

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022

Beiträge zum 208. DVW-Seminar am
2. und 3. Juni 2022 in Berlin



Schriftenreihe des DVW
Band 101 / 2022

Wißner

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022

Beiträge zum 208. DVW-Seminar am
2. und 3. Juni 2022 in Berlin

Redaktion:

Li Zhang, Ingo Neumann und Werner Stempfhuber

Herausgeber:

DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement



Schriftenreihe des DVW
Band 101
Wißner-Verlag

Herausgeber:
DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie,
Geoinformation und Landmanagement

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 101

Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

Die PDF enthält zur Navigation Lesezeichen und Hyperlinks.
Der Mausklick auf ein Lesezeichen führt zur ersten Seite des angewählten Beitrags.
Der Mausklick auf einen dunkelblau markierten Abbildungs- oder Tabellenverweis im Text führt zur verknüpften Abbildung oder Tabelle. Zurück zur ursprünglichen Stelle im Text gelangt man mit dem Klick auf den dunkelblau markierten Verweis in der Abbildungsunterschrift oder Tabellenüberschrift.
Internetadressen und E-Mail-Adressen sind ebenfalls mit Hyperlinks hinterlegt.
Kostenfreier PDF-Download unter www.geodesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022.
DVW-Schriftenreihe, Band 101, Augsburg, 2022, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-95786-314-0
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2022
www.geodesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Werner Stempfhuber, BHT Berlin

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in
anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen
schriftlichen Einwilligung des Verlags.

Inhalt

Vorwort	5
---------	---

Session 1: Einführung

Ingo Neumann Hamza Alkhatib Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren – das Handwerkszeug	9
Martin Brück von Oertzen Stefan Bischoff Herausforderung Qualitätssicherung: Vertragliche Regeln, Absicherung, Gewährleistung	13
Helmut Woschitz Selbstleuchtende Latte vom Typ „LumiScale“ – Systemüberprüfung und Überlegungen zur Genauigkeit	33
Alexander Reiterer Philipp von Olshausen Philip Maus Simon Frey Stefan Schwarzer Aufbau und Kalibration eines komplexen mobilen Multisensorsystems – Ein Überblick	53

Session 2: Prüfung und Kalibrierung von geodätischen Instrumenten

Franziska Altemeier Bianca Gordon Peter Wasmeier Ingo Neumann Zur Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des TLS-Prüfverfahrens nach ISO 17123-9	67
Michael Vogel TRIMBLE X7 – Prinzipien der Selbstkalibrierung	81
Barbara Görres Klaus Fritzensmeier Uwe Ehrhorn Rolf Hollmann Michael Mayer Florian Pollinger DIN-Norm 18213 GNSS-Feldprüfverfahren – Qualitätssicherung für die Berufspraxis	95
Heinz-Jürgen Przybillia Thomas Kersten Aspekte der Qualitätssicherung für UAV-Anwendungen in der Photogrammetrie	101

Session 3: Interdisziplinäre Anwendungen und Auswertestrategien

Laura Balangé Li Zhang Volker Schwieger Qualitätssicherung im Rahmen des Exzellenzclusters IntCDC	127
Christoph Herrmann Koordinatenmesstechnik im Maschinenbau – Aspekte der Kalibrierung und Unsicherheit	143
Otto Heunecke Toleranzprüfung im Hochbau mit geodätischen Messverfahren	155

Session 4: QS Projekte und Ausblick

Gerald Fuxjäger Brückeninspektion: Datenerfassung, -prozessierung und -analyse – Ein moderner Ansatz in der Qualitätssicherung	177
Jens Hartmann Jan Hartmann Unsicherheiten beim TLS – Aspekte der Modellierung	187
Daniel Wujanz Frank Gielsdorf Jenseits der Glaskugel: Geodätische Qualitätssicherung in großen Laserscanningprojekten	205
Tobias Schröder Johannes Baumgartl Volker Schwieger Qualitätssicherungssystem zur automatisierten Spalt- und Übergangs- messung am Ende einer Produktionslinie	219

Vorwort

Erstmals seit der Covid-19-Pandemie wurde im Jahr 2022 das DVW-Seminar „Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren“ als Präsenzveranstaltung durchgeführt. Es war das 208. DVW-Seminar, welches am 2. und 3. Juni 2022 an der Berliner Hochschule für Technik stattgefunden hat. Alle Beiträge dieser Veranstaltung sind in diesem DVW-Seminarband publiziert.

Die behandelte Thematik wird bereits seit vielen Jahren vom DVW und VDV in Seminaren behandelt. Bereits im Jahre 2001 fand ein erstes DVW-Seminar zum Thema „Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik“ statt. In den Jahren 2009 und 2012 veranstaltete die Fachgruppe 2 „Messverfahren“ des VDV zwei Seminare zum Thema „Qualitätssicherung geodätischer Messsysteme im Messeinsatz“. Diese Thematik wurde auch in den DVW-Seminaren der Jahre 2010, 2013, 2016 und 2019 vom DVW-Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“ in partnerschaftlicher Kooperation durchgeführt. Diese Veranstaltungen sind als entsprechende Fortführung dieser Reihe zu verstehen.

Die umfangreiche Historie stellt die Bedeutung der Qualitätsthematik für die Geodäsie und Geoinformation heraus. Die Relevanz dieser geodätischen Teilbereiche nimmt aktuell weiter zu und die Modellierungen, Algorithmen und Aufgaben werden zunehmend komplexer. Mess- und Auswertesysteme verlangen eine zuverlässige Qualitätsmodellierung und -überprüfung, insbesondere wenn aktuelle Messtechniken wie automatisierte Überwachungsmessungen, terrestrisches Laserscanning, photogrammetrische UAV-Anwendungen sowie ganz allgemein Multi-Sensor-Systeme berücksichtigt werden. Dabei darf natürlich bewährtes Instrumentarium, wie Totalstationen und GNSS-Empfangssysteme, nicht vernachlässigt werden. Somit sind qualitative und quantitative Beschreibungen und Sicherungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Standards, Normen und die inzwischen gut eingeführten DVW-Merkblätter setzen Rahmenbedingungen insbesondere für Prüfungen, Kalibrierungen und damit auch für die Qualitätssicherung. Allen Autoren sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Ohne das rechtzeitige Verfassen der Beiträge hätte dieser Band nicht erscheinen können.

Berlin, Juni 2022

Li Zhang, Universität Stuttgart

Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover

Klaus Fritzensmeier, BILDUNGSWERK VDV

Werner Stempfhuber, BHT Berlin

Session 1: Einführung

Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren – das Handwerkszeug

Ingo Neumann | Hamza Alkhatib

Kurzfassung des Beitrages

Bei der Durchführung von Messaufgaben ist es notwendig, neben dem Ergebnis auch seine Qualität anzugeben. Speziell bei hochgenauen Anforderungen oder Kalibrierungen ist eine zuverlässige und zutreffende Quantifizierung zum Beispiel des Genauigkeitsmaßes gefordert. Benutzte der Ingenieur bislang vorrangig die empirische Standardabweichung als Genauigkeitsmaß seiner Messungen, so wird zunehmend, besonders in den messtechnischen Nachbardisziplinen, der Begriff Messunsicherheit verwendet. Das interdisziplinäre eingeführte Konzept zur Ermittlung von Messunsicherheiten soll im Rahmen des Beitrages zusammen mit anderen Grundlagen vorgestellt werden. Es bildet die prozessorientierte Qualitätssicherung der Mess- und Auswerteverfahren auch für die Geodäsie sehr gut ab. Wesentliche Begriffe sind in Abb. 1 dargestellt.

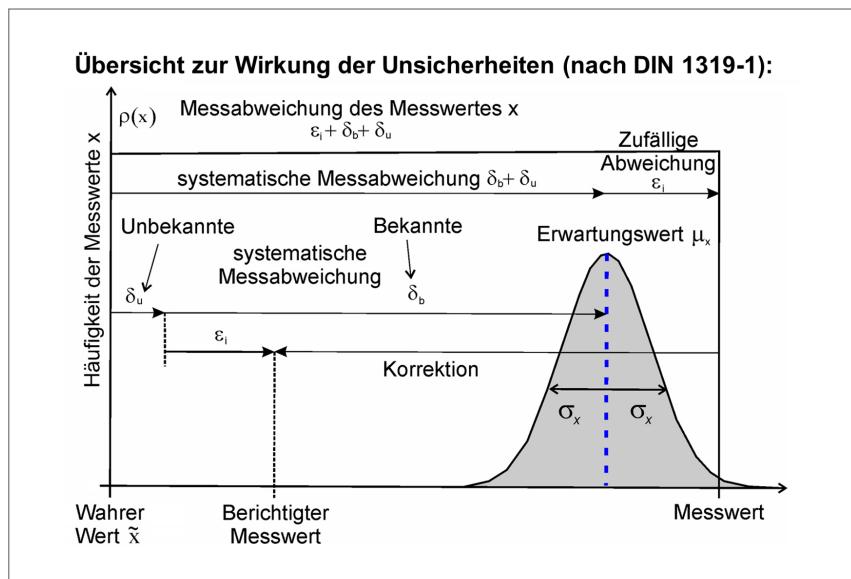


Abb. 1: Messunsicherheit und Charakteristiken von Messabweichungen nach DIN 1319-1

Die Problematik der Bestimmung der Messunsicherheit ist eng damit verbunden, dass die unvollständige Kenntnis des Wertes einer Messgröße heute nicht mehr ausschließlich daraus resultiert, dass bei einer Messung zufällig streuende Messwerte beobachtet werden. Wäre dies der Fall, dann lieferen uns die bekannten, statistisch begründeten Verfahren ausreichend zuverlässige Genauigkeitsmaße. Vielmehr treten zusätzliche Einflüsse auf, die bei der Ermittlung des Wertes der gewünschten Messgröße berücksichtigt werden müssen. Da solche Einflüsse oft unbekannt oder aber auch unzureichend modelliert werden können, tragen sie in einem nicht unerheblichen Maße zur Vergrößerung der Messunsicherheit bei. Wegen des Fehlens von statistischen Informationen über diese Einflüsse kann ihr quantitativer Beitrag mit Hilfe der konventionellen Statistik nicht erfasst werden. Die Kombination und einheitliche Behandlung der unterschiedlichen Beiträge zur Messunsicherheit – hervorgerufen durch zufällige und systematische Messabweichungen – ist somit vorrangiges Ziel in allen messtechnisch orientierten Fachrichtungen.

Wenn auch im Vermessungsalltag die Anforderungen an ein zuverlässiges und umfassendes Genauigkeitsmaß nicht immer von vorrangiger Bedeutung sind, so steigen sie doch mit der Komplexität und Größe eines Ingenieurprojektes. Besonders aber im Zusammenhang mit der Einführung eines modernen Qualitätsmanagementsystems (QMS) nach DIN EN ISO 9001, wo die Überprüfung und Spezifizierung der Messmittel gefordert wird, ist eine verantwortliche quantitative Genauigkeitsangabe des eingesetzten Instrumentariums unumgänglich. Zu ihrer Bestimmung sind möglichst allgemein definierte und akzeptierte Verfahren einzuhalten, die zu einem repräsentativen und umfassenden quantitativen Qualitätsmaß führen sollten.

