Basisfunktion wird der optimale Wert ermittelt. Das Verfahren ist numerisch aufwändig und kann durch die Generalisierte Kreuzvalidierung GCV ersetzt werden [Craven et al., 1977].

$$GCV = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{f_i - f(x,y)_\varepsilon}{1 - (\frac{1}{n}sp(H))}\right)^2 \tag{5.26}$$

Zur Berechnung wird die Summe der Diagonalen der Hat-Matrix H bzw. Glättungsmatrix eingesetzt. Die Bestimmung des Glättungsparameters μ kann durch eine verschachtelte Optimierung des GCV-Kriteriums erfolgen, bis der Unterschied aufeinanderfolgender Optimierungsläufe ausreichend klein ist [Fasshauer, 2008b]. Die vorgestellten Verfahren werden als lineare Glättungsverfahren bezeichnet. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sowohl die Wahl der Zentrenpunkte der Basisfunktionen als auch die Bestimmung der Glättungsparameter datengetrieben erfolgt [Fahrmeir et al., 2009]. In dieser Arbeit werden alle Datenpunkte als Zentrumspunkte genutzt. Bei der Approximation von großen Datenmengen können weniger Zentrumspunkte genutzt werden, um den Rechenaufwand zu mindern. Dabei stellt sich allerdings die Frage, wie die effektivsten Stellen ausgewählt werden. Oftmals wird eine zufällig ausgewählte Teilmenge genutzt [Borrmann et al., 2009].

5.3 Numerische Untersuchung zum Nachweis der Approximationsfähigkeit

Die vollständige analytische Beschreibung des Messprozesses gestaltet sich insbesondere bei komplexen optischen Verfahren als schwierig. Um die Leistungsfähigkeit der ausgewählten Modellansätze zur Beschreibung von Freiformflächen abschätzen zu können, ist es notwendig die wahren Konturverläufe des Objektes zu kennen oder mit Messsystemen einer übergeordneten Genauigkeit zu bestimmen. Aber auch bei bekannter wahrer Geometrie gestaltet sich die scharfe Trennung der Unsicherheitsbeiträge als komplexe Herausforderung. Zur Beurteilung der Approximationsfähigkeit von Modellansätzen

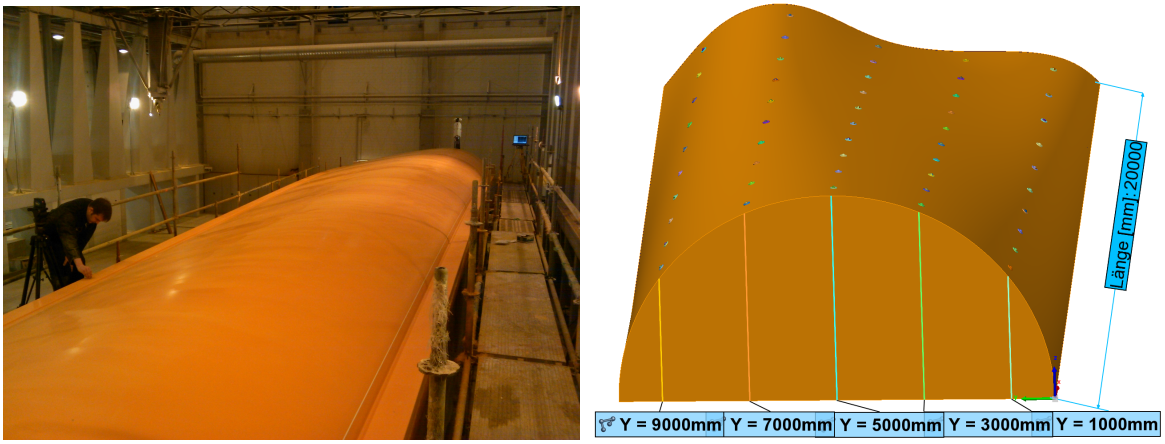
können Simulationen genutzt werden, um ihre Verwendbarkeit zur Reduzierung der Messunsicherheit zu bewerten. Der Vorteil solcher Datensimulationen besteht darin, dass die Unsicherheitsbeiträge nicht voneinander getrennt und den jeweiligen Quellen konkret zugeordnet werden müssen [Naab, 2012].

Ziel der Evaluierung mittels Simulation ist:

- die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Oberflächenbeschreibung zur Ermittlung des Prüfmerkmals Formabweichung,
- die Abschätzung der systematischen Modellabweichung,
- eine Analyse der Einflussgrößen auf die merkmalsspezifische Messunsicherheit,
- sowie die Auswahl der geeigneten Radialen Basisfunktion für den jeweiligen Approximationsansatz.

5.3.1 Ansatzfunktionen und Vorgehensweise

Für die Simulation wird ein CAD-Modell genutzt, dessen Oberfläche an Formbauteile aus der Windkraftindustrie angelehnt ist. Das virtuelle Objekt hat eine Grundfläche von 20 m x 10 m. Die Aufgabenstellung besteht im Nachweis der Formabweichungen in



(a) Formprüfung mittels Lasertracker in der Windkraftindustrie

(b) virtuelles Modell und Verteilung der Prüfmerkmale

Abbildung 5.4: Beispielanwendung und abgeleitetes Simulationsmodell

einem regelmäßigen Raster von 2 m x 2 m. Daraus ergeben sich 50 Prüfmerkmale auf der Modelloberfläche. Die gewählte Bauteilgröße entspricht einer typischen Aufnahmesituation, bei der das Objekt mit einem einzelnen TLS-Standpunkt erfasst werden kann. Abbildung 5.4a zeigt die reale Aufgabenstellung der Formprüfung, für die in der Regel taktile Messsysteme eingesetzt werden. Abbildung 5.4b zeigt das virtuelle Objekt für die Untersuchung der Modellansätze.

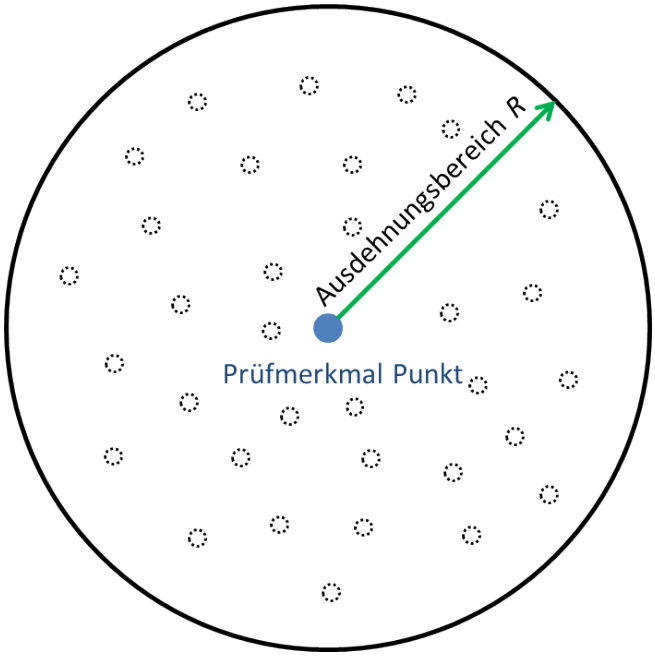


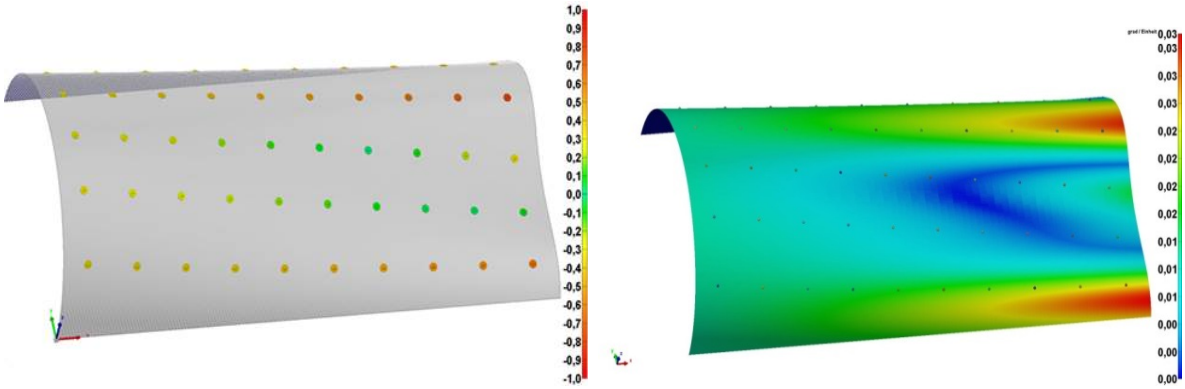
Abbildung 5.5: Ausdehnungsbereich der lokalen Approximation

Auf Basis der parametrischen Sollgeometrie können für das gesamte Bauteil, in Anlehnung an die Funktionsweise eines Laserscanners, Punktwolken mit variierenden Punktabständen und Messrauschen erzeugt werden.

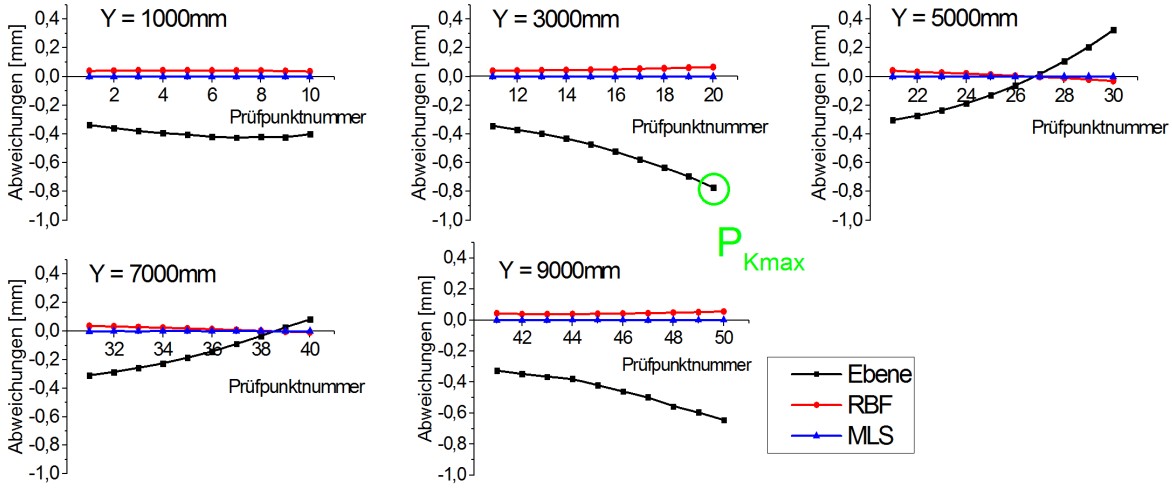
Zur Bestimmung der Prüfmerkmale werden lokal begrenzte Flächenabschnitte aus der Punktwolke extrahiert, deren Ausdehnung R durch den Abstand vom Prüfpunkt definiert ist (siehe Abbildung 5.5). Durch die Anwendung der beschriebenen Approximationsmethoden wird eine lokal gültige, bestmögliche Beschreibung der Oberfläche im umliegenden Bereich eines Prüfpunktes erzeugt und zur Abstandsberechnung genutzt.

5.3.2 Experimentelle Untersuchung des Approximationsabweichung

Die Simulation erfolgt prüfmerkmalsbezogen, d. h. als Vergleich der zu bestimmenden Formabweichungen von der Soll-Geometrie entlang der den Prüfpunkten zugeordneten Normalenvektoren. In der Simulation entspricht der ermittelte Abstand dem zu erwartenden systematischen Modellabweichung aufgrund des lokalen Glättungsverfahrens und ist Bestandteil der Gesamtunsicherheit der Formabweichung. Für eine idealisierte Diskretisierung der Oberfläche ohne Messrauschen wird streng genommen die Fähigkeit zur Interpolation der Fläche beziffert. Im ersten Schritt soll der zu erwartende Modellfehler ohne Störeinflüsse beurteilt werden.



(a) Approximationsfehler lokale Ebenen (b) Krümmungsverläufe der Sollfläche



(c) Differenzenfunktion

Abbildung 5.6: Darstellung der Simulationsergebnisse anhand der Differenzenfunktion

Aus Abbildung 5.6a wird die Reduzierung der zu verarbeitenden Datenmengen ersichtlich. Dargestellt ist eine simulierte Punktewolke und der Approximationsfehler des Ansatz mit lokalen Ebenen. Statt der gesamten Datenmenge werden nur die farbliche markierten Bereiche verwendet. Die Abweichungen von der Sollgeometrie korrelieren mit den Krümmungsverläufen (siehe Abbildung 5.6b). Die Differenzenfunktion der Abweichungen an den Prüfpunkten kann zum Vergleich der Methoden herangezogen werden (siehe Abbildung 5.6c). Es zeigt sich für das Verfahren der RBF-Approximation eine geringfügige Abhängigkeit vom Konturverlauf für den gewählten Ausdehnungsbereich. Mit dem Moving-Least-Square-Verfahren können durch die Modellierung der lokalen Kontur die Restabweichungen minimiert werden. Die Anwendung von Freiformflächenbeschreibungen mittels Radialer Basisfunktionen führt zu einer Minimierung der Modellabweichung. Anhand der Differenzenfunktion ergibt sich für den Prüfpunkt mit der größten Soll-Ist-Differenz das Prüfmerkmal P_{Kmax}. Für den ebenenbasierten Ansatz ist der Modellfehler abhängig vom gewählten Ausdehnungsbereich (siehe Abschnitt 2.4.2).

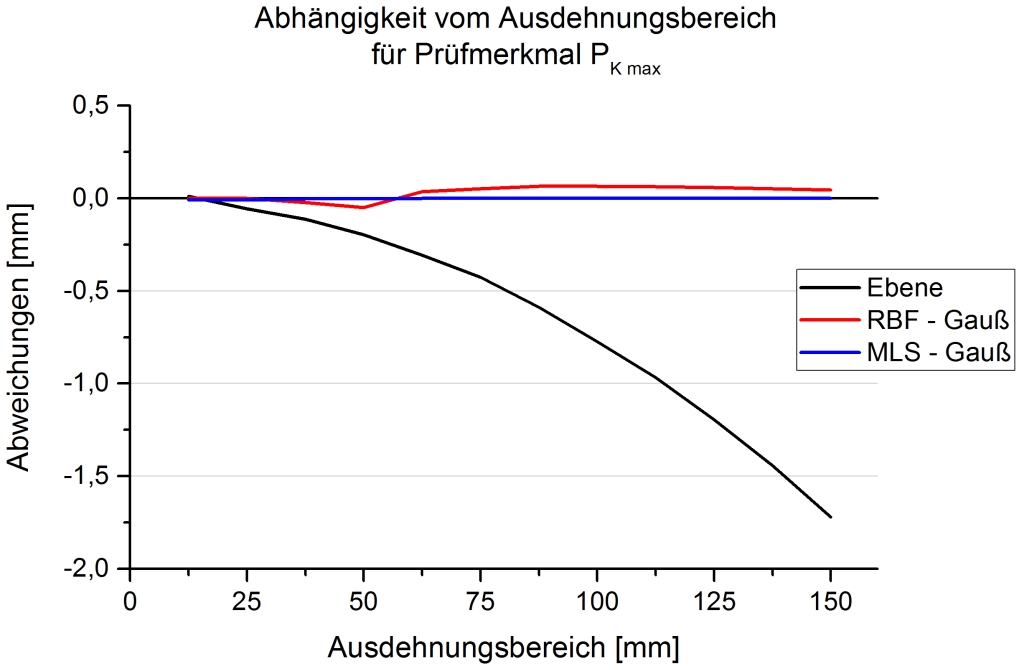


Abbildung 5.7: Abhängigkeit vom Ausdehnungsbereich für P_{Kmax}

Abbildung 5.7 zeigt den Zusammenhang anhand der Variation des Ausdehnungsbereiches. Die minimale Patchgröße wird mit 12.5 mm gewählt. Dies entspricht lediglich $n = 9$ Datenpunkten bei einer Objektauflösung von 9 mm und somit der anzustrebenden Minimalkonfiguration für eine Ebene. In jedem Simulationsschritt wird die Blockgröße verdoppelt. Für den ebenenbasierten Ansatz ergibt sich ein stetiger Anstieg des systematischen Modellabweichung. Für die Gegenüberstellung mit den Freiformflächenbeschreibungen durch Radiale Basisfunktionen werden die Ansätze unter Nutzung der Gauß-Funktion dargestellt. Bei der RBF-Approximation als Modellansatz schwanken die Abweichungen bis $R = 75$ mm geringfügig um den Sollwert und nehmen ab $R = 87.5$ mm in etwa einen konstanten Wert an. Das MLS-Verfahren zeigt keinen signifikanten Approximationsfehler.