Im Bereich der Geodäsie ist zur Angabe von Genauigkeiten ebenfalls ein Prozess des Umdenkens zu beobachten. Die Verbesserung der Sensorik einerseits und die Unüberschaubarkeit des Messprozesses andererseits haben auch bei geodätischen Instrumenten und Messverfahren das Verhältnis zufälliger und systematischer Einflüsse entscheidend verändert; letztere bestimmen heutzutage die Qualität des Messergebnisses wesentlich stärker als noch vor ca. zehn Jahren.

Mit dem GUM (JCGM 100 und 101, 2008) wurde erstmals ein international und interdisziplinär anerkannter Leitfaden erstellt, der es ermöglicht, diesen technischen Entwicklungen – auch in der Geodäsie – bei der Ermittlung und Angabe von Messunsicherheiten Rechnung zu tragen. Da dieser Leitfaden hierfür nur allgemeine Regeln bereitstellt, die sowohl auf verschiedenen Genauigkeitsniveaus als auch in der alltäglichen Messpraxis bis hin zur Grundlagenforschung Anwendung finden können, wird im Beitrag versucht, das grundlegende Gedankenmodell auf die geodätische Messtechnik zu übertragen und anschaulich darzustellen.

Literatur

- DIN 1319 (1995): Grundlagen der Messtechnik. DIN 1319, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin/Wien/Zürich.
- DIN 13005 (1999): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. DIN V ENV 13005, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin/Wien/Zürich.
- DIN 18709 (2008): Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen. DIN 18709, Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin/Wien/Zürich.
- DIN 55350 (1987): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin/Wien/Zürich.
- Hennes, M. (2007): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. AVN, 2007, Heft 4, 136146.
- Hennes, M., Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. AVN, 2007, Heft 11-12, 375383.
- JCGM 100 (2008): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology. www.iso.org/sites/JCGM/GUM-JCGM100.htm, letzter Zugriff 30.03.2022.
- JCGM 101 (2008): Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology. www.iso.org/sites/JCGM/GUM-introduction.htm, letzter Zugriff 30.03.2022.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann | PD Dr.-Ing. Hamza Alkhatib
Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de | alkhatib@gih.uni-hannover.de

Herausforderung Qualitätssicherung: Vertragliche Regeln, Absicherung, Gewährleistung

Martin Brück von Oertzen | Stefan Bischoff

Qualität und Qualitätssicherung werden im Alltag insbesondere in der Versorgungswirtschaft immer wichtiger, da Abläufe und Prozesse deutlich komplexer werden und die Fehlertoleranzen immer kleiner. Hierzu haben einerseits die fortschreitenden technologischen Entwicklungen im Bereich der IT und in der GIS-Technologie beigetragen. Andererseits spüren Unternehmen gerade auch in der Versorgungswirtschaft einen zunehmenden Kostendruck¹.

Qualitätssicherung kann dazu beitragen, mit komplexeren Prozessen zurechtzukommen und dadurch sowohl die Effizienz zu steigern als auch die Kosten zu senken².

Mit diesem Beitrag werden die Grundlagen und Begrifflichkeiten der Qualitätssicherung sowie rechtliche Fragestellungen durch eine juristische Betrachtungsweise aufgearbeitet.

1 Grundlagen und Begriffe

Für eine rechtliche Beurteilung, wie z. B. der Frage, ob gegen Qualitätsvorschriften verstoßen wurde, ein Haftungstatbestand besteht oder die Frage der Implementierung des Themas in Vertragswerke, ist zunächst der Qualitätsbegriff zu definieren und eine Abgrenzung zwischen der Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement vorzunehmen. Schließlich wird erläutert, was unter einem Qualitätsmanagementsystem zu verstehen ist, um rechtliche Anhaltspunkte für mögliche Haftungsfragen zu erlangen.

1 DVGW Merkblatt 130, S. 7

2 DVGW Merkblatt 130, S. 7

1.1 Definition „Qualität“

Qualität ist die Gesamtheit der charakteristischen Eigenschaften einer Sache oder einer Person. Mit Qualität ist also auch die Beschaffenheit eines Produkts oder einer Dienstleistung gemeint.³

Gemäß der DIN EN ISO 9000:2015 ist Qualität als der Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt, definiert.⁴ Ein inhärentes Merkmal wird dabei als eine kennzeichnende Eigenschaft verstanden.⁵ Ein Objekt kann eine Einheit, ein Gegenstand, etwas Wahrnehmbares oder Vorstellbares sein. Beispiele hierfür sind Produkte, Dienstleistungen, Prozesse oder Systeme.⁶ Dabei stellt die DIN EN ISO 9000:2015 nicht nur auf die Funktion und Leistung eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems ab. Entscheidend sind danach auch der Wert und der Nutzen für den Kunden.⁷

Das Regelwerk DVGW GW 130 definiert Qualität als der Grad, in dem eine Anzahl dem Produkt anhaftender Merkmale die vorab gestellten Anforderungen erfüllt.⁸ Somit bezieht sich auch die Definition des Merkblattes DVGW GW 130 auf die Bedeutung von Qualität als Gesamtheit von Eigenschaften. Zugleich macht die Definition den Qualitätsbegriff greifbar, denn anders formuliert ist nach dem Merkblatt Qualität eine bestimmte Mindestpunktzahl oder eine Anzahl abgehakter Kästchen.

Führt man diese Ansätze zusammen, kann Qualität als Grad definiert werden, der nach Erfüllung der zuvor gestellten Anforderungen an das Produkt, der Dienstleistung, dem Prozess oder dem System anhaftender Eigenschaften zu messen ist. Die Definition, ist für eine spätere rechtliche Beurteilung notwendig, um sich anhand dieser festgelegten Kriterien orientieren zu können.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass für besondere Themengebiete von den allgemeinen Definitionen abgewichen werden kann. So ist der Qualitätsbegriff in Bezug auf Geodaten bereits präzise definiert und insbesondere durch die DIN-Normen „DIN EN ISO 19115-1“ und „DIN EN ISO 19157“ näher beschrieben. Im Zuge der hier vorgenommenen Einordnung anhand der rechtlichen Rahmenbedingungen wird überwiegend auf die allgemeinen Regelungen abgestellt.

3 www.duden.de/rechtschreibung/Qualitaet

4 DIN EN ISO 9000:2015 3.6.2

5 DIN EN ISO 9000:2015 3.10.1

6 DIN EN ISO 9000:2015, 3.6.1

7 DIN EN ISO 9000:2015, S. 10

8 DVGW GW 130 Merkblatt, S. 9

1.2 Abgrenzung Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement

Anknüpfend an den Begriff der Qualität, der für sich genommen eine statische Größe ist, sind die Begriffe Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement voneinander abzugrenzen.

Dabei stehen Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement nicht losgelöst nebeneinander; Qualitätssicherung bildet vielmehr einen Bestandteil des Qualitätsmanagements.⁹

Unter Qualitätssicherung sind alle organisatorischen und technischen Maßnahmen zu verstehen, welche die Schaffung und Erhaltung einer bestimmten Qualität eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems sicherstellen.¹⁰ Es handelt sich um einen Sammelbegriff für unterschiedliche Ansätze und Maßnahmen, um festgelegte Qualitätsanforderungen zu erfüllen.¹¹

Ein Qualitätsmanagement soll sicherstellen, dass ein Produkt, eine Dienstleistung oder ein System die an sie gerichteten Qualitätsanforderungen erfüllt.¹² Demnach meint Qualitätsmanagement die systematische Planung und Steuerung von Prozessen im Zusammenhang mit der Qualität eines Produkts, einer Dienstleistung oder eines Systems. In diese Richtung zielt auch die Beschreibung in der DIN EN ISO 9000:2015. Darin wird Qualitätsmanagement als aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Führen und Steuern einer Organisation bezüglich Qualität beschrieben.¹³ Auch nach dem DVGW GW 130 Merkblatt sind mit Qualitätsmanagement organisatorische Maßnahmen gemeint, die zu einer Verbesserung von Produkten, Prozessen, Systemen oder Leistungen führen.¹⁴

1.3 Qualitätsmanagementsystem

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Qualitätsmanagementsysteme entwickelt. Zu den bekanntesten zählt das Qualitätsmanagementsystem nach DIN EN ISO 9000:2015.

Dieses kann sinnvollerweise nur in Verbindung mit der DIN EN ISO 9001:2015 angewandt werden. Denn die DIN EN ISO 9000:2015 selbst enthält lediglich die grundlegenden Konzepte sowie Begriffsbestimmungen¹⁵.

9 So übereinstimmend DIN EN ISO 9000:2015 3.3.6; DVGW GW 130 Merkblatt; wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/qualitaetssicherung-44396

10 <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/qualitaetssicherung-44396>

11 DVGW GW 130 Merkblatt, S. 9

12 DIN EN ISO 9000:2015 3.3.6; DVGW GW 130 Merkblatt, S. 9

13 DIN EN ISO 9000:2015, 3.3.3, 3.3.4

14 DVGW GW 130 Merkblatt, S. 9

15 DIN EN ISO 9000:2015 Inhaltsverzeichnis?

Der DIN e. V. zählt folglich die DIN EN ISO 9000:2015 und die DIN EN ISO 9001:2015 zusammen mit der DIN EN ISO 9004:2015 als die drei Kernnormen für ein Qualitätsmanagementsystem auf.¹⁶

Möchte sich ein Unternehmen nach den DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 zertifizieren lassen, muss eine Zertifizierungsgesellschaft ausgewählt werden. Mit dieser durchläuft das Unternehmen dann das Zertifizierungsverfahren. Die erworbene Zertifizierung besitzt eine Gültigkeit von drei Jahren.

Dabei ist zu bedenken, dass durch eine Zertifizierung nur das Qualitätsmanagementsystem geprüft wird. Ungeprüft bleibt hingegen die Qualität des Produktes, der Dienstleistung oder eines Prozesses selbst.¹⁷ Gleichwohl sollte sich das Qualitätsmanagementsystems positiv auf die Qualität des Produkts, der Dienstleistung oder einen Prozess auswirken. Denn letzteres ist gerade das Ziel, welches mit der Einführung eines Qualitätsmanagementsystems verfolgt wird.

2 Prävention und Vermeidung von Schäden

Haftung, sowohl vertragliche als auch deliktische, setzen eine Pflichtverletzung voraus. Insoweit ist für das Bestehen eines Gewährleistungsrechts ein konkreter Schaden nicht immer zwingend erforderlich. Das macht gerade ein Blick auf das Thema Qualität deutlich. Die Verletzung einer Pflicht in Bezug auf die Einhaltung von Qualitätsstandards führt zunächst zu einem Nacherfüllungsanspruch, also der Pflicht zur Nachbesserung der bisher erbrachten Leistungen. In der Regel spielt die Frage, ob die Qualitätsanforderungen eingehalten worden sind, jedoch vor allem dann eine Rolle, wenn es zu einem Schaden gekommen ist.

Qualität allein ist daher in rechtlicher Hinsicht immer die Frage, die am Ende einer juristischen Betrachtung steht und in der Regel nur im Zusammenhang mit einer negativen Abweichung, die zu Kosten und Streit führt.

Die Anwendung von Qualitätsmanagementsystemen soll genau diese Mechanismen verhindern und dazu dienen, Fehler zu vermeiden, um somit möglichen Schadensersatzansprüchen vorzubeugen. Insoweit geben die DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 Anhaltspunkte, wie entsprechend zu verfahren ist.