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Radialer Basisfunktionen stellt sich die Frage nach der optimalen Auswahl einer Funktion. Dies kann unter rechentechnischen Gesichtspunkten erfolgen. Funktionen mit einem kompakten Träger, wie z. B. die Wendlandfunktionen zur Beschreibung stetiger Flächenverläufe, bieten hier die Möglichkeit bei sehr großen Punktmengen den numerischen Aufwand zu reduzieren. Für die Ermittlung der Formabweichungen an definierten Prüfpunkten kann dies bereits durch die Einschränkung des lokalen Ausdehnungsbereiches erfolgen. Die Minimierung des Approximationsfehlers steht im Vordergrund.

In Abbildung 5.8 sind die Soll-Ist-Abweichungen in Abhängigkeit vom Ausdehnungsbereich für verschiedene radiale Basisfunktionen am Prüfmerkmal P_{Kmax} dargestellt.

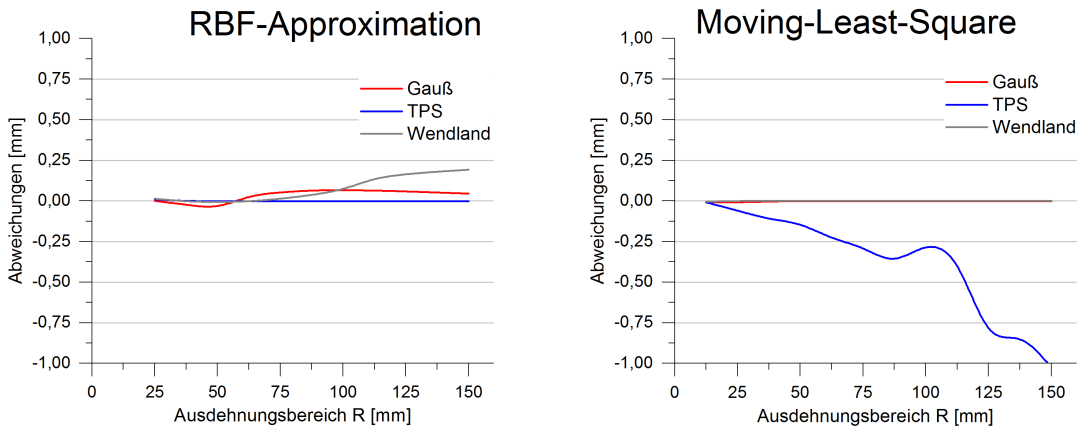


Abbildung 5.8: Abhängigkeit des Approximationsfehlers von der radialen Basisfunktion und dem Ausdehnungsbereich für P_{Kmax}

Es zeigt sich, dass die Wahl der Funktion Einfluss auf das Ergebnis hat. Bei der RBF-Approximation kann durch Nutzung der Thin-Plate-Spline-Funktion das bestmögliche Ergebnis erreicht werden. Die Wendland- und Gauß-Funktion führen zu geringen Approximationsfehlern, die mit dem Ausdehnungsbereich variieren. Für das MLS-Verfahren werden mit der Wendland-Funktion vergleichbar optimale Ergebnisse erzielt, wie mit der Gauß-Funktion. Hier führt die Nutzung der TPS-Funktion mit zunehmenden Ausdehnungsbereich zu einem erhöhten Approximationsfehler. Die Fläche wird wesentlich zu stark geglättet.

Neben dem Ausdehnungsbereich ist der Punktabstand auf dem Objekt eine Einflussgröße auf das Approximationsergebnis. Naab, [2012] weist die Abhängigkeit für 2D-Bezierkurven und B-Splinekurven nach. Bei den gitterfreien Methoden wird der Punktabstand bereits beim Aufstellen der distanzgewichteten Basisfunktionen berücksichtigt. Durch Variation der Rasterweite innerhalb der Simulation kann der verbleibende Einfluss des

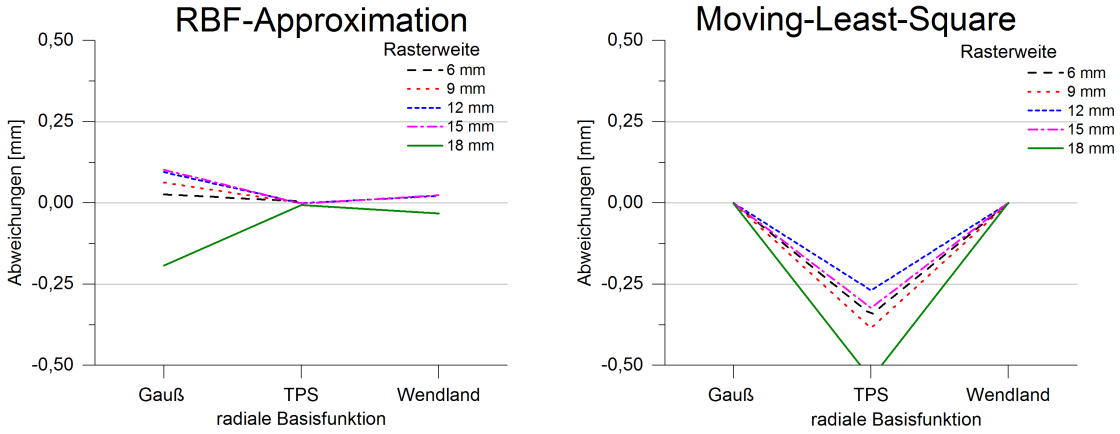


Abbildung 5.9: Abhängigkeit des Approximationsfehlers vom Punktabstand für P_{Kmax} ($R = 87.5\,\mathrm{mm}$)

Punktabstandes bewertet werden. Abbildung 5.9 zeigt, dass nur die Kombination aus radialer Basisfunktion und Glättungsverfahren unabhängig von der Verteilung der Messpunkte ist. Für die RBF-Approximation ergeben sich bei unterschiedlichen Rasterweiten Restabweichungen der Wendland- und der Gaußfunktion. Nachteilig würde sich in der angestrebten Anwendung jedoch die Abhängigkeit von der Rasterweite auswirken. Die Zusammenstellung von TPS-Funktion mit dem MLS-Verfahren führt zu erheblichen Abweichungen, so dass die Verbindung nicht in Betracht kommt. Für die weiteren dargestellten Kombinationen kann der grundsätzliche Vorteil des Ansatzes mit radialen Basisfunktionen bestätigt werden. Es kann unabhängig von der Punktverteilung oder Datenlücken und somit unabhängig von der Messkonfiguration eine lokal bestmögliche Oberflächenbeschreibung geschätzt werden. Die Untersuchung ohne Messrauschen gilt der grundsätzlichen Abschätzung des zu erwartenden Modellabweichung. Aufgrund der Anforderungen der angestrebten Anwendung ist das Verhalten bei vorhandenem Messrauschen ein nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor.

5.3.3 Verhalten bei Messrauschen

Das Ziel der gewählten Vorgehensweise besteht in der Filterung bzw. Glättung der Messdaten. Durch die Nutzung der umliegenden Messpunkte eines Prüfmerkmals wird eine Reduzierung der Streuung des Messprozesses angestrebt. Bei einer typischen Laserscannermessung können vor der Messung keine Aussagen zur Streuung der Messpunkte getroffen werden, da die äußeren Einflüsse, wie z. B. die Reflektivität und die Oberflächenbeschaffenheit, auf die Streckenmessung überwiegen. Starke Oberflächenrauheiten führen beispielsweise zu einem erhöhten Messrauschen und sind von den Formabweichungen zu trennen. Aus praktischen Erfahrungen ist ein Messrauschen von 0.5 mm bis 3 mm auf technischen Oberflächen mit einem Z+F Imager 5010 zu erwarten. Um das Verhalten der unterschiedlichen Ansatzfunktionen bei verschiedenen Streuungsverhältnissen zu untersuchen, dient ein Zufallsexperiment mit einer begrenzten Anzahl von Durchläufen. Für ein variierendes Messrauschen werden für das Prüfmerkmal P_{Kmax} die Formabweichungen berechnet. Aus den Simulationsergebnissen ergibt sich der Mittelwert der Abweichungen über die gewählte Anzahl von $m = 50$ Durchläufen sowie die dazugehörige Standardabweichung. Der Mittelwert stellt den systematischen Anteil und die Streuung den zufälligen Anteil des Glättungsverfahrens dar. In der realen Anwendung sind die Konturverläufe nicht bekannt, sodass der systematische Anteil als unbekannte bzw. nicht korrigierbare Unsicherheit interpretiert werden kann. Die Gesamtunsicherheit durch das Approximationsverfahren ergibt sich dann aus:

$$u^2_{Approx} = u^2_{Mittel} + u^2_{Streuung} \tag{5.27}$$

Abbildung 5.10 zeigt den erwarteten Verlauf für den ebenenbasierten Ansatz mit einem Anstieg der Messunsicherheit und hohen Anteil systematischer Abweichungen mit zunehmender Ausdehnung. Bei geringer Ausdehnung überwiegt der zufällige Anteil, der mit zunehmender Messpunktanzahl sinkt. Das gewählte Rauschniveau ist grau

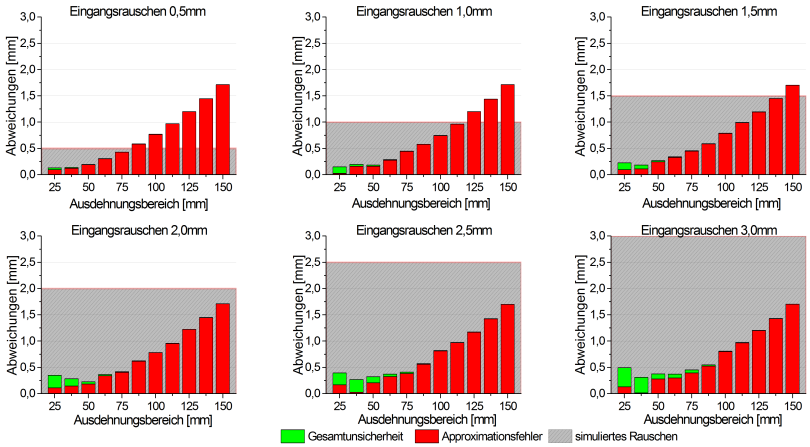
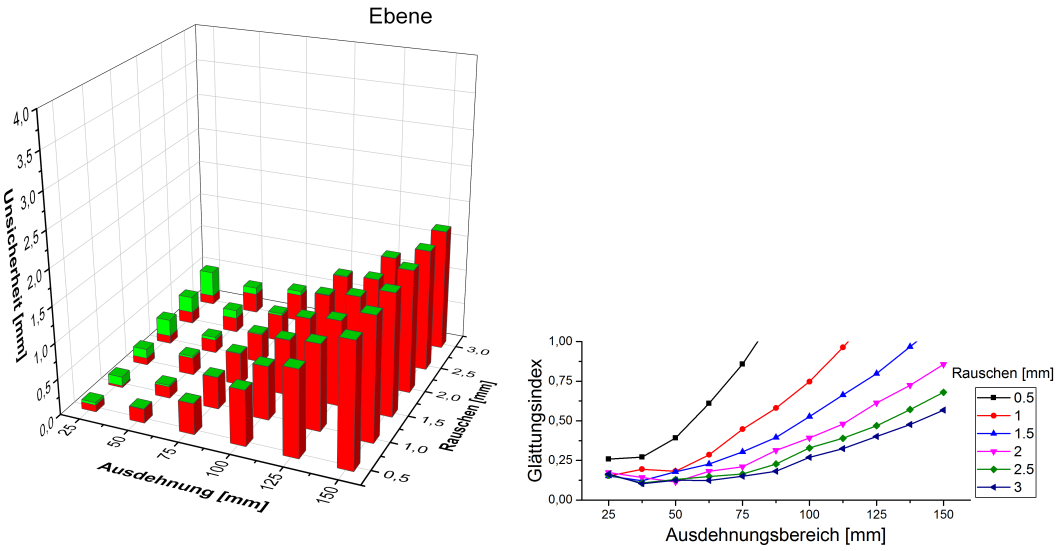


Abbildung 5.10: Filterwirkung ebenenbasierter Ansatz

hinterlegt. Oberhalb des Bereiches wird durch das Filterverfahren keine Verringerung der Gesamtunsicherheit mehr erreicht. Aus dem Verhältnis von simuliertem Rauschen und der ermittelten Unsicherheit u_{Approx} kann ein Glättungsindex GI zur Bewertung der Unsicherheitsreduzierung abgeleitet werden. Es ergibt sich ein Verhältnis zwischen der Restunsicherheit und dem Eingangsrauschen.

$$GI = \frac{Rauschen}{u_{Approx}} \tag{5.28}$$

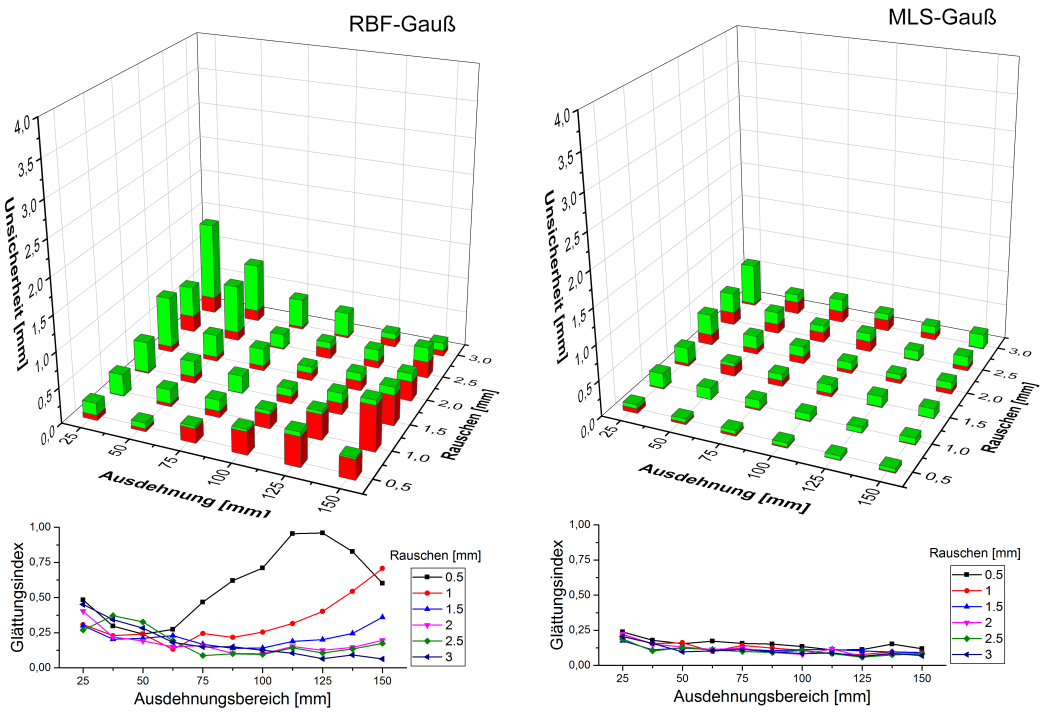
Ab einem Index $GI > 1$ ist die Methode ungeeignet. Angestrebt wird eine Reduzierung der Messunsicherheit um mindestens den Faktor 5 ($GI \leq 0,2$). Abbildung 5.11 zeigt das



(a) Unsicherheitsverlauf Ebene (b) Glättungsindex

Abbildung 5.11: Bewertung der Ebene anhand des Glättungsindex

Vorgehen am Beispiel der Ebene und fasst die Diagramme aus Abbildung 5.10 zusammen. Aus den ermittelten Abweichungen von der vorgegebenen Geometrie ergeben sich die Unsicherheitsbeiträge der Glättung in Abhängigkeit vom Rauschen und der Ausdehnung (siehe Abbildung 5.11a). Bei der Berechnung mittels einer lokal begrenzten Ebene kommt es zu einer zu optimistischen Schätzung der Unsicherheit. In rot ist der systematische Anteil der Modellunsicherheit dargestellt. Die grünen Anteile stellen den Bereich der zufälligen Unsicherheit dar. Bei der Anwendung auf einer unbekannten Bauteilgeometrie ist die Modellunsicherheit unbekannt. Dieser Anteil kann nur durch Vergleich mit einem Referenzwert ermittelt werden. Die Reduzierung der zufälligen Unsicherheit wird bereits bei geringen Ausdehnungen mit einer systematischen und in der Anwendung unbekannten Unsicherheit bestraft. Aus Abbildung 5.11 wird ersichtlich, dass die Ebene umso effektiver wirkt, je höher das Messrauschen ist. Der Ausdehnungsbereich sollte möglichst gering gewählt werden. Für ein geringes Rauschen in den Messdaten kann der Faktor 0.2 nicht erreicht werden.