Grundlage ist, dass Unternehmen definierte Abläufe und Prozesse schaffen, um Fehler zu vermeiden und die Qualität von Produkten, Dienstleistungen oder Systemen bestenfalls sicherzustellen, noch besser zu steigern. Dafür sind

16 www.din.de/de/wdc-beuth:din21:235671064

17 PdK Niedersachsen Informationsverarbeitung im kommunalen Bereich Niedersachsens Darstellung 3.6 ISO 9000/Qualitätsmanagement/Zertifizierungen

zunächst die Qualitätspolitik und Qualitätsziele festzulegen. Darüber hinaus müssen klare Zuständigkeitsregeln geschaffen und das vorhandene Personal geschult werden. Schließlich ist das Qualitätsmanagement zu dokumentieren und fortzuentwickeln. Dies kann in der Regel durch interne Audits, Korrektur- und Vorsorgemaßnahmen sowie Qualitätsmanagementbewertungen erfolgen.¹⁸

Es handelt sich bei diesen Vorkehrungen um die Aspekte „Planen“ („plan“), „Durchführen“ („do“), „Prüfen“ („check“) sowie „Verbessern“ („act“). Diese verstehen sich als Zyklus, weshalb die Aspekte auch P-D-C-A-Zyklus genannt werden.¹⁹

2.1 Planung

Der erste Aspekt des P-D-C-A-Zyklus betrifft die Planung eines Qualitätsmanagementsystems.

Danach ist es notwendig, dass sich ein Unternehmen im Sinne des Kapitels „Kontext der Organisation“ zunächst mit seiner strategischen Ausrichtung und den Zielen eines Qualitätsmanagementsystems auseinandersetzt.²⁰ Sodann muss das Unternehmen die Kundenerwartungen sowie die gesetzlichen und behördlichen Vorgaben identifizieren und erfüllen.²¹ Schließlich ist anhand dieser Grundlagen ein Qualitätsmanagementsystem zu entwickeln. Hierzu wird zuerst der Anwendungsbereich des Qualitätsmanagementsystems festgelegt. Darauffolgend sind die Prozesse und deren Anwendung zu bestimmen, die für das Qualitätsmanagementsystem benötigt werden. Dafür sind beispielsweise die erforderlichen Ressourcen zu identifizieren und bereitzustellen; es sind Verantwortlichkeiten und Befugnisse zuzuweisen sowie bestimmte, festgelegte Informationen zu dokumentieren.²²

Weiterhin muss die Unternehmensführung Verantwortung für das Qualitätsmanagementsystem übernehmen und deren Implementierung und Anwendung fördern. Dabei soll die Unternehmensführung insbesondere den Fokus auf den Kunden richten, indem die Anforderungen des Kunden, die Chancen und Risiken von Produkten oder Dienstleistungen sowie die Kundenzufriedenheit im Blick behalten werden müssen.²³ Im Kern geht es also auch darum, dass die Unternehmensführung eine Qualitätspolitik festlegt, umsetzt, aufrechterhält

18 (PdK Niedersachsen Informationsverarbeitung im kommunalen Bereich Niedersachsens Darstellung 3.6 ISO 9000/Qualitätsmanagement/Zertifizierungen, beck-online

19 Broschüre des TÜV Süd zur ISO 9001, S. 7

20 DIN EN ISO 9001:2015 4.1, S. 18

21 DIN EN ISO 9001:2015 4.2, S. 18

22 DIN EN ISO 9001:2015 4.3, 4.4, S. 19 f.

23 DIN EN ISO 9001:2015 5.1.1, 5.1.2, S. 21 f.

und dementsprechend auch bekanntmacht.²⁴ Schließlich muss die Unternehmensführung den Mitarbeitenden innerhalb des Qualitätsmanagementsystems die Verantwortungsbereiche und Befugnisse zuweisen und deren Einhaltung überwachen.²⁵

Eine entscheidende Rolle kommt schließlich der genauen Planung zu. Hierzu zählen zunächst einmal Maßnahmen zum Umgang mit Chancen und Risiken des Qualitätsmanagements. Das Unternehmen soll sich die erwünschten und unerwünschten Auswirkungen des Systems bewusst machen.²⁶ Darüber hinaus sind für relevante Funktionen, Ebenen und Prozesse Qualitätsziele festzulegen. Sodann muss das Unternehmen die Erreichung dieser Qualitätsziele planen.²⁷ Zuletzt muss das Unternehmen entscheiden, wann Änderungen an dem Qualitätsmanagementsystem notwendig sind und wie sichergestellt wird, dass die Änderungen in der geplanten Art und Weise durchgeführt werden.²⁸

2.2 Durchführung

Hierfür wird auf der einen Seite im Sinne einer „Unterstützung“ verlangt, dass das Unternehmen die für das Qualitätsmanagementsystem erforderlichen Ressourcen bestimmt und bereitstellt. Gemeint sind sowohl personelle Ressourcen als auch die erforderliche Infrastruktur und Umgebung. Ebenfalls bereitstellen muss das Unternehmen Ressourcen zur Überwachung/Messung der Qualität von Produkten und Dienstleistungen. Außerdem ist das für die Durchführung der Prozesse erforderliche Wissen zu verwalten.²⁹ Des Weiteren muss das Unternehmen sicherstellen, dass das im Rahmen des Qualitätsmanagementsystems eingesetzte Personal zum einen hinreichend kompetent ist (erforderliche Ausbildungen, Schulungen oder Erfahrungen) und zum anderen sich der Ziele, Politik, Wirksamkeit und Folgen des Qualitätsmanagementsystems bewusst ist.³⁰ Ein weiterer Aspekt, der von dem Unternehmen zu beachten ist, ist die erforderliche Dokumentation von Informationen im Zusammenhang mit dem Qualitätsmanagementsystem.³¹ Festzulegen ist durch das Unternehmen schließlich, wer wann mit wem und wie in Bezug auf das Qualitätsmanagementsystem kommuniziert.³²

24 DIN EN ISO 9001:2015 5.2.1, 5.2.2, S. 22

25 DIN EN ISO 9001:2015 5.3, S. 23

26 DIN EN ISO 9001:2015 6.1.1, 6.1.2, S. 23 f.

27 DIN EN ISO 9001:2015 6.2.1, 6.2.2, S. 24 f.

28 DIN EN ISO 9001:2015 6.3, S. 25

29 DIN EN ISO 9001:2015 7.1.1 bis 7.1.6, S. 25 ff.

30 DIN EN ISO 9001:2015 7.2, 7.3, S. 29

31 DIN EN ISO 9001:2015 7. 5.1 bis 7.5.3, S. 230 f.

32 DIN EN ISO 9001:2015 7.4, S. 29 f.

Auf der anderen Seite verlangt der „Betrieb“ zunächst das Aufsetzen derjenigen Prozesse, um die an die Produkte oder Dienstleistungen gestellten Anforderungen zu erfüllen.³³ Hierzu sind zunächst die Anforderungen für Produkte oder Dienstleistungen zu bestimmen. Daraufhin müssen die Anforderungen regelmäßig auf ihre Einhaltung hin überprüft werden. Im Falle von Änderungen an den Produkten bzw. Dienstleistungen sind die dokumentierten Informationen anzupassen und die zuständigen Personen sind über die Änderungen zu informieren. Schließlich sind gegenüber dem Kunden zum einen Informationen über die Produkte und Dienstleistungen zur Verfügung zu stellen, zum anderen muss ein System zum Umgang mit Kundenanfragen, Rückmeldungen und für das Vertragsmanagement erstellt werden.³⁴ Im Rahmen der Entwicklung der Produkte bzw. Dienstleistungen sind diese zunächst unter Einbeziehung der verantwortlichen Personen und der Kunden zu planen. Des Weiteren muss das Unternehmen die Anforderungen an die Entwicklung bestimmen und entsprechende Steuerungsmaßnahmen schaffen. Zuletzt muss sichergestellt werden, dass die Entwicklungsergebnisse die an sie gestellten Anforderungen erfüllen und dass aus Änderungen der Entwicklung keine Nachteile resultieren.³⁵ Das Unternehmen muss ebenfalls sicherstellen, dass externe Prozesse, Produkte und Dienstleistungen den Anforderungen entsprechen. Es sind Kriterien für die Bewertung und Auswahl externer Unternehmen festzulegen und anzuwenden.

Durch externe Leistungserbringer darf die Qualität der eigenen Produkte und Dienstleistungen nicht nachteilig beeinflusst werden. Hierzu sind dem externen Unternehmen die eigenen Anforderungen mitzuteilen.³⁶ Befindet sich Eigentum von Kunden oder externen Anbietern unter der Aufsicht des Unternehmens, hat es mit dem fremden Eigentum sorgfältig umzugehen. Nach Lieferung bzw. Erbringung hat das Unternehmen bei weiteren Tätigkeiten (z. B. Gewährleistung, Instandhaltung, Entsorgung) die an sich gestellten Anforderungen zu erfüllen. Zudem sind Änderungen im Rahmen der Produktion oder Dienstleistungserbringung zu dokumentieren und zu überwachen.³⁷ Eine Freigabe der Produkte bzw. Dienstleistungen darf erst erfolgen, wenn die Anforderungen an die Produkte bzw. Dienstleistungen zufriedenstellend umgesetzt wurden.³⁸ Ergebnisse, die nicht den Anforderungen entsprechen, sind zu kennzeichnen und anschließend entweder zu korrigieren, auszusondern oder nur mit einer Sonderfreigabe

³³ DIN EN ISO 9001:2015 8.1, S. 31 f.

³⁴ DIN EN ISO 9001:2015 8.2.1 bis 8.2.4, S. 32 ff.

³⁵ DIN EN ISO 9001:2015 8.3.1. bis 8.3.6, S. 34 ff.

³⁶ DIN EN ISO 9001:2015 8.4.1 bis 8.4.3, S 38 f.

³⁷ DIN EN ISO 9001:2015 8.5.3 bis 8.5.6, S. 41 f.

³⁸ DIN EN ISO 9001:2015 8.6, S. 42 f.

des Kunden auszuliefern. In jedem Fall ist der Kunde zu benachrichtigen und die Nichtkonformität zu dokumentieren.³⁹

2.3 Prüfung

Der weitere Aspekt des „Prüfens“ befasst sich unter anderem mit der Überwachung, Messung, Analyse und Bewertung des Qualitätsmanagementsystems. Hierbei ist auch die Kundenzufriedenheit zu berücksichtigen.⁴⁰ Darüber hinaus muss das Unternehmen in regelmäßigen, geplanten Abständen interne Audits durchführen, um zu überprüfen, ob das Qualitätsmanagementsystem die Anforderungen erfüllt. Die Ergebnisse der Audits sind zu dokumentieren.⁴¹ Schließlich bewertet auch die Unternehmensführung in regelmäßigen, geplanten Abständen das Qualitätsmanagementsystem.⁴²

2.4 Verbesserung

Der vierte und letzte Aspekt betrifft die „Verbesserung“ des Qualitätsmanagementsystems. In diesem Zusammenhang muss das Unternehmen die notwendigen Maßnahmen einleiten, damit Produkte bzw. Dienstleistungen derart verbessert werden, dass sie die Anforderungen der Kunden erfüllen und die Kundenzufriedenheit sicherstellen. Darüber hinaus sind Chancen zur Verbesserung des Qualitätsmanagementsystems zu identifizieren und zu nutzen.⁴³ Auf Reklamationen muss das Unternehmen reagieren und Maßnahmen einleiten, um die Ursache zu beseitigen, aufgrund derer die Produkte/Dienstleistungen nicht den Anforderungen entsprechen. Dies ist durch das Unternehmen zu dokumentieren.⁴⁴ Schließlich hat das Unternehmen die Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit des Qualitätsmanagementsystems fortlaufend zu verbessern.⁴⁵

39 DIN EN ISO 9001:2015 8.7, S. 43

40 DIN EN ISO 9001:2015 9.1.1 bis 9.1.3, S. 44 f.

41 DIN EN ISO 9001:2015 9.2.1, 9.2.2, S. 45 f.

42 DIN EN ISO 9001:2015 9.3.1 bis 9.3.3, S. 46 f.

43 DIN EN ISO 9001:2015 10.1, S. 47 f.

44 DIN EN ISO 9001:2015 10.2.1, 10.2.2, S. 48 f.

45 DIN EN ISO 9001:2015 10.3, S. 49

3 Rechtliche Integration von Qualitätssicherung

Qualitätssicherung spielt in rechtlicher Hinsicht an verschiedenen Stellen eine bedeutsame Rolle. Sie kann bereits in Normen oder Regeln definiert sein oder wird zwischen den Parteien individuell vereinbart.

Vertragspartner können Aspekte der Qualitätssicherung als Qualitätssicherungsvereinbarung regeln oder in ihre bestehenden Verträge Regelungen zur Qualitätssicherung implementieren. Von erheblicher praktischer Bedeutung ist dabei insbesondere die Frage, inwieweit die getroffenen Qualitätsvereinbarungen in einem frühzeitigen Stadium, also vor der finalen Leistungserbringung, ordnungsgemäß kontrolliert werden können.

Ferner sind die anerkannten Regeln der Technik zur Qualitätssicherung insbesondere im Rahmen des Verschuldensmaßstabes zu berücksichtigen, wenn es beispielsweise im Rahmen der Haftungsfragen auf die Beachtung von Qualitätssicherungsaspekten ankommt. Schließlich sollen einige weitere rechtliche Konstellationen angesprochen werden, in denen Qualitätssicherung rechtlich von Bedeutung ist.

3.1 Qualitätsmanagementnormen

Welche rechtliche Wirkung von Qualitätsmanagementnormen, insbesondere von DIN EN ISO 9000:2015, ausgehen, bestimmt ihre Rechtsnatur.

Es handelt sich bei diesen Normen nicht um gesetzliche Regelungen oder Verordnungen, nach denen ein Betroffener unmittelbar verpflichtet ist. Vielmehr handelt es sich bei den DIN-Normen um freiwillige Marktregeln, deren Anwendung zunächst jedem freisteht.⁴⁶ Solange sie nicht zum Inhalt von individuellen Verträgen werden, sind sie nicht bindend. Eine Ausnahme ergibt sich, wenn der Gesetzgeber ihre Einhaltung zwingend vorschreibt oder sie zum Beispiel in ein Gesetz integriert. Aus sich heraus besitzen sie aber keine rechtliche Verbindlichkeit. Allerdings können DIN-Normen, „quasi durch die Hintertür“, rechtlich wieder relevant werden: Wer DIN-Normen – als anerkannte Regeln der Technik – anwendet, kann ein ordnungsgemäßes Verhalten, zum Beispiel in einem Haftungsprozess, einfacher nachweisen.⁴⁷

Dem Gesetzgeber steht es somit frei, die Qualitätsmanagementnormen in Gesetze oder Verordnungen zu normieren. Dann bestünde im Anwendungsbereich

⁴⁶ Wirwohl: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche, DS 2020, 306

⁴⁷ Vgl. Wirwohl: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche, DS 2020, 306

eines solchen Gesetzes eine Verpflichtung, die Normen zu befolgen.⁴⁸ Beispielsweise bestimmt § 49 Abs. 1 S. 1 VgV, dass wenn der öffentliche Auftraggeber als Beleg dafür verlangt, dass der Bietende bestimmte Qualitätsstandards erfüllt, die Vorlage von einschlägigen europäischen Normen genügen. Mit einschlägigen europäischen Normen sind hierbei in erster Linie die DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 gemeint.⁴⁹

Rechtliche Verbindlichkeit können die Normen des Qualitätsmanagements – wie bereits erwähnt – darüber hinaus durch die Einbeziehung in Verträge erlangen.⁵⁰ Qualitätsmanagementnormen, wie z. B. die DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 oder das Merkblatt DVGW GW 130, können auch bei der Auslegung von Gesetzen und Verordnungen oder Verträgen sowie als anerkannte Regeln der Technik im Rahmen der Haftung und Gewährleistung angewendet werden.⁵¹

3.2 Qualitätssicherungsvereinbarungen

Spielt nicht nur die Qualität im Rahmen eines einmaligen Liefergeschäftes eine Rolle, sondern sind die Vertragsparteien einander auf lange Zeit oder mit Auswirkungen ihres Geschäfts auf einen längeren Zeitraum verbunden, so sind vertragliche Regelungen zur Qualitätssicherung bzw. zum Qualitätsmanagement angeraten. Dabei können die Parteien im Rahmen ihres originären Vertragsverhältnisses (z. B. Kauf-, Dienst- oder Werkvertrag) Regelungen zur Qualitätssicherung aufnehmen. Die Parteien können aber auch in einem gesonderten Vertragwerk – auch schon vor Abschluss des originären Vertrages – Vereinbarungen über die Qualitätssicherung schließen. Solche Vereinbarungen werden Qualitätssicherungsvereinbarungen (QSV) genannt. Des Weiteren ist es möglich, Qualitätsvereinbarungen in Allgemeinen Geschäftsbedingungen abzubilden.⁵²

48 Wirwohl: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche, DS 2020, 306

49 Beck VergabeR/Mager, 3. Aufl. 2019, VgV § 49 Rn. 9

50 Wirwohl: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche, DS 2020, 306, DVGW GW 100 Geschäftsordnung, S. 2

51 Wirwohl: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche, DS 2020, 306, DVGW GW 100 Geschäftsordnung, S. 2

52 Schmidt: Qualitätssicherungsvereinbarungen und ihr rechtlicher Rahmen, NJW 1991, 144

3.2.1 Vertragliche Vereinbarung Neuvertrag

Qualitätssicherungsvereinbarungen zeichnen sich dadurch aus, dass sich eine Partei gegenüber der anderen Partei oder beiden Parteien dazu verpflichten, jeweils bestimmte Abläufe, Prozesse und Systeme festzulegen und umzusetzen.⁵³ Dies können beispielsweise die in der DIN EN ISO 9001:2015 genannten Schritte „Planen“, „Durchführen“, „Prüfen“ und „Verbessern“ und deren Nachweis sein. Eine unmittelbare Gegenleistung erhält die Partei für die Einhaltung der Qualitätssicherungsmaßnahmen nicht. Sie erweist sich allenfalls als würdige Vertragspartnerin, ohne dass sie einen Anspruch auf den Abschluss eines Austauschvertrages, etwa eines Kauf-, Dienst- oder Werkvertrages hätte.⁵⁴ Damit entsprechen Qualitätssicherungsvereinbarungen nicht den klassischen Vertragstypen, wie sie im BGB geregelt sind. Qualitätssicherungsvereinbarungen stellen vielmehr einen Vertrag besonderer Art dar. Sofern ein solcher eigenständiger Vertrag vorliegt, handelt es sich um Hauptleistungspflichten des Leistungserbringers.

Werden durch Qualitätssicherungsvereinbarungen die kauf- oder werkvertraglichen Regelungen des Auftrags nur um Bestimmungen über Produktqualität und -sicherheit ergänzt und werden dementsprechende Regelungen für die Haftung festgelegt, handelt es sich um Nebenpflichten des Leistungserbringers. Damit sind sie das technisch und haftungsmäßig orientierte Pendant zu kaufmännisch orientierten Einkaufsbedingungen.⁵⁵

Die Einordnung, ob es sich um eine Hauptleistung- oder Nebenpflicht handelt, kann rechtliche Auswirkungen haben. Handelt es sich nur um eine Nebenpflicht und wird gegen diese verstößen, so wird ein Rücktritt im Sinne des § 346 BGB vom Vertrag schwieriger möglich sein, als wenn es sich um die Hauptleistungspflicht handelt.

Inhaltlich kann in Qualitätssicherungsvereinbarungen Bezug auf bestimmte DIN-Normen, wie z.B. die Qualitätsmanagementnormen DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015, genommen werden. Denkbar ist auch, dass Regelungen der Normen in den Vertrag übernommen werden.

Qualitätssicherungsvereinbarungen regeln insbesondere die Beschaffenheit bzw. die zugesicherten Eigenschaften von Sachen. Darüber hinaus modifizieren sie die kaufmännischen Untersuchungs- und Rügeobliegenheiten gemäß § 387 HGB. Schließlich können sich aus Qualitätssicherungen Folgen für die Produkthaftung nach dem ProdHaftG ergeben.

53 PHI 5/2012, S. 185

54 PHI 5/2012, S. 185

55 Schmidt: Qualitätssicherungsvereinbarungen und ihr rechtlicher Rahmen, NJW 1991, 144

Auch in ökonomischer Hinsicht können solche Vereinbarungen sinnvoll sein, wenn sie auf der Ebene des Preises mit Bonus- bzw. Malusregelungen verknüpft werden. Hier können dann beide Vertragsseiten profitieren.

3.2.2 Allgemeine Geschäftsbedingungen

Die Qualitätssicherungsvereinbarungen können auch als Bestandteil von Allgemeinen Geschäftsbedingungen i.S.d. § 305 BGB rechtlich Wirkung entfalten. Ob für Qualitätssicherungsvereinbarungen die Regeln für den Individualvertrag oder für Allgemeine Geschäftsbedingungen gelten, hat entscheidende Konsequenzen: Als Individualvertrag unterliegt eine Qualitätssicherungsvereinbarung nur ausnahmsweise gem. §§ 138, 242 BGB der Inhaltskontrolle; als allgemeine Geschäftsbedingung muss sich diese in jedem Fall gemäß dem Maßstab der §§ 307 ff. BGB darauf prüfen lassen, ob sie entgegen den Geboten von Treu und Glauben unangemessen benachteiligt.⁵⁶

Ob eine Allgemeine Geschäftsbedingung oder eine individualvertragliche Regelung besteht, ist anhand der jeweiligen Regelung auszulegen. Allgemeine Geschäftsbedingungen sind nach § 305 Abs. 1 BGB alle für eine Vielzahl von Verträgen vorformulierten Vertragsbedingungen, die eine Vertragspartei (Verwender) der anderen Vertragspartei bei Abschluss eines Vertrags stellt. Gleichgültig ist, ob die Bestimmungen einen äußerlich gesonderten Bestandteil des Vertrags bilden oder in die Vertragsurkunde selbst aufgenommen werden, welchen Umfang sie haben, in welcher Schriftart sie verfasst sind und welche Form der Vertrag hat.

Allgemeine Geschäftsbedingungen liegen hingegen nicht vor, soweit die Vertragsbedingungen zwischen den Vertragsparteien im Einzelnen ausgehandelt sind.

Da gerade qualitätsbewusste Unternehmen die Anforderungen an Qualität und Sicherheit nicht nur punktuell, sondern generell regeln wollen, kann es durchaus von Bedeutung sein, die Qualitätssicherungsvereinbarung als Allgemeine Geschäftsbedingung festzusetzen. So kann ein allgemeiner Mindeststandard erreicht werden. Eine punktuelle Verschärfung bleibt daneben weiterhin im Rahmen der individuellen Ausgestaltung mit dem Vertragspartner möglich.