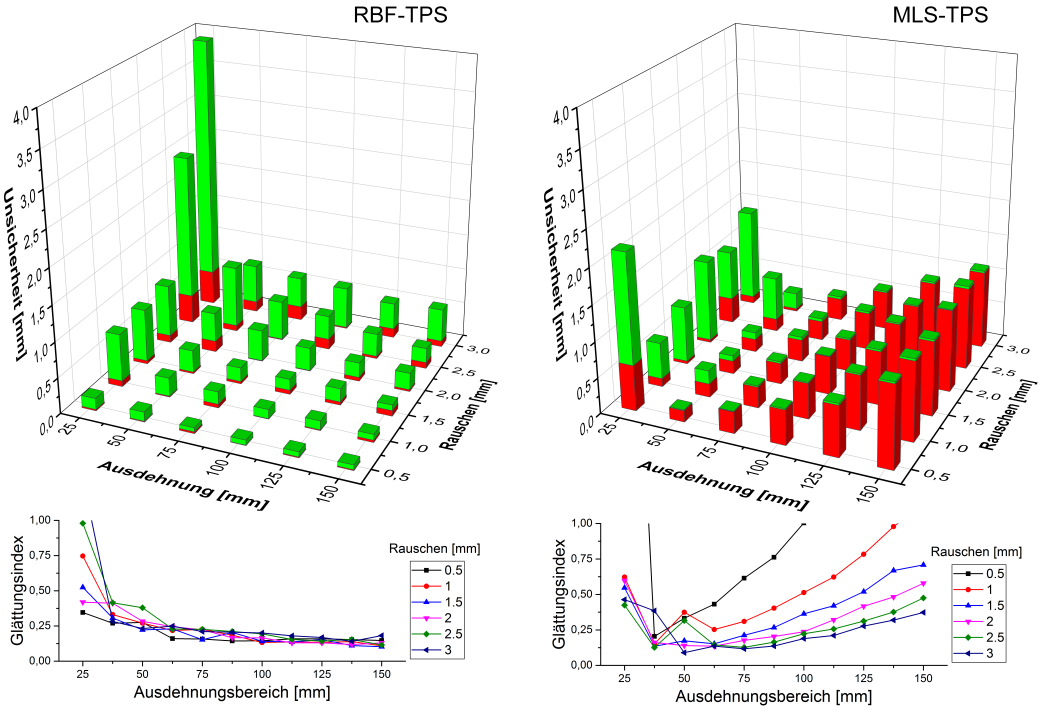
(a) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex RBF mit Gauß-Funktion

(b) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex MLS mit Gauß-Funktion

Abbildung 5.12: Bewertung der Gauß-Funktion für RBF und MLS

Abbildung 5.12 zeigt die ermittelten Indizes für die Gaußfunktion als Gewichtsfunktion. In der Simulation mit Messrauschen bestätigen sich die Erkenntnisse der Untersuchung ohne zufällige Abweichungen in den Daten. In Abhängigkeit vom Rauschen verändert sich die Güte des Approximationsverhaltens bei der RBF-Approximation und steigt mit zunehmender Ausdehnung. Im Gegensatz dazu werden beim MLS-Verfahren ab

ca. 40 mm Ausdehnung konstant gute Ergebnisse erreicht. Für die RBF-Approximation ist die Gaußfunktion nur bedingt geeignet, da es zu systematischen Restabweichungen in Abhängigkeit vom Ausdehnungsbereich und Eingangsrauschen kommt. Als Gewichtungsfunktion im MLS-Verfahren können sehr gute Eigenschaften bezüglich der räumlichen Datenfilterung erreicht werden. Der Modellfehler steigt geringfügig mit zunehmenden Messrauschen.



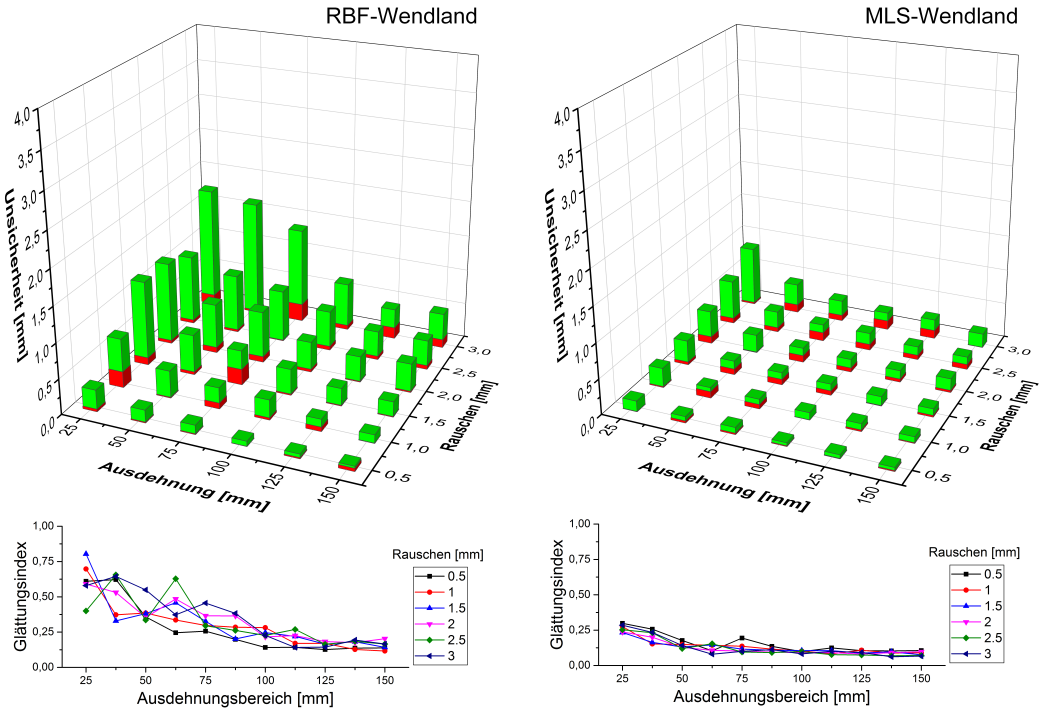
(a) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex RBF mit TPS-Funktion

(b) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex MLS mit TPS-Funktion

Abbildung 5.13: Bewertung der TPS-Funktion für RBF und MLS

Wird der klassische Thin-Plate-Spline nach Duchon, [1976] angesetzt können die Unsicherheiten durch die Modellauswahl auf ein Minimum reduziert werden. Die Streuung der Ergebnisse ist jedoch wesentlich höher als bei anderen Verfahren insbesondere bei einem geringen Ausdehnungsbereich. Aus der Darstellung des Glättungsindexes in Abbildung 5.13 kann ein minimaler Ausdehnungsbereich von $R = 62.5\,\text{mm}$ abgeleitet werden. Für die Verwendung mit dem MLS-Verfahren ist die TPS-Funktion ungeeignet. Es ergeben sich signifikante Modellunsicherheiten, die sich mit zunehmenden Ausdehnungsbereich vergrößern.

Mit Hilfe der Wendland-Funktion zur Beschreibung zweimal stetig differenzierbarer Flächen (C2-Stetigkeit) als Ansatzfunktion für die RBF-Approximation kann eine Glättung der Messdaten erreicht werden. Die Restunsicherheit des Approximationsverfahrens erreicht erst ab $R = 125\,\text{mm}$ ein stabiles Glättungsniveau, mit einem hohen Anteil



(a) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex RBF mit Wendland C2-Funktion

(b) Unsicherheitsverlauf und Glättungsindex MLS mit Wendland C2-Funktion

Abbildung 5.14: Bewertung der Wendland-Funktion für RBF und MLS

zufälliger Abweichungen (siehe Abbildung 5.14). Es ergibt sich ein nicht konstanter und scheinbar zufällig auftretende Modellabweichung. Zur näheren Untersuchung müsste der Stichprobenumfang wesentlich erhöht werden, wie es bei der Bestimmung der Messunsicherheit mittels Monte-Carlo-Simulation (n= ca. 10000) [Weissensee, 2011] üblich ist. Bei Verwendung der Wendland-Funktion in Kombination mit dem MLS-Verfahren können hingegen wesentlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Der Anteil der Reststreuung ist wesentlich geringer. Es ergibt sich ein geringer Anteil systematischer Abweichungen. Die Glättungseigenschaften können als sehr gut klassifiziert werden. Der Anteil des Approximationsfehlers steigt mit zunehmenden Messrauschen geringfügig. Ab $R = 87.5\,\text{mm}$ wird ein konstanter Glättungsfaktor erreicht.

5.3.4 Ergebnisse und Vergleich der Approximationsmethoden

Durch die Nutzung von Freiformflächenbeschreibungen auf Grundlage radialer Basisfunktionen kann eine signifikante Reduzierung der Messunsicherheit unabhängig von der vorhandenen Krümmung und der Messpunktverteilung erreicht werden. Gitterfreie Methoden bieten die Möglichkeit einen wesentlichen größeren Bereich zu nutzen, um die Schätzung lokaler Formabweichungen zu verbessern. Für die Übertragung in die

Anwendung kann aufgrund der Simulationsergebnisse eine Auswahl der Radialen Basisfunktion in Kombination mit dem Approximationsverfahren erfolgen. Tabelle 5.2 zeigt

Tabelle 5.2: Gegenüberstellung der Modellansätze

	Ebene	RBF-Approx.	MLS-Verfahren
Radiale Basisfunktion	—	Thin-Plate-Spline	Wendland C2
Modellabweichung	abhängig von Krümmung und R	gering für $R > 40\,\text{mm}$	gering
Leistungsfähigkeit	abhängig von Eingangsdaten und Krümmung	hoch	sehr hoch
Glättungsindex	abhängig vom Rauschen, abnehmend mit größerem R	$\leq 0,25$ für $R > 80\,\text{mm}$	$\leq 0,2$ für $R > 80\,\text{mm}$
Automatisierbarkeit	sehr hoch einfache Berechenbarkeit	hoch Glättungsparameter mittels GCV Große Gleichungssysteme bei hoher Punktanzahl	hoch Glättungsparameter mittels GCV

eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Modellansätze zur Bestimmung der Formabweichungen. Für die RBF-Approximation wird die Thin-Plate-Spline Funktion ausgewählt. Für das MLS-Verfahren liefern die Gauß-Funktion und die Wendland-Funktion vergleichbare Ergebnisse. Aufgrund der rechentechnischen Vorteile einer kompakten Trägerfunktion und des geringfügig besseren Glättungsindexs ist die Wendland-Funktion zu bevorzugen. Für das MLS-Verfahren konnte eine geringe Reststreuung aus der berechneten Standardabweichung des Zufallsexperimentes nachgewiesen werden. Abbildung 5.15

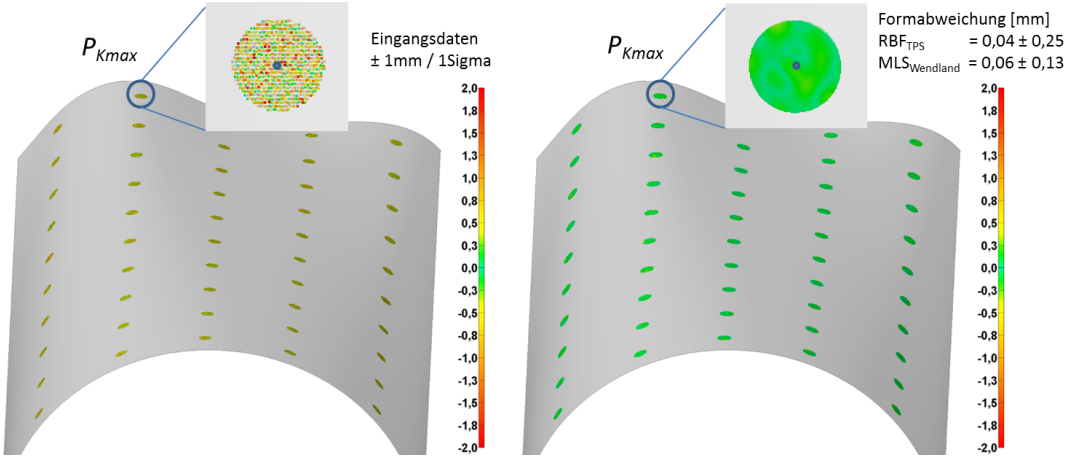


Abbildung 5.15: Ergebnis der lokalen Approximation im Bereich der Prüfmerkmale am Beispiel des MLS-Verfahren $R = 87.5\,\text{mm}$

zeigt die Ergebnisse der Simulation des Moving-Least-Square-Verfahrens auf dem virtuellen Bauteil: links die Eingangsdaten bei einem simulierten Rauschen von 1 mm; rechts die gefilterten lokalen Oberflächenbeschreibungen. Für die simulierte Aufnahmesituation eines Einzelscans ergeben sich für P_{Kmax} die dargestellten Abweichungen von der Solloberfläche und die aus den genutzten Datenpunkten berechnete Standardabweichung der Formabweichung. Für den Ausdehnungsbereich wird aufgrund der Simulationsergebnisse $R = 87.5\,\text{mm}$ festgelegt. Dieser Ausdehnungsbereich lässt für die beiden gewählten Funktionen optimale Ergebnisse in der Anwendung erwarten, ohne den numerischen Aufwand unnötig zu vergrößern.

6 Umsetzung und Realisierung an einer exemplarischen Großstruktur

In diesem Kapitel soll das entwickelte Vorgehen zur Bestimmung lokaler Formabweichungen an einer exemplarischen Großstruktur umgesetzt sowie anhand einer Messfähigkeitsuntersuchung analysiert werden.

6.1 Anwendung am Beispiel von Schiffspropellern

Schiffspropeller erreichen heute Dimensionen bis zu 11 m Durchmesser. Die Oberflächenkontur stellt höchste Anforderungen an die geometrische Maßhaltigkeit. Abweichungen von der Sollkontur haben direkte Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Antriebssystems eines Schiffes. Zum Nachweis der Erbringung von Leistungskennwerten wird die Oberfläche der Propellerflügel entsprechend der ISO 484 geprüft. Die Norm legt ein Vielzahl von Prüfpunkten auf der Oberfläche entlang von Zylinderschnitten fest. Aus den gemessenen Punkten werden u. a. Steigung, Hang, Rücklage und Flügeldicke bestimmt. Dies sind wesentliche Parameter, die Einfluss auf Schub, Moment, Laufruhe, Kavitationsverhalten sowie das Anströmverhalten haben [Grewe et al., 2013]. Im Produktionsprozess der zumeist als Gußpropeller hergestellten Strukturen erfolgt die Vermessung in unterschiedlichen Produktionsstadien. Vor dem eigentlichen Gießprozess werden Formen anhand einer zu prüfenden Positiv-Form hergestellt. Anschließend erfolgt eine Vermessung der Rohlinge zur Berechnung des Materialabtrages und Steuerung des Schleifprozesses. Die endgültige Kontur wird dann noch im Sinne der Qualitätssicherung erfasst und dokumentiert. Derzeit wird bei der Firma Mecklenburger Metallguss GmbH (MMG) ein Streifenlichtprojektor in Verbindung mit einem Industriephotogrammetriesystem eingesetzt. Der Aufwand zur Vermessung eines Propellers beträgt ca. 4 h bis 6 h. Bei einem Produktionsumfang von ca. 100 Propellern pro Jahr ergibt sich ein erhebliches Einsparpotential für Systeme mit einer wesentlich höheren Flächenleistung.