3.2.3 Beschaffenheits- und Garantievereinbarungen

Im Rahmen von Qualitätssicherungsvereinbarungen können auch Beschaffungsvereinbarungen wie z.B. im Sinne der §§ 434 Abs. 1 BGB oder Garantievereinbarungen im Sinne des § 443 BGB geschlossen werden. Diese erweitern das

56 Schmidt: Qualitätssicherungsvereinbarungen und ihr rechtlicher Rahmen, NJW 1991, 144

Pflichtenprogramm des Beschaffungs- bzw. Garantiegebers in Bezug auf die Eigenschaften von Produkten.

Beschaffungsvereinbarungen legen einen von der Verkehrsauffassung unabhängigen Qualitätsmaßstab für Sachen fest. Der Begriff der Beschaffenheit umfasst dabei alle Faktoren, die einer Sache selbst anhaften.⁵⁷ Insofern können die Parteien einer Qualitätssicherungsvereinbarung einen umfangreichen Katalog von Eigenschaften aufstellen, die die Leistung einer Partei erfüllen muss. Fehlt es der Leistung hinterher an der vereinbarten Beschaffenheit, ist es mangelhaft (§§ 434 Abs. 1 S. 1, 633 Abs. 2 S. 1 BGB). In der Folge stehen dem Käufer bzw. dem Besteller die gesetzlichen Gewährleistungsrechte, insbesondere Nacherfüllung- und ggf. Schadensersatzansprüche zu.

Einem strengeren Maßstab als Beschaffungsvereinbarungen unterliegen Garantievereinbarungen im Sinne des § 443 BGB. Enthält eine Qualitätssicherungsvereinbarung eine Garantievereinbarung haftet der Garantiegeber verschuldensunabhängig für das Vorhandensein der vereinbarten Eigenschaften.⁵⁸ Dies wirkt sich besonders auf die Schadensersatzpflicht (§ 280 Abs. 1 BGB) aus, welche grundsätzlich ein Vertreten müssen der Pflichtverletzung – in der Regel Vorsatz oder Fahrlässigkeit im Sinne des § 276 BGB – voraussetzt. Im Falle eines Verstoßes gegen eine Garantievereinbarung muss der Garantiegeber verschuldensunabhängig die entstandenen Schäden ersetzen, so dass dieser auch dann haftet, wenn er die Pflichtverletzung nicht einmal fahrlässig verursacht hat. Darüber hinaus kann sich der Garantiegeber im Falle einer fehlenden Eigenschaft im Rahmen der Garantievereinbarung nicht auf einen vereinbarten Haftungsausschluss berufen, § 444 BGB.

3.2.4 Modifikation der kaufmännischen Untersuchungs- und Rügeobliegenheit

Mittels Qualitätssicherungsvereinbarungen können die aus § 377 HGB folgenden Untersuchungs- und Rügeobliegenheiten des Käufers modifiziert werden.⁵⁹

Schließen zwei Kaufleute einen Kaufvertrag, so ist der Käufer grundsätzlich gemäß § 377 Abs. 1 HGB gehalten, nach Ablieferung der Ware, diese auf Mängel hin zu überprüfen. Stellt er dabei Mängel fest, muss er diese unverzüglich gegenüber dem Verkäufer anzeigen. Untersucht der Käufer die Ware nicht oder zeigt er einen erkannten Mangel nicht an, gilt die Ware als genehmigt und der Käufer kann aufgrund des Mangels in der Regel keine Gewährleistungsrechte mehr geltend machen, § 377 Abs. 3 HGB.

57 BGH NJW 16, 2874; Palandt/Weidenkaff, 2021 BGB § 434 Rn. 10

58 IWRZ 2017, 119 (121)

59 PHI 5/2012, S. 185

Im Rahmen von Qualitätssicherungsvereinbarungen wird regelmäßig auf die Untersuchungs- und Rügeobliegenheit aus § 377 HGB verzichtet.⁶⁰ Die Untersuchungs- und Rügeobliegenheit nach § 377, 378 HGB ist grundsätzlich abdingbar. Im Zusammenhang mit Qualitätssicherungsvereinbarungen kann dies grundsätzlich auch in allgemeine Geschäftsbedingungen vereinbart werden.⁶¹

Hintergrund des Verzichts ist zum einen, dass sich der Käufer die Kosten und Zeit für eine Wareneingangskontrolle sparen möchte. Zum anderen vertraut er aufgrund der Qualitätssicherungsvereinbarung gerade darauf, dass ihm keine mangelhafte Ware geliefert wird.⁶² Ergänzend kann vereinbart werden, dass der Verkäufer vor Auslieferung der Ware zu einer Qualitätskontrolle verpflichtet ist. Die Parameter dieser Qualitätskontrolle können wiederum in der Qualitätssicherungsvereinbarung bestimmt werden.⁶³

3.2.5 Produkthaftung

Schließlich betreffen Qualitätssicherungsvereinbarungen auch die Produkthaftung. Im Rahmen des Produkthaftungsgesetzes haftet der Hersteller unmittelbar für Körper-, Gesundheits- oder Sachschäden infolge eines fehlerhaften Produktes. Dabei besteht die Produkthaftung unabhängig davon, ob den Produzenten ein Verschulden an dem Fehler trifft (Gefährdungshaftung). Der Produzent kann sich jedoch entlasten, wenn er nachweist, dass der Fehler nach dem Stand der Wissenschaft und Technik in dem Zeitpunkt, in dem der Hersteller das Produkt in den Verkehr brachte, nicht erkannt werden konnte, § 1 Abs. 2 Nr. 5, Abs. 4 ProdHaftG.

Bereits um dieser Nachweispflicht zu genügen, bietet sich eine Qualitätssicherungsvereinbarung an. Hierbei eignen sich besonders Verweise auf die Qualitätsmanagementnormen DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015.⁶⁴

Darüber hinaus ist der Abschluss einer Qualitätssicherungsvereinbarung vor dem Hintergrund der Produkthaftung auch insofern vorteilhaft, als nach § 5 ProdHaftG die interne Haftung von Gesamtschuldern von dem Verursachungsbeitrag abhängt. Die Qualitätssicherungsvereinbarung hilft auch hier, die erforderlichen Nachweise zu führen.⁶⁵

60 PHI 5/2012, S. 188; IWRZ 2017, 119 (123)

61 Baumbach/Hopt/Leyens, 40. Aufl. 2021, HGB § 377 Rn. 59

62 PHI 5/2012, S. 188

63 IWRZ 2017, 119 (123)

64 BB 1991 Heft 7, 428, beck-online

65 BB 1991 Heft 7, 428, beck-online

3.3 Einbeziehung von Qualitätsmanagement in bestehende Verträge

Qualitätssicherung lässt sich nicht nur in eigens darauf ausgerichteten Qualitätssicherungsvereinbarungen rechtlich verbindlich festlegen. Vielmehr kann sie auch als Nebenpflicht in (bestehende) Verträge aufgenommen werden. So können z.B. die Normen der DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 zum Vertragsbestandteil gemacht werden. Es kann dabei auch nur auf einzelne Regelungen der Normen zurückgegriffen werden, etwa auf die Begriffsbestimmungen im dritten Kapitel der DIN EN ISO 9000:2015.

Werden Elemente des Qualitätsmanagements oder unmittelbar Qualitätsmanagementnormen in Verträge eingebunden, so ist im Falle der formularmäßigen Verwendung die AGB-rechtliche Zulässigkeit zu berücksichtigen (vgl. oben). Wie bei Qualitätssicherungsvereinbarungen gilt, dass Klauseln weder überraschend (§ 305c BGB) sein dürfen, noch den Vertragspartner unangemessen benachteiligen (§ 307 Abs. 1 BGB) dürfen. Dies gilt selbst dann, wenn Regelungen exakt aus den Normen DIN EN ISO 9000:2015 oder DIN EN ISO 9001:2015 übernommen werden.⁶⁶

3.4 Rechtliche Kontrollmöglichkeiten

In der Geodäsie spielen die Qualitätssicherungsvereinbarungen eine erhebliche Rolle, da z.B. Vermessungsfehler zu weitreichenden Konsequenzen führen können. Insoweit ist es von erheblicher Bedeutung, dass der Vermessungsprozess insoweit optimiert ist, dass es zu keinem Fehler kommt, da andernfalls Bauvorhaben gestoppt werden müssen oder die Folgearbeiten allein mangelhaft durchgeführt werden können.

Die mit fehlerhaften Daten verbundenen materiellen Schäden sind u.a. durch Mehraufwand, Wertverlust, Umsatzverlust und Regress- oder Haftungsansprüche charakterisiert. Damit verbunden sind auch nicht direkt ermittelbare, wirtschaftliche Nachteile für den Hersteller von Produkten bzw. den Anbieter von Dienstleistungen durch den Imageverlust. Die Vernachlässigung oder Nichteinhaltung von Qualitätsrichtlinien oder -vorgaben erhebliche ökonomische Schäden hervorrufen. Im Zusammenhang mit der Nutzung von Geodaten haben insbesondere Aspekte der Sicherheit und der daraus resultierenden Risiken für Leib und Leben sowie für die Umwelt das größte Gewicht bei der Einschätzung und Festlegung der Qualitätsanforderungen. Die Mängel der Daten verursachen

66 DS 2020, 306 (307)

ebenso folgenreich Mehraufwand, Verzögerungen, Defizite in der Aktualität oder eine geringere Belastbarkeit der Daten für andere Anwendungen.⁶⁷

Darüber hinaus ist bei fehlerhaften Daten die Herstellung des rechtmäßigen Zustands in der Regel schwierig, da häufig eine Folgeleistung unmittelbar erfolgt. Bei Leitungstrassen wird dieser beispielsweise aus wirtschaftlichen Gründen sehr häufig direkt nach der Vermessung verfüllt. Entsprechend liegt ein einmaliges Aufmaß vor. Daher muss sich die Kontrolle direkt durch die Messanordnung bzw. durch das Messverfahren ergeben. In der Praxis kann dies ein Abgleich zu vorher erfassten Leitungen, ein Abgleich mit der Regelverlegung oder Leitungsvorgaben für den Leitungsbau etc. sein. Alternativ oder ergänzend kommen Wiederholungen der Messung oder Verdichtung der Messung hinzu.

Die Wirksamkeit aller Qualitätssicherungsmaßnahmen hängt von einer effektiven Kontrolle ab; eine entsprechende Qualitätsbeurteilung kann in verschiedenen Zusammenhängen und durch verschiedene Stellen, in verschiedenen Verfahren und unter unterschiedlichen Bezeichnungen stattfinden, je nachdem, ob es sich um interne Überprüfung durch die Leistungserbringer selbst in deren Arbeitsumfeld oder externe Kontrolle handelt.⁶⁸

Die Ergebnisse der Geodäsie haben somit nicht nur Einfluss auf die eigene Leistung, sondern auch auf die Folgeleistungen. Aus diesem Grunde ist es für den Auftraggeber erforderlich, dass die Qualitätssicherungsmaßnahmen nicht nur vereinbart werden, sondern auch hinreichend kontrollierbar sind. Hierfür bestehen verschiedene Instrumentarien. Insoweit können die Vertragspartner aufgrund des Grundsatzes der Vertragsfreiheit frei über mögliche Kontrollrechte disponieren und vertraglich festlegen (s. o.).

Zunächst ist es möglich, für die Einhaltung der Qualitätsanforderungen auf die Vorlage von DIN-Normen zurückzugreifen, die von einer Zertifizierungsstelle begutachtet worden sind. Wenn das beauftragte Unternehmen eine solche Zertifizierung vorweisen kann, kann davon ausgegangen werden, dass nach diesen Qualitätsgrundsätzen vorgegangen wird. Eine gesonderte Kontrolle durch den Auftraggeber ist dann nicht zwingend erforderlich.

Gleiches gilt, wenn interne Kontrollen nebst Berichtspflicht vorausgesetzt werden. Dem Leistungserbringer wird somit die Verpflichtung aufgetragen, die Qualität der eigenen Arbeit zu beurteilen und so mögliche Leistungsdefizite zu erkennen und zu korrigieren bzw. nötigenfalls abzustellen. Des Weiteren wird durch die Berichtspflicht auch Dritten die Möglichkeit eingeräumt, die Leistungsqualität einzuschätzen. Der Bedarf an akkreditierten Prüfeinrichtungen ist dabei klar erkennbar. Betriebliche Bestätigungsmodelle für die eingesetzten

67 Stürmer: Qualitätsgesicherter Aufbau digitaler Netzdokumentation, S. 54

68 Schnapp/Wigge: Vertragsarztrecht, § 19 Qualitätssicherung in der vertragsärztlichen Versorgung Rn. 79, 80

Messmittel sind für die verschiedenen in der Geodäsie tätigen Gruppen in Zukunft unausweichlich, insbesondere wenn es um Haftungsfragen von Schäden geht, die infolge unzureichend überprüfter Instrumente entstanden sind.

Schließlich stellt die Überwachung des Leistungserbringers durch den Auftraggeber eine weitere Möglichkeit zur Einhaltung der Qualitätsanforderungen dar. Dies kann durch Audits und entsprechende Verpflichtungen zur Dokumentation und deren Weitergabe erfolgen. Schlussendlich sind die Vertragspartner hier frei, inwieweit diese die Kontrollmöglichkeiten definieren, festlegen und durchführen.

In Bezug auf diese weitgehenden Kontrollen kann es auch zur Verarbeitung und Übermittlung personenbezogener Daten kommen, die dem Datenschutzrecht unterliegen. Diesbezüglich kann es notwendig sein, entsprechende Vorehrungen im Sinne der DSGVO und mit dem Vertragspartner zu treffen. Dies betrifft insbesondere die Verpflichtung, die gegenseitige Verpflichtung, die datenschutzrechtlichen relevanten Vorschriften einzuhalten. Gegebenenfalls ist eine Einwilligung im Sinne des Art. 7 DSGVO zur Erhebung und Verarbeitung der personenbezogenen Daten nötig.

Werden Fehler oder die Nichteinhaltung der Qualitätsstandards im Rahmen des Auftragsverhältnisses deutlich, so kann der Auftraggeber grundsätzlich die Verbesserung und Einhaltung im Sinne einer Nacherfüllung verlangen. Hierfür ist es notwendig, dem Leistungserbringer auf die Nichteinhaltung hinzuweisen und eine entsprechende Frist zur Erfüllung der vertraglich geschuldeten Leistung zu setzen. Neben dem Ziel Nachbesserung durch den Leistungserbringer ist die Fristsetzung notwendig, um seinen Anspruch im Falle der weiterhin fehlenden Umsetzung gerichtlich weiter verfolgen zu können.

3.5 Haftung im Hinblick auf „Anerkannte Regeln der Technik“

Berücksichtigung finden die Qualitätssicherung und insbesondere die Qualitätsmanagementnormen DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 auch hinsichtlich der Einstufung als anerkannte Regeln der Technik, die für eine mögliche Haftung eine zentrale Rolle spielen.

Anerkannte Regeln der Technik sind in erster Linie Anleitungen für handwerkliche oder industrielle Verfahrensweisen für Produkte, Maschinen oder Bauwerke.⁶⁹ Welche Regeln als anerkannte Regeln der Technik gelten, lässt sich der Rechtsprechung entnehmen. Diese definiert eine Regel als technisch anerkannt, wenn sie in der technischen Wissenschaft als theoretisch richtig anerkannt ist, feststeht sowie durchweg bekannt und aufgrund der praktischen

⁶⁹ VersR 1992, 665

Erfahrung als technisch geeignet, angemessen und notwendig anerkannt ist.⁷⁰ Ausgehend von dieser Definition ergeben sich anerkannte Regeln der Technik häufig aus der VOB/C sowie den DIN-Normen und ihren europäischen (EN) oder internationalen (ISO) Pendanten.⁷¹ Insofern stellen beispielsweise auch die Qualitätsmanagementnormen DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 anerkannte Regeln der Technik dar.

In rechtlicher Hinsicht sind die anerkannten Regeln der Technik für Fragen der Haftung und Gewährleistung von Bedeutung. Konkret helfen sie bei der Beantwortung der Frage, ob der Leistungspflichtige die im Verkehr erforderliche Sorgfalt eingehalten hat. Dies gilt jedoch nur, soweit die anerkannten Regeln der Technik vollständig sind und sich nicht aus den Umständen des Einzelfalles etwas Gegenläufiges ergibt.⁷² Für die Normen der DIN EN ISO 9000:2015 und DIN EN ISO 9001:2015 muss in Frage gestellt werden, ob sie vollständige technische Regelungen enthalten. Denn die Normen regeln ausschließlich die Abläufe und Prozesse von Qualitätsmanagement ohne inhaltliche Vorgaben an die Qualität von Produkten bzw. Dienstleistungen zu stellen. Anders stellt sich die Situation z. B. im Rahmen des Merkblatts DVGW GW 130 dar, da dieses an die Netzdokumentation konkrete Anforderungen stellt. Diese Anforderungen – die Merkmale Vollständigkeit, Richtigkeit, Genauigkeit, Konsistenz und Aktualität der Netzdokumentation⁷³ – sind dann als Grundlage für die Einhaltung der im Verkehr erforderlichen Sorgfalt anzusehen. Insofern sind die Normen jeweils gesondert zu betrachten, ob entsprechende Rückschlüsse für die Haftungsstatbestände gezogen werden können.

Selbst wenn die Normen keine vollständige Regelung zum Qualitätsmanagement beinhalten, da sie beispielsweise nur die Prozesse und Abläufe beschreiben, können sie dennoch als ein Teilaspekt für die Bestimmung der im Verkehr erforderlichen Sorgfalt herangezogen werden.⁷⁴

4 Zusammenfassung

Die Qualitätssicherung spielt unter dem Blickwinkel der rechtlichen Rahmenbedingungen in vielen Bereichen eine zentrale Rolle. Dies betrifft insbesondere die Fragen im Bereich der Haftung, wenn es um die Auslegung des Verschuldensmaßstabs geht. Insoweit ist es von zentraler Bedeutung, ob und inwieweit Qualitätssicherungsvereinbarungen in die jeweiligen Vertragsbeziehungen mit

70 RGSt. 44,76

71 PH25 Bedeutung von technischen Regelwerken Stand März 2021, S. 2

72 VersR 1992, 665

73 DVGW GW 130 Merkblatt, S. 11 ff.

74 VersR 1992, 665

einbezogen worden sind. Hierbei bestehen mit der individuell-vertraglichen Einbeziehung als auch der Einbeziehung in den Allgemeinen Geschäftsbedingungen verschiedene Möglichkeiten, die im Einzelfall abgewogen werden müssen. Zur Erreichung von Mindeststandards kann sich die Einbeziehung in die Allgemeinen Geschäftsbedingungen lohnen.

Für die Frage, ob die Qualität ausreichend ist und die Qualitätsvereinbarungen eingehalten worden sind, ist es notwendig, diese genau zu definieren. Hierbei bieten die existenten DIN-Normen Hilfestellungen, wobei zu beachten ist, dass diese keinen rechtsverbindlichen Charakter aufweisen. Insoweit ist es jedoch dienlich, sich an diesen Normen zu orientieren, um im Schadensfalle auch einen Entlastungsbeweis antreten zu können.

Literatur

- Architektenkammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2021): Rechtliche Bedeutung von anerkannten Regeln der Technik.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hrsg.) (2016): Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW GW 130 (M). Qualitätssicherung der Netzdokumentation.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hrsg.) (2021): Geschäftsordnung DVGW GW 100. Tätigkeit der DVGW-Fachgremien und Ausarbeitung des DVGW-Regelwerkes.
- DIN e. V. (2022): www.din.de/de/wdc-beuth:din21:235671064, letzter Zugriff 04/2022.
- DIN e. V. (Hrsg.) (2015): DIN EN ISO 9000 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015). Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015.
- DIN e. V. (Hrsg.) (2015): DIN EN ISO 9001 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015). Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9001:2015.
- Duden (2022): www.duden.de/rechtschreibung/Qualitaet, letzter Zugriff 04/2022.
- Helmig, E., Regula, S. (2012): Qualitätssicherungsvereinbarungen unter der ISO/TS 16949 – Haftungsrisiken und Vermeidungsstrategien. In: General Reinsurance AG (Hrsg.): PHi Haftpflicht international – Recht & Versicherung, Heft 5/2012, 184.
- Koch, R. (2017): Qualitätssicherungsvereinbarungen und Versicherungsschutz. Haftungsverteilung und Grenzen des Versicherungsschutzes. In: IWRZ – Zeitschrift für internationales Wirtschaftsrecht, Heft 3/2017, 119 ff., abgerufen unter IWRZ 2017, 119, beck-online.
- Leyens, P. (2021): § 377 HGB. In: Baumbach, A., Hopt, K., Handelsgesetzbuch.
- Mager, S. (2019): VgV § 49. In: Burgi, M., Dreher, M., Opitz, M.: Beck'scher Vergaberechtskommentar, beck-online.
- Mahlzahn, M. (2022): 3.6 ISO 9000/Qualitätsmanagement/Zertifizierungen. In: PdK Niedersachsen Informationsverarbeitung im kommunalen Bereich Niedersachsens, Band B 15 NDS, beck-online.
- Migger, L. M. (1992): Qualitätssicherungsverträge: Versuch einer Zwischenbilanz aus der Sicht der betrieblichen Praxis. In: VersR 1992, 665 ff., abgerufen unter VersR 1992, 665, beck-online.

- Schmidt, D. (1991): Qualitätssicherungsvereinbarungen und ihr rechtlicher Rahmen. In NJW Neue juristische Wochenzeitschrift, Heft 3/1991, 144, abgerufen unter NJW 1991, 144, beck-online.
- Schnapp/Wigge (2017): Vertragsarztrecht, § 19 Qualitätssicherung in der vertragsärztlichen Versorgung.
- Stümer, S. (2007): Qualitätsgesicherter Aufbau digitaler Netzdokumentation.
- Teichler, M. (1991): Qualitätssicherung und Qualitätssicherungsvereinbarung. In: Betriebs-Berater, Heft 7/1991, 428 ff., abgerufen unter BB 1991, Heft 7, 428, beck-online.
- TÜV Süd Management Service GmbH (Hrsg.) (2021): Qualität auf einen Blick. Leitfaden zur ISO 9001:2015. Aktualisierte Version 2021.
- Voigt, K.-I. (2022): <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/qualitaetssicherung-44396/version-267707>, letzter Zugriff 04/2022.
- Weidenkaff, W. (2021): BGB § 434. In: Grüneberg, C., Bürgerliches Gesetzbuch.
- Wirwohl, V.: Das DIN und die Normungsgrundsätze – Geltungshierarchie und Widersprüche. In: BVS e.V: Der Sachverständige, Heft 12/2020, 306 ff., abgerufen unter DS 2020, 306, beck-online.