6.2 Toleranzprüfung eines Propellerflügels

Für die Untersuchung der Verwendbarkeit von terrestrischen Laserscannern zur ISO-konformen Prüfung eines Propellers stand eine Positiv-Form der Firma MMG zur Verfügung.

Diese Form stammt aus der Produktion und diente bereits als Grundlage zur Erstellung von Gussformen. Aufgrund der Anforderungen der ISO 484 ist es notwendig aus den flächenhaften Messdaten die Ist-Werte, der durch die Norm vorgegebenen Prüfmerkmale zu extrahieren. Sie dienen als Basis zur Berechnung der Kennwerte. Für den gesamten Propeller können ca. 600 Prüfpunkte spezifiziert werden. Für eine Seite des Propellerflügelmodells können für den in Abbildung 6.1 dargestellten Versuchsaufbau 58 Prüfpunkte ausgewertet werden.

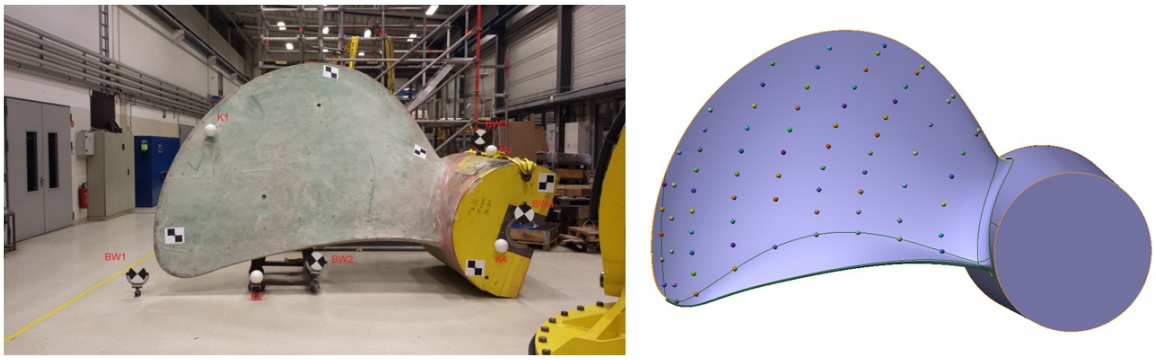


Abbildung 6.1: Propellermodell: Versuchsaufbau und Prüfpunktanordnung

Die Norm unterscheidet in drei Genauigkeitsklassen (class I, II, III manufacturing accuracy) sowie eine Sonderklasse höchster Genauigkeit (class S). Eine Flächentoleranz ist nicht angegeben, da sich die Toleranzen auf die Kennwerte beziehen. Für die Steigung eines Propellers sind Toleranzangaben prozentual vom Nennwert spezifiziert. Zur Übertragbarkeit auf andere Anwendungen und zur Vereinfachung der Auswertung wird aus der Toleranzangaben für den Durchschnittswert der Steigung eines Flügels (class I: $\pm$ 1 %) eine Flächentoleranz von $T = \pm 1.5$ mm für die Oberfläche des Modellflügels abgeleitet.

Die Ausrichtung einer Punktwolke erfolgt in Anlehnung an den realen Prüfprozess durch eine bestmögliche Einpassung der gemessenen Oberfläche zum CAD-Modell unter Berücksichtigung der Rotationsachse des Propellers. Die Drehachse ergibt sich als Symmetrieachse des gemessenen Nabenbereiches. Der Unsicherheitsanteil der Ausrichtung ist als Teil des Messprozesses bei der Analyse der Ergebnisse enthalten.

6.3 Messfähigkeitsanalyse

Die Bedeutung der Eignung von Prüfprozessen hat in den letzten Jahren immer mehr zugenommen. Im Rahmen der gültigen Normen zur Qualitätssicherung wird zunehmend der Nachweis der Eignung der Messsysteme und des Messprozesses für den jeweiligen Anwendungsfall gefordert. Zum Nachweis und zur Untersuchung der Prüfmittelfähigkeit wurden, getrieben durch die Automobilindustrie, Mitte der 80er Jahre sogenannte Messsystemanalysen (MSA) bzw. Messfähigkeitsuntersuchungen entwickelt. Es existieren

eine Reihe unterschiedlicher Vorgehensweisen, die insbesondere in den Firmenrichtlinien der großen Automobilhersteller festgeschrieben sind. Sie unterscheiden sich bei der Berechnung von Kennwerten, Festlegung von Grenzwerten und Begriffsdefinitionen. Bei der komplexen Vorgehensweise, die sich aus mehreren Verfahren zusammensetzt, werden Messgeräte bezüglich ihrer Eigenschaften in Bezug auf Genauigkeit, Präzision, Vergleichspräzision und Linearität überprüft [Dietrich et al., 2014]. Die grundsätzlichen Schritte einer Messsystemanalyse sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Vorgehensweise bei der Messsystemanalyse [Dietrich et al., 2014]

Analyse	Zielsetzung	Kennwerte
Verfahren 1	systematische Abweichungen und Wiederholpräzision	c_g,c_{gk},t-Test, Vertrauensbereich
Verfahren 2	Wiederhol-, Vergleichspräzision (mit Bedienereinfluss)	%GRR, ndc, Vertrauensbereich
Verfahren 3	Wiederholpräzision (ohne Bedienereinfluss, mehrere Teile)	%GRR, ndc, Vertrauensbereich

Nicht die gesamte Vorgehensweise lässt sich auf Großstrukturen mit überwiegender Unikat- oder Kleinserienfertigung übertragen. In dieser Arbeit soll das grundsätzliche Vorgehen nach Verfahren 1 der MSA genutzt werden, um die Eignung eines TLS für die Propellerprüfung zu analysieren. Auf die darauf aufbauenden Verfahren 2 und 3 sowie deren Kennwerte soll nicht weiter eingegangen werden. Diese entfallen aufgrund der Berücksichtigung von Bedienereinfluss bzw. der Nutzung von mehreren Werkstücken einer Serie. Das grundsätzliche Vorgehen (siehe Abbildung 6.2) beruht auf der wie-

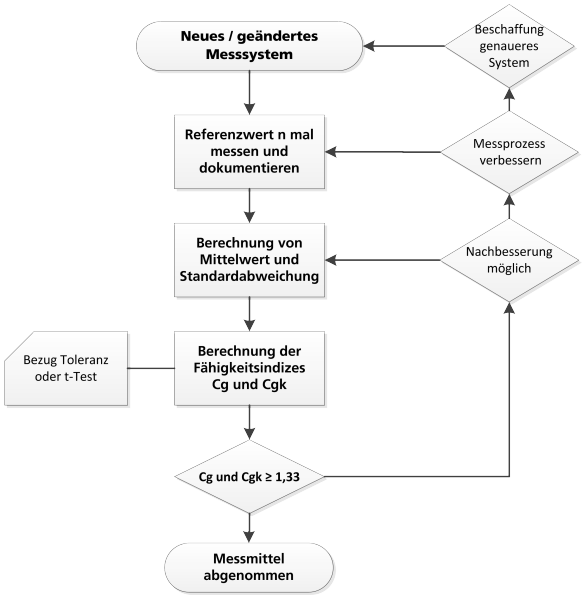


Abbildung 6.2: Ablauf von Verfahren 1 der Messsystemanalyse (in Anlehnung an [Dietrich et al., 2014])

derholten Messung eines Referenzwertes und der Berechnung der Fähigkeitsindizes. Ziel des Verfahrens ist die Beurteilung der Wiederholpräzision und die Ermittlung systematischer Messabweichungen an einem oder mehreren Punkten über den gesamten Anwendungsbereich. Die systematische Abweichung ergibt sich aus der Abweichung zwischen Referenzwert und dem Mittelwert der Messungen. Der c_g-Wert liefert Informationen zur Streuung des Messsystems. Der c_{gk}-Wert beinhaltet zusätzlich eine systematische Komponente.

$$c_g = \frac{0.2\ T}{4\sigma} \quad \text{und} \quad c_{gk} = \frac{Q_{MP}\ T - |Bias|}{2\sigma} \tag{6.1}$$

Durch die Fähigkeitsindizes ist die Möglichkeit gegeben zu beurteilen, ob das angewendete Messverfahren geeignet, bedingt geeignet oder ungeeignet ist. Ein Prozess gilt ab einem c_g- und c_{gk}-Wert über 1,33 als geeignet [Kistner et al., 2015]. Der Einsatz von bedingt geeigneten Systemen kann aus wirtschaftlichen Gründen in Absprache im Kunden-Lieferanten-Verhältnis zulässig sein und für die Vermessung von Großstrukturen als akzeptabel eingestuft werden. Bei Werten unter 1,00 gilt das Verfahren als nicht geeignet. Tabelle 6.2 fasst die Einstufung entsprechend der Fähigkeitsindizes zusammen.

Tabelle 6.2: Klasseneinteilung zur Beurteilung der Eignung

c_g und c_{gk}-Wert	Beurteilung der Eignung
≥ 1.33	Das Messverfahren ist geeignet
1.00 bis 1.33	Das Messverfahren ist nur bedingt geeignet
< 1.00	Das Messverfahren ist nicht geeignet

Grundlage der Fähigkeitsuntersuchung nach Verfahren 1 ist die wiederholte Messung eines Referenzwertes. Für den Flügel wurde in Anlehnung an die derzeit eingesetzten Messmethoden ein trianguliertes Flächenmodell unter Nutzung eines Streifenlichtprojektors erstellt. Die Abweichung des Modells an den Prüfpunkten dient als Sollwert. Zur Beurteilung der Fähigkeit eines Messsystems sollten mindestens 20 Wiederholungsmessungen bei stabiler Messanordnung durchgeführt werden. Die Forderung nach einer gleichbleibenden Messeinrichtung ist auf den Automobilbau ausgelegt. In diesem Industriezweig sind kleine Bauteile, die zum Messsystem gebracht werden können, vorherrschend. Im Bereich der Großstrukturen werden fast ausschließlich mobile Messsysteme angewendet. Um den Messprozess zu analysieren, wird statt des Objektes die Position des Laserscanners variiert. Die entstandenen Punktwolken unterscheiden sich in der Art ihrer Entstehung und somit in den unbekannten Einzelpunktunsicherheiten. Es wurden 20 Standpunkte zufällig vor dem Objekt gewählt, die sich in ihrer Entfernung (4 m bis 20 m), ihrem Auftreffwinkel (bis zu 70°) und der verwendeten Drehrate des Scanners unterscheiden. Die Scaneinstellungen wurden unter Berücksichtigung der Spotgröße und Entfernung so gewählt, dass sich Punkte am Objekt möglichst nicht überlagern, um Korrelationen zu vermeiden. Auflösungseinstellungen und Drehrate des Scanners wurden

so angepasst, dass kein Scan länger als 10 min dauert. Längere Scanzeiten sind für Großstrukturen aufgrund enger Prozessfenster und der Vielzahl an Standpunkten nicht praktikabel. Durch die variierenden Standpunkte wird der Einsatz in der Produktion nachgestellt, bei dem es aufgrund des Randbedingungen oftmals nicht möglich ist den idealen Standpunkt zu wählen. Durch dieses Vorgehen soll der Messprozess bewertet und ein hohe Praxisnähe gewährleistet werden. Für die Analyse stand der in Kapitel 4 untersuchte Laserscanner Z+F Imager 5010 zur Verfügung.

6.4 Analyse der Ergebnisse

Im Ergebnis der Untersuchung der einzelnen Laserscanner ergab sich für den Z+F 5010 eine minimal prüfbare Toleranz von ±4 mm. Es ist zu erwarten, dass der Messprozess, bedingt durch die Streuung des Systems, bei einer Nutzung des nächstliegenden Messpunktes nicht fähig ist. In Abbildung 6.3 ist die Auswertung der Extraktion von Einzelpunkten aus den 20 Wiederholungsmessungen für die 58 Prüfmerkmale zusammengefasst. Werden die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen an den

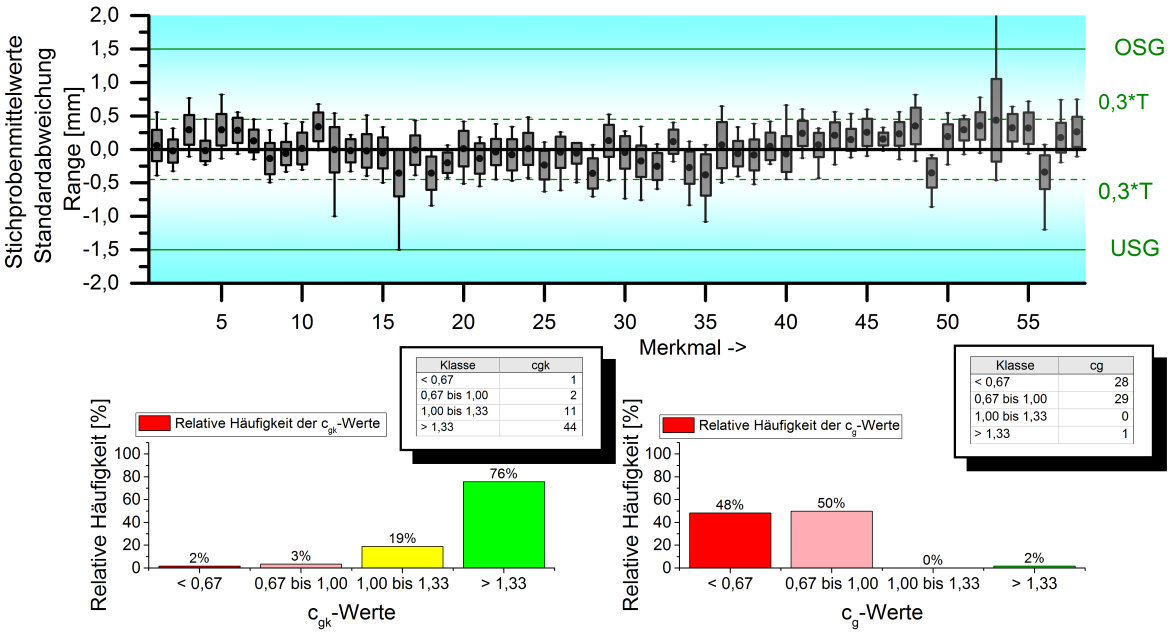


Abbildung 6.3: Bewertung der Toleranzprüfung mittels TLS anhand von Eignungskennwerten: Einzelpunktauswertung

Merkmalen den 30% der oberen und unteren Spezifikationsgrenze (OSG, USG) gegenübergestellt ist zu erkennen, dass ein wesentlich größerer Teil der Toleranzbreite für den Messprozess eingeplant werden müsste. Das nicht ausreichende Rauschverhalten zeigt sich in den c_g-Werten. Bei 98% der Prüfpunkte konnte kein Fähigkeitsindex über 1.00 erreicht werden. Zusätzlich zur Standardbewertung von Messmitteln wird eine

Klasse zwischen 0.67 und 1.00 eingeführt. Diese Klasse dient der Veranschaulichung der Größenordnung der Abweichungen. Bei den c_{gk}-Werten liegen 76% der Werte über 1.33. Die wesentlich besseren Ergebnisse bei den c_{gk}-Werten sind ein Indiz für die hohe Abbildungstreue des Laserscanners. Bei den anderen untersuchten Laserscannern wären wesentlich schlechtere Ergebnisse zu erwarten gewesen. Aus den Diagrammen kann abgeleitet werden, dass die Streuung die Hauptursache für die Einstufung *nicht fähiges Messsystem* ist. Eine Reduzierung der Abweichungen kann durch die Anwendung der lokalen Filterung mittels Ebenen erreicht werden.

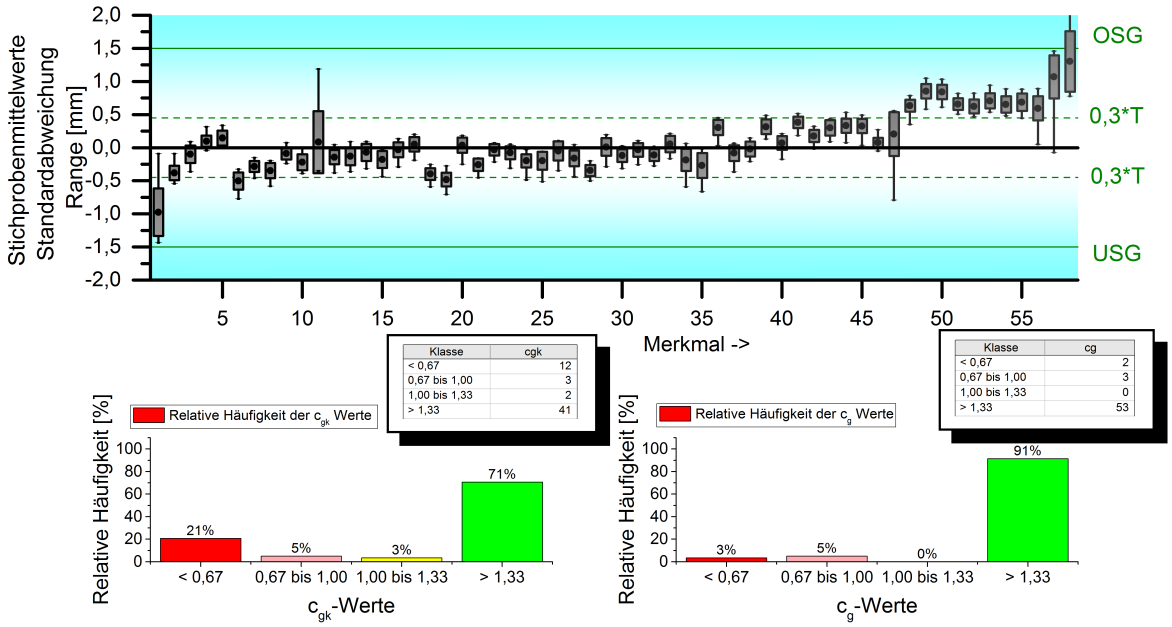


Abbildung 6.4: Bewertung der Toleranzprüfung mittels TLS anhand von Eignungskennwerten: Ebene Ausdehnung=85 mm

Abbildung 6.4 zeigt die Reduzierung der Streuung durch Berechnung der Flächenformabweichung unter Nutzung einer lokalen Ebene. Die angewendete Filterung äußert sich in den wesentlich höheren c_g-Werten. Allerdings kommt es bei 9% der Merkmale zu einer höheren Streuung und c_g-Werten unter 1.00. Die Wiederholpräzision der Auswertung ist nicht gegeben. Bei ca. 30% der Prüfmerkmale ist der c_{gk}-Wert unter 1.33. Bei der Berechnung der Merkmale kommt es zu systematischen Abweichungen, die in der Krümmung der Oberfläche begründet sind. Dies entspricht der Propellergeometrie im Bereich des Übergangs zur Nabe (Merkmal 1 bis 5) und an der Blattspitze, bei der die Kontur eine stärkere Wölbung hat. In diesem Bereich kann es zu einer Fehleinschätzung des Produktionsprozesses kommen. Der Unsicherheitsbereich aus den Wiederholungsmessungen überschreitet die Toleranzgrenze.

Werden das Messsystem bzw. der -prozess bei der Analyse als nicht geeignet eingestuft, sollten Verbesserungsmaßnahmen am Verfahren eingeleitet werden oder ein genaueres System beschafft werden. Bei flächenhaften Messsystemen besteht die Möglichkeit durch

eine bestmögliche Annäherung an die wirkliche Oberfläche die Unsicherheit zu reduzieren. Für TLS gilt die Einschränkung, dass die Messunsicherheit durch die Messkonfiguration und das Objekt beeinflusst sind. Eine realistische Beurteilung ist bei einem Einzelscan erst durch die Auswertung der Daten möglich. Durch die numerischen Untersuchungen in Kapitel 5 erfolgte die Auswahl geeigneter Ansatzfunktionen und die Festlegung eines Ausdehnungsbereiches der lokalen Approximation. Für RBF-Approximation in Kombination mit der Thin-Plate-Spline Funktion sind die Ergebnisse in Abbildung 6.5 dargestellt.

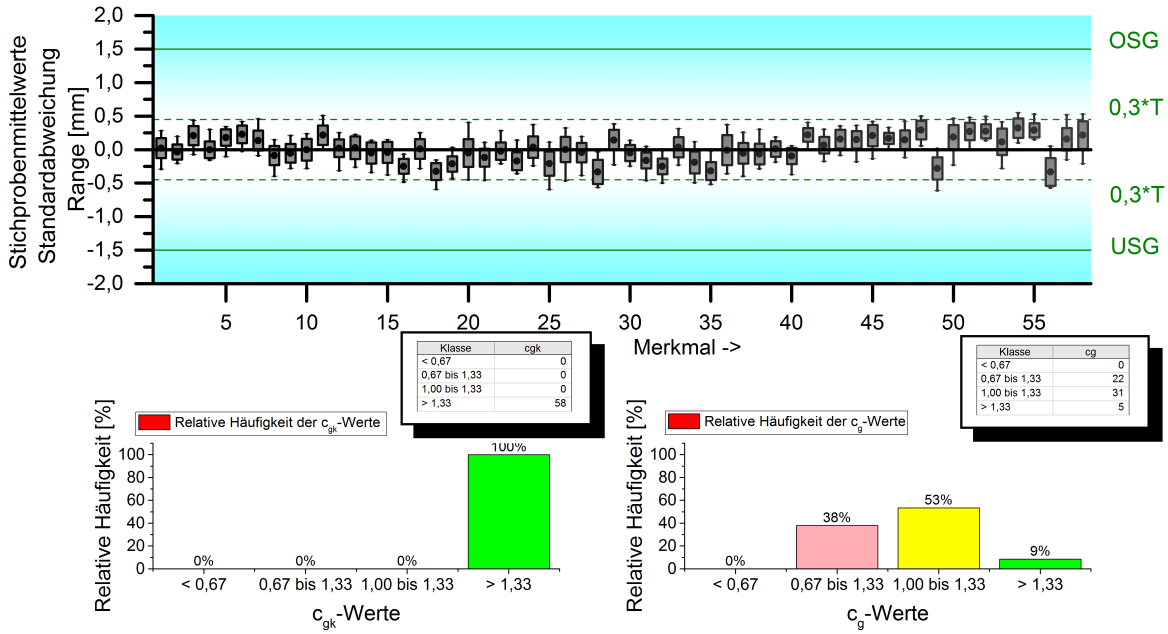


Abbildung 6.5: Bewertung der Toleranzprüfung mittels TLS anhand von Eignungskennwerten: RBF-TPS Ausdehnung=85 mm

Aus den Diagrammen ist eine deutliche Verbesserung der c_g- und c_{gk}-Werte ersichtlich. Der Grenzwert für den Fähigkeitindex c_{gk} wird bei allen Prüfmerkmalen eingehalten. Die systematischen Unsicherheiten im Verhältnis zur Toleranz, gekennzeichnet durch den Anteil der c_{gk}-Wert über 1.33, können auf ein Minimum reduziert werden. Die Forderung nach einer möglichst kleinen Streuung, die durch den c_g gekennzeichnet wird, kann nur an 62% der Oberfläche erfüllt werden. Dieses Glättungsverfahren weist im Gegensatz zum Ebenenansatz eine höhere Streuung der Ergebnisse auf. Die 38% der Stichproben, die als nicht fähig eingestuft werden, liegen im Bereich über 0.67. Bei größeren Toleranzbreiten kann das Verfahren geeignet sein. Eine weitere Möglichkeit ist die Verbesserung des Messprozesses durch die Einführung von Restriktionen. So kann u. a. die Begrenzung der Entfernung oder eine geringere Drehrate des Laserscanners zur Verbesserung der Ergebnisse führen.

Die Nutzung einer anderen Ansatzfunktion stellt ebenfalls eine Verbesserung des Gesamtprozesses dar. Als Ergebnis der Simulation sind für das Moving-Least-Square-Verfahren

unter Nutzung der Wendlandfunktion die besten Glättungseigenschaften zu erwarten. Diese positiven Eigenschaften bei der Datenfilterung bestätigen sich am realen Objekt. Abbildung 6.6 zeigt die Ergebnisse für das Verfahren. Die c_{gk} liegen für alle Prüfmerkmale über 1.33. Beim Streuungsindex liegen lediglich die Auswerteergebnisse eines Merkmals knapp unter dem kritischen Wert. Der c_g-Wert für dieses Merkmal liegt bei 0.91.

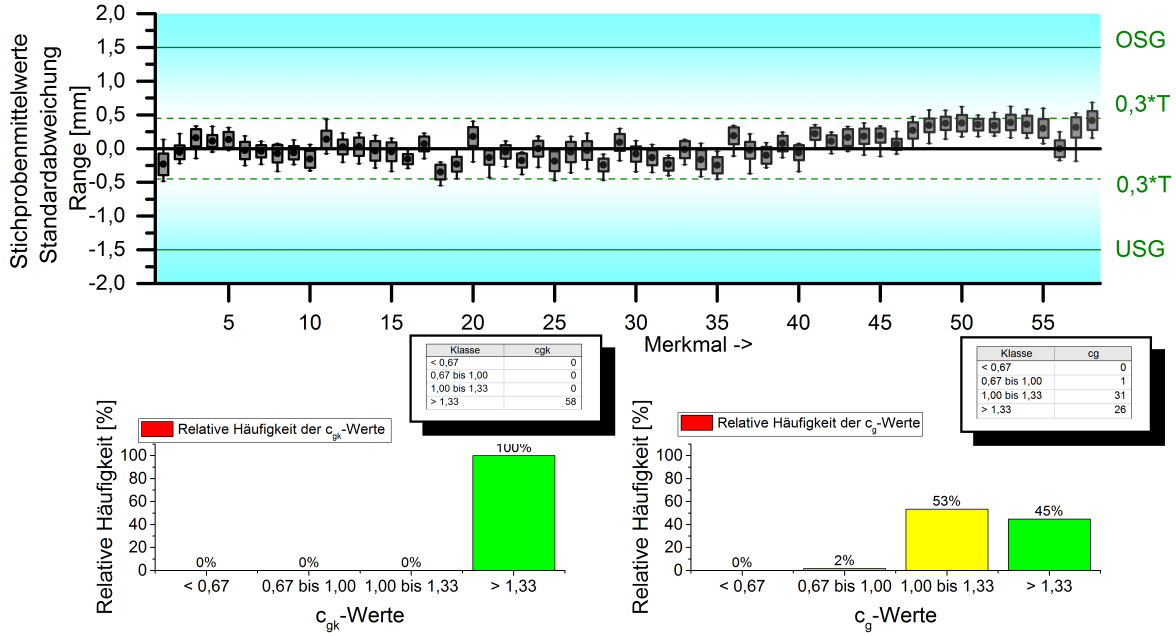


Abbildung 6.6: Bewertung der Toleranzprüfung mittels TLS anhand von Eignungskennwerten: MLS-Wendland Ausdehnung=85 mm

Für die in der Simulation ausgewählten Kombinationen von Approximationsverfahren und Radialer Basisfunktion konnte anhand der Messmittelanalyse eine signifikante Reduzierung der Messabweichungen nachgewiesen werden. Sowohl durch die Nutzung des Thin-Plate-Spline (RBF-Approximation) als auch des Moving-Least-Square-Verfahrens lassen sich Laserscandaten bei der Ermittlung von Formabweichungen an Freiformflächen räumlich filtern. Durch das Vorgehen wird es möglich terrestrischer Laserscanner für den Nachweis von Flächenformabweichungen bei Toleranzen im Bereich weniger Millimeter einzusetzen. Die Ergebnisse der Messsystemanalyse zeigen, dass mit dem verwendeten System eine sehr hohe Wiederholpräzision bei variierender Aufnahmekonfiguration erreicht werden kann und bestätigen die Untersuchung der Formtreue aus dem Kapitel 4.

7 Fazit und Ausblick

Laserscanner sind komplexe Systeme bei denen das Zusammenspiel der Komponenten bis heute nicht durch ein mathematisches Modell beschreibbar ist. Ursachen sind u. a. dass die Hersteller die Funktionsprinzipen der Scanner nicht offen legen und zumeist versucht wird die Rückführung auf einen definierten Punkt zu nutzen. Bis heute ist es nicht gelungen ein allgemein gültiges Modell für alle Scannertypen zu entwickeln.

Die vorliegende Arbeit entwickelt die Grundlagen für eine merkmalsspezifische Unsicherheitsbetrachtung geometrischer Größen die mittels TLS erfasst wurden. Der Focus der Arbeit liegt dabei in der flächenhaften Betrachtung der scannenden Systeme und der Ermittlung der erreichbaren Genauigkeit bei der Formanalyse von Freiformflächen. Durch eine experimentelle Analyse der bisherigen Kenngrößen terrestrischer Laserscanner zeigt sich, dass das eigentliche Wesen der flächenhaften Erfassung die formtreue Abbildung von Oberflächen nur unzureichend bei der Bewertung der Systeme berücksichtigt wird. Restabweichungen der Kalibrierung, unbekannte sowie nicht korrigierbare Abweichungen der Instrumente führen zu Abweichungen der digitalisierten Abbildung von der wahren Gestalt. Diese Abweichungen haben direkten Einfluss auf die Messunsicherheit von Formabweichungen, die aus der Punktwolke abgeleitet werden. Zur Qualitätssicherung bei der Herstellung von Freiformflächen oder der Steuerung von Fertigungsprozessen kann die Unkenntnis der Geräteeigenschaften zu Fehlentscheidungen bei der Konformitätsbetrachtung führen und somit erhebliche Folgekosten verursachen. Zur Reduzierung der zufälligen Abweichungen lassen sich Glättungsverfahren auf Grundlage Radialer Basisfunktionen einsetzen. Diese Filtermethoden können effektiv zur Ermittlung der Formabweichungen und ihrer Messunsicherheit beitragen.

In dieser Arbeit wird ein Prüfverfahren zur Bewertung der Güte der diskretisierten Oberflächen entwickelt. Eine Trennung zwischen systematischen und zufälligen Abweichungen bildet die Grundlage einer realistischen Abschätzung der zu erwartenden Unsicherheit bei der Modellierung von Flächen, der Anwendung zur Formanalyse oder dem Einsatz zur Deformationsmessung. Nicht erkannte, nicht korrigierbare Instrumentenabweichungen sowie äußere Einflüsse auf den Messprozess führen zu einer Verzerrung der abgebildeten Flächen. Die Bestimmung und Bewertung dieser Abbildungsfehler wurde bisher nicht zur Analyse der Systeme verwendet. Insbesondere in Bezug zu einer spezifizierten Toleranz ist die Ermittlung der merkmalsspezifischen Unsicherheit unter Berücksichtigung des Messprozesses jedoch unerlässlich.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich mit der Rückwärtsmodellierung der Auswirkungen von systembedingten Abweichungen von einer bekannten Form beschäftigen, dazu sind, wie in dieser Arbeit vorgeschlagen, wesentliche größere Prüfflächen und tatsächlich flächenhafte Betrachtung der Systeme notwendig. Der Aufwand zur Erstellung und Digitalisierung des Prüfkörpers in einer geeigneten Größe ist jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Das Vorgehen gibt aber die Möglichkeit einer objektiven Bewertung der erreichbaren Messunsicherheit, bei den stetig ansteigenden Anforderungen an die Nachweispflicht der Eignung von Messgeräten. Der Rückwärtsmodellierung der Abweichungen im Sinne des Rückschlusses auf die Fehlerquelle sollte mehr Beachtung geschenkt werden. Die aus der geodätischen Betrachtungsweise entstandenen Prüfverfahren zielen auf die Einhaltung der gebräuchlichsten Spezifikationen im Sinne der ISO 17123 ab. Die Auswirkungen systematisch wirkender Restabweichungen der Instrumente oder äußerer Einflüssen auf funktions- und eigenschaftsorientierte Messaufgaben in der Fertigungstechnik können damit nicht bewertet werden. In dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass durch die Ermittlung der maximalen Abweichung von einer Sollgeometrie eine weiterführende Bewertung der Systeme vorgenommen werden kann.