Kontakt

Rechtsanwalt Martin Brück von Oertzen
Wolter Hoppenberg Rechtsanwälte Partnerschaft mbB
Münsterstraße 1–3, 59063 Hamm
bvo@wolter-hoppenberg.de

Selbstleuchtende Latte vom Typ „LumiScale“ – Systemüberprüfung und Überlegungen zur Genauigkeit

Helmut Woschitz

1 Einführung

Bei Nivellierarbeiten unter Tage oder bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen muss die Lattenteilung entsprechend beleuchtet werden, um Messungen durchführen zu können bzw. Messabweichungen zu vermeiden. Schon kurz nach der Einführung der Digitalnivelliere 1990 waren verschiedene Lattenbeleuchtungseinrichtungen im Einsatz, die auf Scheinwerfern, Leuchtstoffröhren oder LED Leisten beruhten. An verschiedenen Instituten, Behörden und von Praktikern wurden Versuche unternommen, praktikablere Lösungen zu finden und z. B. die ganze Latte mit aufklemmbaren Leuchtdioden zu beleuchten (siehe z. B. Zischinsky 1994).

2001 begann an der TU Graz unter der Federführung von Prof. Fritz K. Brunner die Entwicklung einer selbstleuchtenden Nivellierlatte, basierend auf elektrolumineszierenden Folien (EL-Folien). Mehrere Funktionsmuster für einfache, aber auch für Präzisions-Nivellierlatten wurden entwickelt und weitere Beleuchtungsmöglichkeiten diskutiert (Brunner und Woschitz 2004). Die Leuchtstärke der damals verfügbaren EL-Folien erlaubte vor allem das Durchlichtverfahren, weshalb verschiedene Ausführungen (transparente Trägerfolie, Invarmaske) mit Codemasken realisiert wurden; für eine Auflicht-Beleuchtung lieferten die Leuchtfolien noch eine zu geringe Leistung.

Die Entwicklung wurde der Fa. Nedo vorgestellt, die diese aufgegriffen und auf der INTERGEO 2004 in Stuttgart ein Funktionsmuster mit Invarmaske vorgestellt hat, welches auf einer 2 m langen Invarlatte basierte. Die selbstleuchtende Nivellierlatte hat zunächst aber Interessenten aus dem Berg- und Tunnelbau begeistert, die eine einfachere Variante mit einer Genauigkeitsanforderung ähnlich jener von Alu-Teleskopplatten als ausreichend betrachteten. Daher wurde in der Folge intensiv an einer Variante gearbeitet, bei der der Code auf einer transparenten Trägerfolie aufgebracht wird und dieser von hinten mit der EL-Folie ausgeleuchtet wird. Das Resultat dieser Entwicklung wurde 2005, wiederum auf der INTERGEO, als „LumiScale“-Latte vorgestellt und ist seitdem kommerziell

erhältlich. Seit 2009 ist mit der „LumiScale Control“ auch eine Kurzausführung für die stationäre Montage bei Bauwerksüberwachungen erhältlich.

In diesem Beitrag werden Untersuchungen der selbstleuchtenden LumiScale-Nivellierlatte gezeigt und Überlegungen angestellt, die es dem Anwender erleichtern sollen, die Einsetzbarkeit für seine eigene Anwendung zu beurteilen.

2 Selbstleuchtende Latte vom Typ „LumiScale“

2.1 Aufbau

Die einteilige 2,20 m lange Latte besteht aus einem ca. 60 mm breiten und ca. 28 mm dicken Aluminiumkörper, in dem auf der Vorderseite die EL-Folie sowie die transparente Code-Trägerfolie eingelegt sind, Abb. 1. Auf der Rückseite sind die notwendigen elektronischen Komponenten, der Akku für ca. 10 Stunden Betriebsdauer, Haltegriff und eine beleuchtete Dosenlibelle angebracht.



Abb. 1: Die LumiScale Latte der Fa. Nedo (2022)

Auf die Trägerfolie wird der Code (derzeit für Leica DNA, Leica Sprinter, Sokkia, Trimble) mittels Siebdruckverfahren aufgebracht. Wie aus den Untersuchungen in Abschnitt 3 geschlossen werden kann, werden hierzu zwei Schablonen verwendet, die im Produktionsprozess aneinandergereiht werden.

Im eingeschaltetem Zustand leuchtet die EL-Folie über einen 2125 mm langen und 25 mm breiten Bereich weißlich, etwa von 0,05 m bis 2,17 m. Der nutzbare Bereich der Latte hängt vom verwendeten Nivelliersystem und dessen Öffnungswinkel bzw. Auswertealgorithmus ab und wird entsprechend kleiner sein, sollen Lattenendeffekte vermieden werden (siehe z. B. Woschitz 2005).

Die EL-Folie liefert die für den Bildsensor des Digitalnivelliers notwendigen spektralen Anteile und leuchtet über die gesamte Fläche homogen. Der für das jeweilige Nivelliersystem notwendige Code wird durch die auf den Teilungsträger aufgebrachten schwarzen Codeelemente realisiert, wodurch an diesen Stellen das Licht am Abstrahlen gehindert wird. Die hellen Codeelemente entstehen durch die unbedruckten Stellen der Folie.

Als Teilungsträger wird ein Polyesterfilm (Nedo 2022) verwendet, der eine gute Maßhaltigkeit und einen für Kunststoffe vergleichsweise geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten aufweist. Die Trägerfolie ist am unteren Ende

der Latte geklemmt und wird durch die beiden seitlich an den Lattenkörper angeieteten L-Profile im Lattengehäuse lose geführt.

2.2 Teilungsgenauigkeit

Die spezifizierte Teilungsgenauigkeit der LumiScale liegt zwischen den im Nivellement für einfache Aufgaben nach DIN 18703 kostengünstige Latten, und den nach DIN 18717 spezifizierten Präzisions-Nivellierlatten (Nedo 2005). Der Bedienungsanleitung nach, ist sie ist aber keinesfalls als Ersatz für Invarlatten geeignet (Nedo 2018).

In der 2021 revidierten DIN 18703 wird für einfache Nivellierlatten die Grenzabweichung des Sollmaßes vom Istmaß (Δl) eines beliebigen Teilschnittes (vom ersten Teilschnitt aus gemessen) als

$$|\Delta l| \leq \Delta l_0 + m_l \cdot l \quad (1)$$

definiert. Der erste Term, Δl_0 , definiert den konstanten Teil der bis zum entsprechenden Element an der Position l erlaubten Abweichung, der zweite Term den maßstabsabhängigen, mit dem Maßstab m_l der Latte. Die Grenzabweichung gilt bei einer Bezugstemperatur von 20°C, auch für einfache Latten. Die definierten Parameter sind in Tab. 1 angeführt, in der auch die zulässige Nullpunktabweichung NP der Latte angegeben ist. Werkstoffe und deren thermischer Ausdehnungskoeffizient α_t sind für einfache Nivellierlatten nicht zu spezifizieren, für die meisten einfachen Anwendungen aber auch nicht notwendig.

Die zum Zeitpunkt der Entwicklung der LumiScale gültige DIN 18717 für Präzisions-Nivellierlatten wurde 2016 durch die DIN ISO 12858-1 ersetzt, durch

Tab. 1: Maximal zulässige Abweichung der Teilung (Gl. 1) für einfache Latten (DIN 18703), Präzisions-Nivellierlatten (DIN ISO 12858-1) und die LumiScale, sowie deren maximal zulässige thermische Ausdehnungskoeffizienten α_t und Nullpunktabweichungen NP

	Einfache Latten	Invarlatten			LumiScale
		Klasse A	Klasse B	Klasse C	
Δl_0 [mm]	0,3	0,015	0,025	0,05	0,2
m_l [ppm]	300	10	25	50	200
NP [mm]	0,3	0,05	0,05	0,05	0,3
α_t [ppm/K]	k. A.	0,5	1,0	1,5	18 ^{*)}

^{*)} für den Teilstabträger (Polyesterfilm)

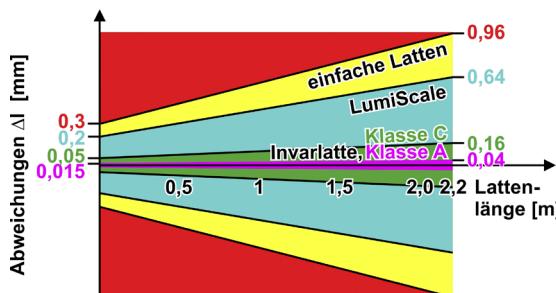


Abb. 2:
Zulässige Teilungsabweichungen bei einer Lattenlänge von 2,20 m (ohne Berücksichtigung der Nullpunktabweichung)

die nun drei Klassen von Invarlatten eingeführt wurden, mit den zulässigen Abweichungen gemäß Gl. 1 und den in Tab. 1 angeführten Parametern. Abb. 2 stellt die zulässigen Teilungsabweichungen grafisch dar.

Für einfache Latten eines bestimmten Typs (Leica GKNL4M) zeigten Woschitz und Schauer (2017), dass die Abweichungen durchwegs innerhalb dieser Grenzen lagen, teilweise aber nur knapp, was wohl der kostengünstigen Herstellung geschuldet ist, und diskutierten deren Auswirkung auf praktische Messungen.

Liegen keine weiteren Informationen vor, sollten für Genauigkeitsabschätzungen daher immer die (konservativ anmutenden) Werte der Norm herangezogen werden.

2.3 Genauigkeitsbeeinflussende Effekte

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die in der Abb. 2 gezeigten Abweichungen auf eine Referenztemperatur von 20°C beziehen, im Feld aber infolge der temperaturbedingten Materialdehnungen durchaus größere Abweichungen auftreten können, sofern keine Temperaturkompensation durchgeführt wird. Der Hersteller liefert dafür einen entsprechenden Wert (Tab. 1), obwohl gemäß der DIN 18703 keine Werkstoffe anzugeben sind. Über das Feuchteverhalten der Trägerfolie liegen allerdings keine Informationen vor, weshalb dieses später (Abschnitt 6.2) kurz beleuchtet wird.

Weiters ist anzumerken, dass die zuvor angeführten DIN-Normen die Teilungsgenauigkeit einzelner Striche spezifizieren, was für Strichlatten wohl noch von direkter praktischer Relevanz war, bei codierten Latten aber nur Aufschluss über die Herstellungsgenauigkeit gibt. Der von einem Digitalnivellier ausgegebene Höhenwert wird bei den derzeit üblichen Systemen immer von mehreren Codeelementen, entsprechend der Größe des am Bildsensor abgebildeten Bereichs bzw. des verwendeten Berechnungsalgorithmus, beeinflusst. Einzelne Teilungsabweichungen werden – sofern diese stochastisches Verhalten aufweisen –

infolge des im Digitalnivellier ablaufenden Mittelungsprozesses einen geringeren Einfluss auf den erfassten Höhenwert haben. Mit steigender Distanz wird es daher durch die größere Anzahl an verwendeten Codeelementen zu einem stärkeren Glättungsprozess kommen (mit Ausnahme des Trimble Systems, das ab ca. 3,4 m immer einen gleich großen Codeabschnitt verwendet), wodurch einzelne, möglicherweise auch außerhalb der Fertigungstoleranz liegende Striche jedenfalls einen kleineren Einfluss auf den Höhenwert haben werden.

Andererseits können durch den Abbildungsprozess des Digitalnivelliers weitere Effekte entstehen, die z.B. in den Lattenendbereichen wesentlich größere Abweichungen verursachen.