Gelingt es die systembedingten Abbildungsfehler auf ein Minimum zu reduzieren, folgt daraus auch eine erhebliche Genauigkeitssteigerung bei der Registrierung von Einzelscans mit flächenbasierten Verfahren. Die zuverlässige Detektion von Instrumentenabweichungen aus sich überlagernden Scans stellt dabei ebenfalls ein wichtiges Forschungsfeld dar. Dafür müssen aber erst die genaue Wirkungsweise bekannt und ein entsprechendes vollständiges stochastisches Modell vorhanden sein. Da die Systeme aber immer komplexer in Bezug auf den internen Aufbau des Strahlengangs, das Anbringen von Korrekturen und die Signalauswertung der Distanzmessung werden, wird wohl auch in naher Zukunft für Anwender eher der Black-Box-Gedanke praktikabel sein. Umso wichtiger sind Aussagen zur Einsatzfähigkeit für definierte Anwendungsszenarien. Hier könnten Genauigkeitsangaben im Sinne eines „maximum permissible error“ (MPE) oder toleranzbasierte Angaben, wie es in der Koordinatenmesstechnik aufgrund der steigenden Komplexität der Messgeräte zunehmend an Bedeutung gewinnt, Anwendern eine eindeutige Entscheidungshilfe bieten.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden Verfahren zur Bestimmung der örtlichen Formabweichungen an definierten Prüfpunkten einer Oberfläche untersucht. Aufgrund der Einflussfaktoren auf die Messung, ist eine stochastische Modellierung der Genauigkeit eines 3D-Punktes derzeit unzureichend, um sie zur Angabe einer Messunsicherheit für abgeleitete geometrische Größen zu nutzen. Die Herstellerangaben können ebenfalls nicht genutzt werden, wie das Beispiel der FARO Focus zeigt. In der Arbeit konnten für den X120 die Auswirkungen des angegebenen systematischen Distanzfehlers nachgewiesen werden. Beim Nachfolger dem X130 erfolgte ein Umstellung der genutzten Wellenlänge des Lasers und damit offensichtlich eine Änderung des Distanzmessverfahrens. Erste praktische Erfahrungen zeigen wesentlich bessere Ergebnisse hinsichtlich der Formtreue, die Spezifikation hat sich aber nur hinsichtlich des Rauschens verändert. Welche Auswirkungen der angegebene Distanzfehler im neueren Modell hat, konnte im Rahmen

dieser Arbeit nicht mehr geklärt werden. Die Ableitung der Messunsicherheit aus einem Ausgleichsverfahren als Ermittlungstyp A des GUM stellt somit eine wesentlich realistischere Unsicherheitsangabe für TLS-Messungen dar, wenn systematisch wirkende Effekte adäquat berücksichtigt werden.

Für die Angabe einer Unsicherheit aus einem Ausgleichsprozess wurden in dieser Arbeit Verfahren auf Basis von Freiformflächenbeschreibungen zur Ermittlung der Formabweichungen analysiert. Grundlage der Verfahren bildet die Approximation lokaler Konturverläufe mit Hilfe radialer Basisfunktion. Es zeigt sich, dass durch die richtige Auswahl der radialen Basisfunktion der Modellfehler bei der Beschreibung harmonischer Flächen minimiert werden kann. Durch die Ansatzfunktionen erfolgt eine bestmögliche Beschreibung der örtlich begrenzten Umgebung eines Prüfmerkmals, aus der sich die Formabweichung ableitet. Die Glättung der Messdaten durch die Modellierung der Oberfläche führt zu einer signifikanten Reduzierung der zufälligen Abweichungen. Durch diese Vorgehensweise konnte die Eignung von Terrestrischen Laserscannern zur Formanalyse an einer exemplarischen Großstruktur nachgewiesen werden. Zukünftige Untersuchungen sollten sich mit der Nutzung der Verfahren zur Form- oder Deformationsanalyse durch eine globale Oberflächenbeschreibung und dem Vergleich zu den häufig genutzten B-Spline-Approximationen beschäftigen. Die Herausforderung besteht bei unbekannten Flächenverläufen in der Bewertung und Abschätzung lokaler Modellfehler, die sich zwangsläufig aus dem Kompromiss zwischen Glattheit der Fläche und Minimierung der Abweichungsquadrate ergeben.

Tabellenverzeichnis

2.1 Phasenvergleichsscanner für industrielle Anwendungen 21

3.1 Streifenlichtprojektor und Photogrammetriesystem 57
3.2 Lasertracker und Präzisionstachymeter 58
3.3 Abstände lokaler Ebenen vom Sollmodell des Versuchsaufbaus 59
3.4 Vergleich der Ergebnisse in der Farbuntersuchung 61

4.1 Gegenüberstellung der Antastabweichung 69
4.2 Spanne der Soll-Ist-Abweichungen 72
4.3 Ermittelte Abbildungsfehler Abstand 7.5 m 83
4.4 Arten der systematischen Abweichungen 84
4.5 Vergleich der Laserscanner anhand der minimal prüfbaren Flächentoleranz 89

5.1 Radiale Basisfunktionen 95
5.2 Gegenüberstellung der Modellansätze 112

6.1 Vorgehensweise bei der Messsystemanalyse [Dietrich et al., 2014] . . . 117
6.2 Klasseneinteilung zur Beurteilung der Eignung 118

Abbildungsverzeichnis

1.1 Anforderungen an die Messtechnik 8

2.1 Flächenleistung berührungsloser Messsysteme im Vergleich 12
2.2 Prinzip der flächenhaften Objekterfassung [Manske, 2012] 13
2.3 Grundprinzip der Koordinatenmesstechnik [Keferstein et al., 2008] . 15
2.4 Gestaltparameter von Werkstücken [Hehenberger, 2011] 15
2.5 Einteilung der Gestaltabweichungen nach DIN 4760 [Hartmann, 2015] 16
2.6 Definition der Formabweichungen [Gröger, 2013] 16
2.7 Übersicht der Toleranzarten [Gröger, 2013] 17
2.8 Zusammenhang zwischen Toleranz und Messunsicherheit 18
2.9 Lagerung von Objektkoordinatensystemen [Bäumker, 2010] 18
2.10 Punktverteilung aufgrund des Messprinzip [Rietdorf, 2005] 20
2.11 Grundprinzip der Modulation von Wellen 22
2.12 Zweifrequentes Phasendifferenzverfahren 23
2.13 Aufbau Ablenksystem [Mettenleiter et al., 2015] 24
2.14 Vergleich verschiedener Scanner [Lindstaedt et al., 2012] 27
2.15 Veränderung der Wellenfront 29
2.16 Einflussgrößen auf das Ergebnis einer TLS-Messung 29
2.17 Räumliche Anordnung von Prüfkörpern [Kern, 2010] 31
2.18 Entstehung von Streupunkten 33
2.19 Messkette für die Charakterisierung technischer Oberflächen 34
2.20 TLS-basierte Deformationsmodelle [Holst et al., 2017] 35
2.21 Wirkungsweise verschiedener Auswertestrategien Kreis [T. Pfeifer, 1992] 37
2.22 Grundprinzip der Blockwertmittelbildung [Eling, 2009] 38
2.23 Modellabweichung Ebene [Eling, 2009] 38
2.24 B-Spline-Kurven bzw. -Flächen nach de-Boor [Blaurock, 2004] 40
2.25 Ansatz zur lokalen Approximation mittels Ebenen [Grewe, 2014] . . . 41
2.26 Residuenanalyse der lokalen Ebene [Geist et al., 2015] 42

3.1 Prinzipdarstellung zu detektierender Abweichungen 47
3.2 Toleranzzone der Flächenformabweichung 49
3.3 Prüfpunkt und zu ermittlende Formabweichung 49
3.4 Gesuchte Abweichung von der Solloberfläche 50
3.5 Identifizierung grober Fehler 51
3.6 Komponenten der Messabweichungen 52
3.7 Vorgehen zur Ermittlung der kombinierten Standardunsicherheit 55

3.8 Versuchsaufbau Auftreffwinkel 57
3.9 Variation der Auftreffwinkel 58
3.10 Auswirkungen der vertikalen Exzentrizität [Gordon, 2008] 60
3.11 Untersuchung des Einflusses der Farbgebung 61

4.1 Testkörper Messwand 66
4.2 Kennlinien der Antastabweichung entfernungsabhängig 70
4.3 Segmentierung von Punkten gleichen Auftreffwinkels 70
4.4 Einteilung des Prüfkörpers auftreffwinkelabhängig 71
4.5 Kennlinien der Antastabweichung [Kern, 2008] auftreffwinkelabhängig 71
4.6 Kennlinien der Antastabweichung [Heister, 2006] auftreffwinkelabhängig 72
4.7 Modellvorstellung der Residuenverteilung [Mettenleiter et al., 2015] 74
4.8 Scannerabweichungen Voruntersuchung 75
4.9 Abbildungsfehlers Faro Focus S120 I 80
4.10 Abbildungsfehlers Trimble FX 81
4.11 Abbildungsfehlers Leica HDS 6000 81
4.12 Abbildungsfehlers Z+F Imager 5010 82
4.13 Abbildungsfehlers Faro Focus S120 II 82
4.14 Verhältnis von Abbildungsfehler und Rauschen 83
4.15 Vorschlag eines Prüfkörpers 85
4.16 Übereinstimmungsbereich Toleranz, Unsicherheit, Q_{MS} und Q_{MP} 88

5.1 Strahlendivergenz und Auflösungsvermögen [Rietdorf, 2005] 91
5.2 Reduzierung der Messunsicherheit [Zeiss, 2013] 92
5.3 Variation des Formparameters 96
5.4 Beispielanwendung und abgeleitetes Simulationsmodell 102
5.5 Ausdehnungsbereich der lokalen Approximation 103
5.6 Darstellung der Simulationsergebnisse 104
5.7 Abhängigkeit vom Ausdehnungsbereich für P_{Kmax} 105
5.8 Approximationsfehler für P_{Kmax} abhängig von RBF und R 106
5.9 Abhängigkeit des Approximationsfehlers vom Punktabstand 106
5.10 Filterwirkung ebenenbasierter Ansatz 108
5.11 Bewertung der Ebene anhand des Glättungsindex 108
5.12 Bewertung der Gauß-Funktion für RBF und MLS 109
5.13 Bewertung der TPS-Funktion für RBF und MLS 110
5.14 Bewertung der Wendland-Funktion für RBF und MLS 111
5.15 Ergebnis der lokalen Approximation MLS 112

6.1 Propellermodell: Versuchsaufbau und Prüfpunktanordnung 116
6.2 Messsystemanalyse (in Anlehnung an [Dietrich et al., 2014]) 117
6.3 Eignungskennwerten: Einzelpunktauswertung 119
6.4 Eignungskennwerten: Ebene 120
6.5 Eignungskennwerten: RBF-TPS 121
6.6 Eignungskennwerten: MLS-Wendland 122

Literatur

Antoni, M. und Keller, W. [2012]. *Nichtlineare Optimierung regionaler Gravitationsfeldmodelle aus SST-Daten*. Dissertation, 2011. Stuttgart: Universitätsbibliothek der Universität Stuttgart. URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-70382 [besucht am 12. 10. 2016].

Bauer, N. [2005]. »Optische 3D-Messtechnik auf dem Vormarsch«. In: *wt Werkstatttechnik online* 5 [1], S. 437–438.

Bäumker, M. [2010]. *Script Ingenieurvermessung WPB, Teil A2 (S.62-88), PDF-Datei - neue Version vom 21.09.2010). Industrievermessung*. Fachhochschule Bochum Fachbereich Vermessung und Geoinformatik. URL: www.hs-bochum.de/fb5/baeumker/download/ingv5wpf_teil2_2seitig.pdf [besucht am 23. 04. 2016].

Blaurock, J. E. [2004]. *Haptische Wahrnehmung rechnerinterner Freiformflächen. Erweiterung der Benutzungsschnittstelle eines 3D-CAD-Systems um ein Ein-/Ausgabegerät mit insgesamt fünf Freiheitsgraden*. Dissertation, 2004. Rechneranwendung in der Konstruktion. Aachen: Shaker Verlag.

Böhler, W. und Marbs, A. [2004]. »Vergleichende Untersuchung zur Genauigkeit und Auflösung verschiedener Scanner«. In: *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004*. Hrsg. von Luhmann Thomas. Bd. Beitrage der Oldenburger 3D-Tage 2004. Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 82–89.

Bole, M. [2014]. »Regenerating Hull Design Definition from Poor Surface Definitions and other Geometric Representations«. In: *International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries 13 Redworth* 2014, S. 193–208. URL: http://www.polycad.co.uk/downloads/MB_Compit2014.pdf [besucht am 26. 01. 2015].

Borkowski, A. [2004]. *Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten*. Dissertation, 2004. Bd. 575. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Borrmann, D. und Elseberg, J. [2009]. »Deforming Scans for Improving the Map Quality using Plane Extraction and Thin Plate Splines«. Institute for Computer Science Knowledge-Based Systems. Master-Thesis. Universität Osnabrück.

Brockmann, J. M. [2008]. »Effiziente Varianzkomponentenschätzung über iterative Techniken bei der GOCE-Daten Prozessierung«. Institut für Geodäsie und Geoinformation. Diplomarbeit. Bonn: Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. URL: http://www.igg.uni-bonn.de/tg/uploads/tx_ikgpublication/brockmann_08.pdf [besucht am 25. 05. 2016].

Bureick, J., Neuner, H., Harmening, C. und Neumann, I. [2016]. »Curve and surface approximation of 3D point clouds«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* [123], S. 315–327.

Coombe, G. [2006]. »An Introduction to Scattered Data Approximation«. Department of Computer Science. North Carolina: University of North Carolina at Chapel Hill.

Craven, P. und Wahba, G. [1977]. *Smoothing noisy data with spline functions. Estimating the correct degree of smoothing by the method of generelized cross-validation.* eng. Bd. 445. Technical report / Department of Statistics, University of Wisconsin. Wahba, Grace (VerfasserIn). Madison, Wis.: Univ. of Wisconsin Dep. of Statistics.

Dietrich, E. und Schulze, A. [2014]. *Eignungsnachweis von Prüfprozessen. Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld.* 4., überarb. Aufl. München: Hanser Verlag.

DIN 1101 [2014]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung - Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf.* DIN EN ISO 1101:2014-04. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 12180 [2011]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Begriffe und Kenngrößen - Zylindrizität.* DIN EN ISO 12180-1. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 12181 [2011]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Begriffe und Kenngrößen - Rundheit.* DIN EN ISO 12181-1. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 12780 [2011]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Begriffe und Kenngrößen - Gradheit.* DIN EN ISO 12780-1. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 12781 [2011]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Begriffe und Kenngrößen - Ebenheit.* DIN EN ISO 12781-1. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 14253 [1999]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen.* DIN EN ISO 14253. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 15530-3 [2012]. *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen.* DIN EN ISO 15530-3. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN 16610 [2011]. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung.* DIN EN ISO 16610. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DIN V ENV 13005 [1999]. *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen.* DIN V ENV 13005. Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Berlin.

DKD [2012]. *Leitfaden - Praxisgerechte Ermittlung der Messunsicherheit. Grundlagen und Vorgehensweisen für einfache Modelle ohne Korrelation.* URL: `https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/dkd/Leitfaden-Messunsicherheit.pdf` [besucht am 17. 05. 2016].

Dold, C. [2010]. *Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans.* Bd. 646. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen

Akademie der Wissenschaften : Reihe C, Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N. und Molnár, G. [2008]. »On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners«. In: *Journal of Applied Geodesy* 2 [4].

Dreisch, T. und Konen, H. [2013]. *Licht und Materie*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Duchon, J. [1976]. »Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces«. In: *ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis - Modélisation Mathématique et Analyse Numérique* 10 [R3], S. 5–12.

Edessa, D. M. [2016]. *A Framework for hull reverse engineering and geometry integration into numerical simulations*. Dissertation, 2016. Rostock: Universität Rostock Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik.

Ehm, M. und Hesse, C. [2014]. »Retrofit mit 3D-Laserscanning«. In: Bd. April 2014, Nr.4. Schiff & Hafen, S. 20–23.

Ehm, M. und Hesse, C. [2012]. »Entwicklung eines kinematischen Laserscannersystems für Anwendungen im Schiffbau«. In: *Go-3D 2012 Computergraphik für die Praxis: Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2012*. Hrsg. von U. Freiherr von Lukas, E.-M. Mahnke und K. Haase. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Eling, D. [2009]. *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung*. Bd. 641. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Engeln-Müllges, G., Niederdrenk, K. und Wodicka, R. [2011]. *Numerik-Algorithmen. Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. 10. Aufl. Xpert.press. s.l.: Springer Verlag.

Fahrmeir, L., Kneib, T. und Lang, S. [2009]. *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Farin, G. E., Hoschek, J. und Kim, M.-S. [2002]. *Handbook of computer aided geometric design*. Amsterdam und Boston, Mass.: Elsevier.

Faro Europe [2010]. *Datenblatt Faro Focus 3D 120*. url: `http://www.laserscanning-europe.com/de/system/files/FARO_Laser_Scanner_Focus_3D_Tech_Sheet.pdf` [besucht am 18. 04. 2015].

Fasshauer, G. [2008a]. *Meshfree approximation methods with MATLAB*. Bd. 6. Interdisciplinary mathematical sciences. New Jersey: World Scientific.

Fasshauer, G. [2008b]. »"Optimal" Shape Parameters for RBF Approximation Methods«. In: *Dolomites Research Notes on Approximation* 1.

Fröhlich, C., Mettenleiter, M., Held, C., Blersch, D. und Kurz, S. [2015]. »Umgebungsvermessung anhand von 3D Geometrie mit HDR Farbe und Wärmebilddaten«. In: *at - Automatisierungstechnik* 63 [4].

Garmann, M., Alkhatib, H., Schmitt, C. und Neumann, I. [2014]. »Monitoring von Brückenbauwerken mittels Modellierung von Freiformkurven für Laserscanning-Profile«. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge*

der Oldenburger 3D-Tage 2014. Hrsg. von T. Luhmann. Berlin: Wichmann Verlag, S. 306–316.

Geist, M. und Grewe, O. [2013]. »Anwendungsbezogene TLS-Prüfung«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag, S. 10–19.

Geist, M., Meister, M., Knaack, L. und Gierschner, F. [2015]. »Lokale Modellierung zur Bestimmung von Flächenabweichungen mittels terrestrischer Laserscanner«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin [u.a.]: Wichmann Verlag, S. 2–13.

Gielsdorf, F. [2013]. »Scanregistrierung ohne Targets mit vollständiger statistischer Analyse«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag, S. 38–44.

GLM LASERMESSTECHNIK [2016]. *Datenblatt Sokkia Net 05*. URL: `http://www.glm-laser.com/glm/files/new_net_axii_specs_de.pdf` [besucht am 20. 02. 2016].

Godzierz, M. [2007]. »Globale Optimierung extrem aufwendiger Funktionen mit hochparallelen und sequentiellen Methoden«. Fachbereich Mathematik. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.

Gordon, B. [2008]. »Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner«. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.

Grewe, O. [2014]. »Erfassung und Ausgleich geometrischer Imperfektionen an Yachtoberflächen«. Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik. Dissertation. Universität Rostock.

Grewe, O. und Geist, M. [2010]. »3-D-Vermessung von Großstrukturen«. In: *Großstrukturen. Zehn Jahre Forschung für die Praxis*. Hrsg. von M.-C. Wanner. Rostock: Redieck & Schade, S. 115–127.

Grewe, O. und Geist, M. [2012]. »Laserscanning als Werkzeug für das Spachteln von Megayachten«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der [11.] Oldenburger 3D-Tage 2012*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag, S. 63–69.

Grewe, O. und Geist, M. [2014]. »Reverse Engineering von Schiffsstrukturen«. In: *HANSA Internationale Maritime Journal* 151. Jahrgang 2014 Nr. 5, S. 30–34.

Grewe, O., Wanner, M.-C. und Petkov, V. [2013]. »Oberflächenerfassung und automatische Auswertung von CFK-Propellerstrukturen«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag.

Grimm-Pitzinger, A. und Rudig, S. [2005]. »Freiformflächen für Deformationsmessungen«. In: *zfv* [3], S. 180–183.

Gröger, S. [2013]. »Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation«. Fakultät für

Maschinenbau. Habilitationsschrift. Chemnitz: Technischen Universität Chemnitz. URL: http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/12029/Habilitation_Sophie_Groeger.pdf [besucht am 23. 04. 2016].

Hartmann, W. D. [2015]. *Mess- und Auswertestrategien zur modellbasierten Bewertung funktionaler Eigenschaften mikrostrukturierter Oberflächen.* Dissertation, 2014. Bd. 30. Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmeßtechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Aachen: Shaker Verlag.

Hehenberger, P. [2011]. *Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung.* Berlin [u.a.]: Springer Verlag.

Heister, H. [2006]. »Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2006) ; Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda.* Hrsg. von DVW e.V. Bd. 51. Schriftenreihe des DVW 51. Augsburg: Wißner Verlag, S. 35–44.

Heister, H. und Heunecke, O. [2004]. *Prinzip und Einsatzmöglichkeiten des terrestrischen Laserscannings.* Universität der Bundeswehr München. URL: https://www.unibw.de/inf4/professuren/geoinformatik/weiterbildung/Seminar_GIS/vortraege_04.

Hennes, M. [2007a]. »Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* [7], S. 136–146.

Hennes, M. [2007b]. »Potentiale der Ingenieurgeodäsie im Maschinenbau«. In: *Tagungsband zum 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag der TU Dresden* 2007 [Schriftenreihe des Geodätischen Instituts Nr. 4], S. 21–27.

Hennes, M. [2010]. »Ausgewählte Initiativen zur Qualitätssicherung in der Messtechnik«. In: *Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren ; Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11. Juni 2010 in Hannover.* Hrsg. von D. e.V. Bd. 61. DVW-Schriftenreihe 61. Augsburg: Wißner Verlag, S. 239–252.

Hennes, M. und Heister, H. [2007]. »Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenenieurgeodäsie«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* [11-12], S. 375–383.

Henzold, G. [2011]. *Anwendung der Normen über Form- und Lagetoleranzen in der Praxis. DIN-Normenheft 7.* 7., Aufl. Bd. 7. Beuth Praxis. Berlin: Beuth Verlag.

Hering-Bertram, M. [2006]. *Kontinuierliche Repräsentation geometrischer Daten.* Zusammenfassung zur Habilitationsschrift.

Hernla, M. [2000]. »Anwendung von Filtern bei der Auswertung gemessener Oberflächenprofile (Application of Filters in the Evaluation of Measured Surface Profiles)«. In: *Technisches Messen* 67 [3].

Hernla, M. [1994]. »Form- und Lageabweichungen - die Definitionen reichen nicht«. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 39 [10], S. 1116–1122.

Hernla, M. [1996]. »Messunsicherheit und Fähigkeit. Eine Übersicht für die betriebliche Praxis«. In: *Qualität und Messen* 10 [41], S. 1156–1162.

Heunecke, O. [2014]. »Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau«. In: *zfv* 4 [139], S. 241–251.

Hexagon Metrology [2013]. *Datenblatt Leica Absolute Tracker AT901.* URL: http://www.leica-geosystems.de/downloads123/m1/metrology/general/

brochures-datasheet/Leica%20Absolute%20Tracker%20and%20PCMM%20specs_de.pdf [besucht am 12. 10. 2016].

Hirtl, N. [2009]. *Genauigkeitsuntersuchung terrestrischer Laserscanner zur Dokumentation von Restaurierungsarbeiten*. Wien, Techn. Univ., Dipl.-Arb., 2009.

Holst, C. [2015]. *Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans*. Dissertation, 2015. Bd. 51. Schriftenreihe / Universität Bonn, Institut für Geodösie und Geoinformation. Bonn: Universitäts- und Landesbibliothek Bonn.

Holst, C. und Kuhlmann, H. [2011]. »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 am 1. und 2. Dezember 2011 in Fulda*. Hrsg. von DVW e.V. Bd. 66. Schriftenreihe des DVW 66. Ausgsburg: Wißner Verlag, S. 161–180.

Holst, C. und Kuhlmann, H. [2014a]. *Trennung von systematischen TLS-Abweichungen und Deformationen bei der Formanalyse des Radioteleskops Effelsberg*. Berlin. url: http://www.uni-stuttgart.de/gi/research/Geodaetische_Woche/2014/Session04/HolstKuhlmann.pdf [besucht am 18. 05. 2016].

Holst, C., Schmitz, B., Schraven, A. und Kuhlmann, H. [2017]. »Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken?« In: *zfv* 142 [2], S. 98–110.

Holst, C., Tegelbeckers, J. und Kuhlmann, H. [2014b]. »Erkennung und Erklärung von systematischen Effekten beim TLS«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2014) Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda*. Hrsg. von DVW e.V. 1. Aufl. Bd. 78. Schriftenreihe des DVW 78. Augsburg: Wißner Verlag, S. 51–68.

Imkamp, D., Schmitt, R. und Berthold, J. [2012]. »Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik«. In: *tm - Technisches Messen* 79 [10], S. 433–439. [Besucht am 11. 02. 2017].

Ioannidis, C., Valani, A., Georgopoulos, A. und Tsiligiris, E. [2006]. »3D model Generation for Deformation Analysis using Laser Scanning data of a Cooling Tower«. In: *3rd IAG 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24*.

ISO 17123 [2014]. *Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments*. ISO 17123. Organization for Standardization. Switzerland.

ISO 484 [2015]. *Shipbuilding - Ship screw propellers - Manufacturing tolerances*. ISO 484. Organization for Standardization. Switzerland.

JCGM [2012]. *International vocabulary of metrology. Basic and general concepts and associated terms (VIM) = Vocabulaire international de métrologie : concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*. English und French parallel texts. 3rd edition, 2008 version with minor corrections. [Paris, France]: [BIPM, Bureau International des Poids et Mesures].

Joeckel, R. und Stober, M. [2008]. *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. 5., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Wittwer Verlag.

Jusko, O. und Neugebauer, M. [2007]. »Grundlagen der Rückführung von Koordinatenmessgeräten«. In: *PTB-Mitteilungen* 117 [4].

Kampshoff, S. [2005]. *Integration heterogener raumbezogener Objekte aus fragmentierten Geodatenbeständen*. Geodätischen Instituts.

Kaschenz, J. [2006]. *Regularisierung unter Berücksichtigung von Residuentoleranzen*. Techn. Univ., Diss.–Berlin, 2006. Scientific Technical Report STR. Potsdam und Göttingen: Geoforschungszentrum und Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek.

Kaufmann, T. [1982]. *The meshless radial point interpolation method for electromagnetics*. Dissertation Nr. 19622 ETH Zürich.

Keferstein, C. P. und Dutschke, W. [2008]. *Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 6., überarb. und erw. Aufl. Lehrbuch : Maschinenbau. Wiesbaden: Teubner Verlag.

Kern, F. [2003]. *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, 2002. Bd. 19. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.

Kern, F. [2008]. »Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern«. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 306–316.

Kern, F. [2010]. »Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen. Entwurf«. In: url: `http://www.laserscanning-europe.com/en/system/files/TLSRichtlinie_07.pdf` [besucht am 06. 05. 2016].

Kern, F. [2011a]. *Bildverarbeitungsgestütztes Kalibrier-, Prüf- und Feldprüfverfahren für Terrestrische Laserscannersysteme zur Qualitätssteigerung (SigmaTLS+)*. Technik Hochschule Mainz.

Kern, F. [2011b]. *Praktische Erfahrungen bei der TLS-Prüfung*. 4. Hamburger Anwendungsforum Terrestrisches Laserscanning. Hamburg: HafenCity Universität Hamburg.

Kern, F. und Huxhagen, U. [2008]. »Ansätze zur systematischen Kalibrierung und Prüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2008) ; Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda*. Hrsg. von W. Niemeier und M. Schäfer. Bd. 54. Schriftenreihe des DVW 54. Augsburg: Wißner Verlag, S. 111–124.

Kersten, T., Sternberg, H., Mechelke, K. und Lindstaedt, M. [2005]. »Zur Objektgenerierung in Punktwolken des terrestrischen Laserscanners Mensi GS100 mit der Modellierungssoftware 3Dipsos«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS) ; ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft ; am 21. und 22. November 2005 in Fulda*. Hrsg. von DVW e.V. 1. Aufl. Bd. 48. Beitraege zum 65. DVW-Seminar 65. Augsburg: Wißner Verlag, S. 127–147.

Kistner, A. und Schäfer, B. [2015]. *Prüfmittelmanagement*. Bd. 13-61. DGQ-Band. München: Hanser Verlag.

Klein, M. und Kiehl, P. [2001]. *Einführung in die DIN-Normen*. 13., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Teubner Verlag.

Krämer, P. und Weckenmann, A. [2010]. »Simulative Abschätzung der Messunsicherheit von Messungen mit Röntgen-Computertomographie«. In: *Proceedings / Industrielle Computertomografie-Tagung. [zerstörungsfreie Bauteilprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung ; Fachtagung, 27. - 29. September 2010, FH OÖ Campus Wels/Austria ; eine Veranstaltung im Rahmen des K-Projektes ZPT, Zerstörungsfreie Prüfung und Tomografie].* Hrsg. von J. Kastner. Aachen: Shaker Verlag, S. 243–248.

Krystek, M. [1996]. »Form filtering by splines«. In: *Measurement* 18 [1], S. 9–15.

Krystek, M. [2009]. »ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik ISO Filters for Precision Engineering«. In: *tm - Technisches Messen* 76 [3].

Lague, D., Brodu, N. und J., L. [2013]. »Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z)«. In: *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [Commission V], S. 10–26.

Lancaster, P. und Salkauskas, K. [1981]. »Surfaces Generated by Moving Least Squares Methods«. In: *Mathematics of Computation* 37 [155], S. 141–158.

Leica Geosystems [2016]. *Datenblatt Leica MS50.* URL: `http://www.leica-geosystems.de/downloads123/zz/tps/nova_ms50/brochures-datasheet/Leica_Nova_MS50_DAT_de.pdf` [besucht am 20. 05. 2016].

Leica Geosystems [2007]. *Datenblatt Leica HDS6000.* URL: `http://www.leica-geosystems.sk/OLD/teo4_Leica%20HDS6000_EN.pdf` [besucht am 12. 04. 2015].

Lichtenberger, R. [2014]. »Surphaser - 3D-Laserscanner der Extraklasse«. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014.* Hrsg. von T. Luhmann. Berlin: Wichmann Verlag, S. 362–367.

Lichti, D. D. [2007]. »Error modelling, calibration and analysis of an AW-CW terrestrial laser scanner system«. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 [1], S. 307–324.

Lichti, D. D. [2010]. »Terrestrial laser scanner self-calibration. Correlation sources and their mitigation«. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 [1], S. 93–102.

Lichti, D. D. und Licht, M. G. [2006]. »Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment«. In: *ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology' . International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [36-5], S. 155–160.

Lindstaedt, M., Kersten, T., Mechelke, K. und Graeger, T. [2012]. »Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner - Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der [11.] Oldenburger 3D-Tage 2012.* Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag, S. 264–275.

Löffler, F., Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H. und Werner, H. [2002]. *Handbuch Ingenieurgeodäsie: Maschinen- und Anlagenbau.* 2. Aufl. Bd. Bd. 7. 8 Bde. Wichmann Verlag.

Lösler, M. und Nitschke, M. [2010]. »Bestimmung der Parameter einer Regressionsellipse in allgemeiner Raumlage«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 2010 [3], S. 113–117.

Manske, J. [2012]. »Bewertung von Oberflächenabweichungen mittels Krümmungsanalyse«. Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Lehrstuhl Fertigungstechnik. Masterarbeit. Rostock: Universität.

Maresch, T. [2006]. »Mathematik-Verknüpfung von 2D- und 3D-Punktwolken«. Fachbereich Mathematik und Informatik, Physik, Geographie. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

Masing, W., Pfeifer, T. und Schmitt, R. [2014]. *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. 6., überarb. Aufl. Masing, Walter, (Begr.) München: Hanser Verlag.

Mechelke, K., Kersten, T. und Lindstaedt, M. [2008]. »Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuster terrestrischer Laserscannersysteme - Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006«. In: *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 317–328.

Mettenleiter, M., Härtl, F., Kresser, S. und Fröhlich, C. [2015]. *Laserscanning. Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung*. Unter Mitarb. von M. Mettenleiter, F. Härtl, S. Kresser und C. Fröhlich. neue Ausg. Bd. 371. Die Bibliothek der Technik (BT). München: Süddeutscher Verlag onpact.

Micro Epsilon [2016]. *Oberflächeninspektion*. URL: `http://www.inb-vision.de/technologie/Oberflaecheninspektion/index.html` [besucht am 12. 09. 2016].

Molnár, G. P., Ressl, C., Dorninger, P. und Nothegger, C. [2009]. »On-the-job Range Calibration of Terrestrial Laser Scanners with Piecewise Linear Functions«. In: *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2009 [1]. 03, S. 9–21.

Möser, M. [2007]. »20 Jahre Industrievermessung«. In: *Tagungsband zum 3. Dresdener Ingenieurgeodäsietag der TU Dresden* 2007 [Schriftenreihe des Geodätischen Instituts Nr. 4], S. 7–19.

Munz, C.-D. [2012]. *Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen. Ein interaktives Lehrbuch für Ingenieure*. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Muralikrishnan, B. und Raja, J. [2009]. *Computational Surface and Roundness Metrology*. eng. London: Springer Verlag.

Naab, C. [2012]. »Zur Parametrisierung bei der Modellierung von Objekten mit extremen Krümmungsänderungen«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-Messtechnik. Beiträge der [11.] Oldenburger 3D-Tage 2012*. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann Verlag.

Neitzel, F. [2006]. »Untersuchung des Achssystems und des Untersuchung des Achssystems und des Taumelfehlers terrestrischer Laserscanner mit tachymetrischem Messprinzip«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2006) ; Beiträge zum 72. DVW-Seminar am 9. und 10. November 2006 in Fulda*. Hrsg. von DVW e.V. Bd. 51. Schriftenreihe des DVW 51. Augsburg: Wißner Verlag, S. 15–34.

Neitzel, F., Mordwinzew, W. und Lerche Christian [2010]. »Untersuchung von Registrierungsverfahren hinsichtlich des Einsatzes terrestrischer Laserscanner in der Deformationsmessung«. In: *Photogrammetrie, Laserscanning, optische 3D-*

Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. Hrsg. von T. Luhmann und C. Müller. Berlin: Wichmann VDE-Verlag.

Neugebauer, M. [2013]. *Ermittlung der Unsicherheit von Formmessungen.* Hrsg. von Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 268. PTB-Seminar Berechnung der Messunsicherheit. Berlin.

Neumann, I. [2009]. *Zur Modellierung eines erweiterten Unsicherheitshaushaltes in Parameterschätzung und Hypothesentests.* Bd. 277. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz-Universität Hannover. Hannover: Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibnitz-Univ.

Neuner, H., Holst, C. und Kuhlmann, H. [2016]. »Overview on Current Modelling Strategies of Point Clouds for Deformation Analysis«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* [11-12], S. 328–339.

Niemeier, W. [2002]. *Ausgleichungsrechnung. Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs- und Geoinformationswesens.* De-Gruyter-Lehrbuch. Berlin und New York: De Gruyter Verlag.

Nuckelt, A. [2007]. *Dreidimensionale Plattenkinematik. Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsfläche am Beispiel der Vrancea-Zone, Rumänien.* Dissertation, 2007. Print on demand. Bd. 2007,5. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik / Geodätisches Institut. Karlsruhe: Universitäts Verlag Karlsruhe und Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek.

Pesch, B. [2003]. *Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM.* Grundlagen der Metrologie. Norderstedt: Books on Demand.

Pesch, B. [2009]. *Messen, Kalibrieren, Prüfen. Messungen planen, durchführen, bewerten, optimieren und dokumentieren.* Grundlagen der Metrologie. Norderstedt: Books on Demand.

Pfeifer, N., Haring, A. und Briese, C. [2007]. »Automatische Auswertung im terrestrischen Laserscanning. Terrestrisches Laserscanning (TLS 2007) - Ein Messverfahren erobert den Raum«. In: Bd. 53. Schriftenreihe des DVW. Wittwer Verlag.

Pfeifer, T. [1992]. *Koordinatenmeßtechnik für die Qualitätssicherung. Grundlagen - Technologien - Anwendungen - Erfahrungen.* VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Pfeifer, T. und Wollersheim, H.-R. [1981]. *Messung der Zylinderformabweichung durch Abtastung der Mantellinie entlang einer Schraubenlinie.* Bd. 3077. Forschungsberichte des Landes Nordrhein- Westfalen. Opladen 1981: Verlag Für Sozialwissenschaften.

Pfeiffer, T. G. [2011]. »Gitterfreie Methoden zur Berechnung harmonischer baryzentrischer Koordinaten für die Geometrieverarbeitung«. Fachbereich Mathematik und Informatik. Diplomarbeit. Berlin: Freie Universität.

Piegl, L. A. und Tiller, W. [1997]. *The NURBS book.* 2nd ed. Monographs in visual communications. Berlin und New York: Springer Verlag.

Pollock, D. [1999]. »Smoothing with Cubic Splines«. In: *Handbook of Time Series Analysis, Signal Processing, and Dynamics.* Elsevier, S. 293–322.

Prasiswa, J. S. M. [2009]. »Lokale und globale Algorithmen zur Approximation mit erweiterten B-Splines«. Fachbereich Mathematik. Dissertation, 2009. Technischen Universität Darmstadt.

Pyttel, R. [2007]. »A robust algorithm for point set registration using mixtures of gaussians«. In: *Medizinische Bildverarbeitung*. Hrsg. von Institut für Medizinische Informatik der RWTH Aachen. Bd. 2. 4 Bde. Aachener Schriften zur medizinischen Informatik 2. Aachen: Inst. für Med. Informatik, S. 54–66.

REORG GmbH [2007]. »Optische versus taktikle Messtechniken«. In: *QE Quality Engineering* 7-8 [1], S. 76–77.

Reshetyuk, Y. [2006]. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Bd. 06-003. Trita-TEC-LIC. Stockholm und Division of Geodesy, Royal Institute of Technology.

Richter, M. [2015]. *Inverse Probleme. Grundlagen, Theorie und Anwendungsbeispiele*. Mathematik im Fokus. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum Verlag.

Rietdorf, A. [2005]. *Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip*. Dissertation. Bd. 582. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften Reihe C, Dissertationen. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Schulz, T. [2008]. *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy*. Dissertation. eng. Bd. 96. Mitteilungen / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Schütze, T. [1998]. »Diskrete Quadratmittelapproximation durch Splines mit freien Knoten«. Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften. Dissertation, 1998. Technische Universität Dresden.

Schwarz, W., Hrsg. [2004]. *Interdisziplinäre Messaufgaben im Bauwesen - Weimar 2004. Beiträge zum 61. DVW-Fortbildungsseminar am 27. und 28. September 2004 an der Bauhaus-Universität Weimar*. Bd. 46. Schriftenreihe des DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement. Augsburg: Wißner Verlag.

Schwenke, H. [1999]. *Abschätzung von Meßunsicherheiten durch Simulation an Beispielen aus der Fertigungsmeßtechnik*. Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 1999. Bd. 36. PTB-Bericht : F, Fertigungsmeßtechnik. Braunschweig.

Schwenke, H., Kunzmann, H., Siebert, B. und Wäldele, F. [2000]. »Assessment of Uncertainties in Dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation. Proposal of a Modular and Visual Software«. In: *Annals of the CIRP* 49, S. 395–398.

Seiler, M. S. [2012]. *Geometrische Restriktionen bei der geometriebasierten Strukturoptimierung von Maschinenbauteilen mit Freiformgeometrien*. Dissertation,2012. Aachen: Technische Hochschule Aachen Fakultät für Maschinenwesen.

Shepard, D. [1968]. *Geography and the Properties of Surfaces. A Two-Dimensional Interpolation Function for Computer Mapping of Irregularly Spaced data*. Ft. Belvoir: Defense Technical Information Center.

Sommer, K.-D. und Kessel, R. [2014]. »Messunsicherheit«. In: *Sensortechnik. Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Hrsg. von H.-R. Tränkler und L. Reindl. 2., völlig neu bearb. Aufl. 2014. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, S. 21–40.

Staiger, R. [2014]. »Terrestrisches Laserscanning - eine Bestandsaufnahme 2014«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2014) Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda.* Hrsg. von DVW e.V. 1. Aufl. Bd. 78. Schriftenreihe des DVW 78. Augsburg: Wißner Verlag, S. 3–18.

Trimble Germany [2009]. *Datenblatt Trimble FX-Scanner.* URL: `http://www.laserscanning-europe.com/sites/default/files/Trimble/Trimble%20FX_DS_0208_lr_der.pdf` [besucht am 18. 04. 2015].

Van Gosliga, R., Lindenbergh, R. und Pfeifer, N. [2006]. »Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning«. In: *IAPRS Volume XXXVI. Part 5, Dresden 25-27 September.*

VDI/VDE 2634 [2002]. *Optische 3-D-Messsysteme - Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung.* VDI/VDE 2634, Blatt 2. Beuth Verlag. Berlin.

Weber, H. [2001]. »Unsicherheitsbetrachtungen bei Kreismessungen in der Fertigungsmesstechnik«. In: *Fachvorträge // XI. Internationale Geodätische Woche : Obergurgl 2001*, S. 126–133.

Weckenmann, A. und Dietlmaier, A. [2008]. »Messunsicherheit kennen - Risiken beherrschen«. In: *Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen. 4. Fachtagung Messunsicherheit ; 12. und 13. November 2008 in Erfurt ; [Tagungsbericht].* Düsseldorf: VDI Wissensforum, S. 9–14.

Weckenmann, A. und Gawande, B. [2007]. *Koordinatenmesstechnik. Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lage.* 2., Aufl. München: Hanser Verlag.

Wehmann, W., van Zyl, C., Kramer, H., Widiger, D. und Zimmermann, R. [2007]. »Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld«. In: *zfv* [3], S. 175–180.

Weissensee, K. [2011]. *Beitrag zur automatisierbaren Messunsicherheitsermittlung in der Präzisionskoordinatenmesstechnik mit Bildsensoren.* Berlin: Epubli.

Wendland, H. [2010]. *Scattered data approximation.* Bd. 17. Cambridge monographs on applied and computational mathematics. Cambridge und New York: Cambridge University Press.

Westkämper, E. und Warnecke, H.-J. [2002]. *Einführung in die Fertigungstechnik.* 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Teubner Studienbücher Technik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Wodny, M., Jäger, B. und Biebler, K.-E. [2003]. »Ausgleichende natürliche kubische Splines und die Schätzung des Glättungsparameters in SAS«. In: *Data Mining und Statistik in Hochschule und Wirtschaft. Proceedings der 7. Konferenz der SAS-Anwender in Forschung und Entwicklung (KSFE) ; [20. Februar - 21. Februar 2003, Universität Potsdam].* Hrsg. von C. Becker. Berichte aus der Statistik. Aachen: Shaker Verlag.

Wunderlich, T. A., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F. und Kuhlmann, H. [2016]. »Areal Deformantion Analysis from TLS Point Clouds - The Challenge«. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* [11-12], S. 340–351.

Wunderlich, T. A., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T. und Reidl, F. [2013]. »Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner Ein Beitrag

des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München«. In: *Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie* [20], S. 1–55.

Zamecnikova, M. und Neuner, H.-B. [2014]. »Der Einfluss des Auftreffwinkels auf die reflektorlose Distanzmessung«. In: *Terrestrisches Laserscanning. (TLS 2014) Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda*. Hrsg. von DVW e.V. 1. Aufl. Bd. 78. Schriftenreihe des DVW 78. Augsburg: Wißner Verlag, S. 69–85.

ZEISS [2013]. *ISO 10360 Die neue Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte*. Hrsg. von Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH. url: http://www.imtecweb.de/assets/iso_10360.pdf [besucht am 14. 03. 2017].

Zogg, H. M. [2008]. »Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system«. Institute of Geodesy and Photogrammetry. eng. Disserstation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule. [Besucht am 09. 05. 2016].

Zoller + Fröhlich, Hrsg. [2013]. *Understanding Imager 5010 accuracy specifications*. per e-mail übermittelt von Zoller + Fröhlich an Michael Geist.

Zoller+Fröhlich [2016]. url: http://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5010X.3d_laser_scanner.0.html [besucht am 20. 05. 2016].

Zoller+Fröhlich [2015]. *Datenblatt Z+F Imager 5010*. url: http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z_F_IMAGER_5010_Datasheet_E.pdf [besucht am 20. 06. 2015].

Die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit lassen sich durch die folgenden Thesen zusammenfassen:

1. Die Reduzierung von Prüfkörpergrößen und Anpassung von Kennwerten hat dazu geführt, dass terrestrische Laserscanner mit den existieren Prüfvorschlägen nicht mehr bezüglich des Qualitätsmerkmals der formtreuen Abbildung von Oberflächen bewertet werden können.

2. Die Bewertung der Qualität eines flächenhaft messenden Verfahrens sollte auch flächenhaft erfolgen. Die Rückführung auf einen diskreten Punkt wird durch die Art der Rückführung beeinflusst und verzerrt die Beurteilung der Systeme bei der Interpretation der Ergebnisse.

3. Mit der Bewertung der Formtreue konnte ein neues Verfahren zur Beurteilung der Datenqualität eines TLS-Systems entwickelt werden. Durch die Trennung von systematischen und zufälligen Abweichungen an einem genügend großen Prüfkörper können realistische Unsicherheitsangaben zur Bestimmung der Messunsicherheit entsprechend der Verfahrensweise des Leitfadens zur Bestimmung der Unsicherheit bei Messen abgeleitet werden.

4. Durch die flächenhafte Betrachtung unter Berücksichtigung des Messprozesses gelingt es, die Wirkungsweise instrumentenbedingter Abweichungen nachzuweisen. Diese Abweichungen führen zu einer Verzerrung der diskretisierten Oberfläche und haben somit direkte Auswirkungen auf die Formanalyse von Freiformflächen.

5. Approximationsverfahren auf Grundlage radialer Basisfunktion sind geeignet lokale Konturverläufe auf technischen Strukturen bestmöglich zu beschreiben. Dabei erfolgt eine räumliche Filterung der Messdaten, die es ermöglicht einen hochgenauen Nachweis der Formabweichungen von der Sollgestalt zu führen.

6. Nicht jede radiale Basisfunktion eignet sich gleichermaßen zur Beschreibung von Oberflächen. Erst durch die Kombination einer geeigneten Funktion mit dem Approximationsverfahren kann bei der Glättung von TLS-Daten ein bestmögliches Ergebnis erreicht werden.

7. Terrestrische Laserscanner eignen sich für Präzisionsaufgaben in der industriellen Fertigung. Durch die Untersuchung der Wiederholpräzision in Form einer Messmittelanalyse an einer exemplarischen Großstruktur konnte das Genauigkeitspotential eines Phasenvergleichsscanners in Kombination mit einem Glättungsverfahren nachgewiesen werden.