Da die LumiScale ausschließlich mit unterschiedlichen Codierungen für Digitalnivelliere verfügbar ist, wird zu ihrer praktischen Beurteilung in der Folge die Methode der Systemkalibrierung angewandt. Für die reine Kontrolle der herstellungsbedingten Teilungsgenauigkeit wäre die Methode der Lattenkalibrierung anzuwenden. Daher werden in den folgenden Abbildungen die Abweichungen als Höhenabweichungen ΔH (Soll-Ist-Werte) und nicht Teilungsabweichungen (Δl) dargestellt. Eine ausführliche Diskussion dazu wurde in Heister et al. (2005) geführt.

3 Untersuchung der LumiScale

Der Großteil der gezeigten Untersuchungen wurde im klimatisierten geodätischen Messlabor der TU Graz mit dem Vertikalkomparator durchgeführt. Die möglichen Visurweiten liegen zwischen ca. 1,5 m und 30 m und decken damit den ganzen bei Präzisionsmessungen üblichen Bereich ab. Eine erweiterte Messunsicherheit der Komparatormessung von $U(H) = \pm 2,7 \mu\text{m}$ ($k = 2$) erlaubt es, Kalibrierungen durchzuführen, und ist jedenfalls ausreichend für die im Folgenden gezeigten Tests. Details über die Anlage können bei Bedarf Woschitz und Brunner (2003) entnommen werden.

3.1 Test einer stärker gebrauchten Latte aus der Serienfertigung 2010 mit einem Leica NA3000

Bei dieser Untersuchung wurde eine LumiScale-Latte (Leica DNA Code, Herstellungszeitraum: 10/2010) in Kombination mit einem NA3000 verwendet, da dieses im Gegensatz zu den neueren Digitalnivellieren deutliche spektrale Anteile im IR Bereich benötigt, und die Funktionsfähigkeit auch mit diesen alten Geräten überprüft werden sollte. Die Tests erfolgten bei einer kurzen (3 m) sowie bei einer größeren Zielweite (20 m), jeweils einmal bei eingeschalteter

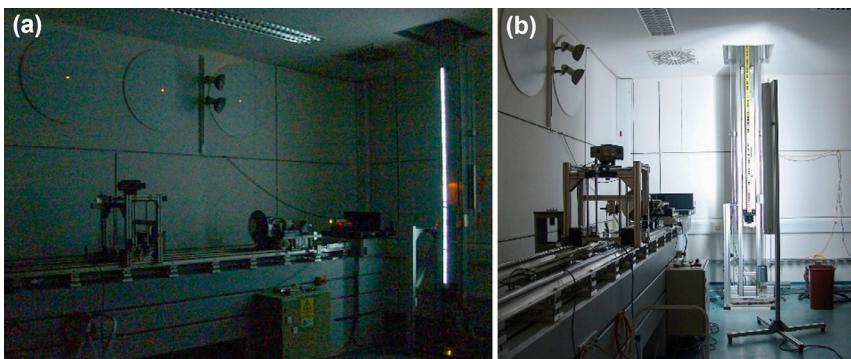


Abb. 3: Systemtests am Vertikalkomparator bei 3 m Visurweite: (a) aktivierte EL-Folie und sonst verdunkeltes Messlabor, (b) Beleuchtung der LumiScale (bei ausgeschalteter EL-Folie) mit einer Neonröhre mit tageslichtähnlichem Spektrum

EL-Folie der LumiScale-Latte und komplett finstrem Labor (Simulation einer Innenraumanwendung) und einmal bei ausgeschalteter EL-Folie mit eingeschalteter Laborbeleuchtung (Simulation einer Tageslichtanwendung). Abb. 3 zeigt den Aufbau während der Tests.

Jede Kalibriermessung besteht aus Hin- und Rückmessung (0,0 m bis 2,2 m) auf die orthogonal zur Visur ausgerichtete Latte, jeweils in der Mitte der Teilung. Das Abtastintervall betrug ca. 15 mm und wurde zwischen Hin- und Rückmessung um die Hälfte versetzt, sodass die Latte effektiv alle 7,5 mm abgetastet wurde. An jeder Position wurden mit dem Nivellier drei Einzelmessungen getätigt. Hin- und Rückmessung wurden solange fortgesetzt, bis nach 8 Stunden die Batterie der gebrauchten Latte leer war. Die Messzeiten des NA3000 betrugen sowohl bei ein- als auch bei ausgeschalteter EL-Folie im Mittel 3,3 s, was belegt, dass die EL-Folie hinreichend IR-Anteil, auch für die alten Leica Instrumente, abgibt.

Abb. 4 zeigt Abweichungen der gemittelten Höhenablesungen. Gezeigt sind zwei voneinander unabhängige Messreihen mit ein- bzw. ausgeschalteter Leuchtfolie. Die Abweichungen weisen einen klaren Trend von ca. -225 ppm nach unten auf, mit einer Differenz von etwa -0,6 mm zwischen oberem und unterem Lattenende. Zusätzlich ist ca. in Lattenmitte ein etwa 0,12 mm großer Sprung sichtbar, wobei es im Sichtbereich des Nivelliers durch den Auswertealgorithmus zu Glättungseffekten kommt und der Sprung daher nicht scharf sichtbar ist. Längs der Latte zeigen die Abweichungen ein ähnliches Muster, was eine Folge des Berechnungsalgorithmus und der pseudostochastischen Verteilung der Codeelemente auf der Latte ist.

Die mit ausgeschalteter EL-Folie erfassten Daten weisen jedoch gegenüber jenen bei eingeschalteter EL-Folie einen kleinen Offset (< 0,02 mm) und einen um

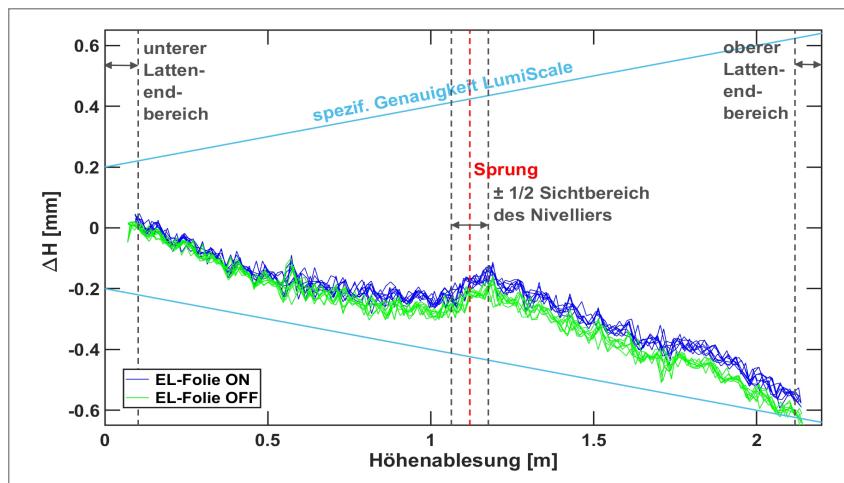


Abb. 4: Abweichungen einer mit einem Leica NA3000 getesteten LumiScale (Bj. 2010) bei 3 m Visurweite, mit ein- bzw. ausgeschalteter Leuchtfolie

etwa 15 ppm kleineren Maßstab auf, der eine Folge der später gezeigten Eigen erwärmung der eingeschalteten Latte ([Abb. 10](#)) ist.

Betrachtet man die Abweichungen weiter, so fallen über die Lattenlänge im Wesentlichen drei Bereiche mit unterschiedlichem Maßstab auf (ca. -460 ppm von 0 bis 0,6 m, -150 ppm von 0,6 bis 1,0 m, -400 ppm von 1,2 bis 2,1 m). Stoß und unterschiedliche Maßstäbe sind wohl auf den Fertigungsprozess mit zwei Schablonen zurückzuführen, und liegen in ihrer Größenordnung durchaus im üblichen Bereich einfach gefertigter Latten (siehe Woschitz und Schauer 2017).

Gegen Ende der Messung mit eingeschalteter EL-Folie wurde die Beleuchtung infolge des leer werdenden Akkus deutlich schwächer und fiel schlussendlich aus. Ein dadurch entstehender Einfluss auf die Höhenwerte konnte nicht festgestellt werden.

In [Abb. 5](#) sind die entsprechenden Ergebnisse bei einer Entfernung von 20 m dargestellt. Die Messzeiten des NA3000 sind bei dieser Distanz schon deutlich länger und betragen sowohl bei ein- als auch ausgeschalteter EL-Folie im Mittel 6 s. Der vom Nivellier abgebildete Lattenabschnitt ist bei dieser Distanz ca. 0,70 m groß, wodurch auch die Lattenendbereiche entsprechend groß sind; hier treten auch die größten Abweichungen auf, weshalb die Lattenendbereiche bei Messungen generell vermieden werden sollten. Auch der bei der 3 m-Distanz deutlich erkennbare Sprung in der Lattenmitte ist hier aufgrund des großen zur Berechnung verwendeten Lattenabschnitts und der Mittelungen kaum mehr erkennbar. Der große Öffnungswinkel des NA3000 war auch der Grund, weshalb

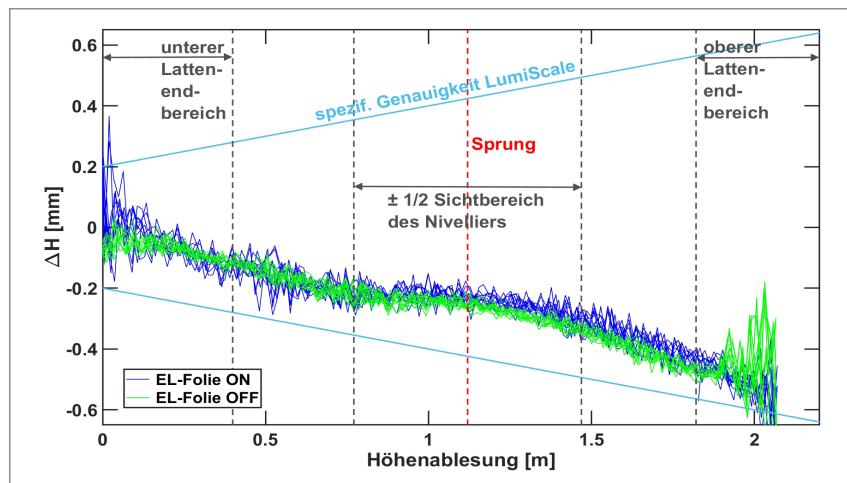


Abb. 5: Abweichungen einer mit einem Leica NA3000 getesteten LumiScale (Bj. 2010) bei 20 m Visurweite, mit ein- bzw. ausgeschalteter Leuchtfolie

bei diesem Test nicht die 30 m-Distanz gewählt wurde, obwohl bei dieser Distanz das NA3000 mit der LumiScale auch noch Messwerte liefert.

Vergleicht man nun die Ergebnisse zwischen ein- und ausgeschalteter EL-Folie, so ist wie zuvor zu erkennen, dass die Eigenerwärmung der eingeschalteten EL-Folie einen kleineren Maßstab verursacht. Auffallend ist, dass die Messwerte bei der 20 m-Distanz mit eingeschalteter EL-Folie eine etwas größere Streuung aufweisen (0,03 bis 0,04 mm), als jene bei ausgeschalteter EL-Folie (0,02 mm). Bei dieser Distanz sind die in den Objektraum abgebildeten Pixel des NA3000 schon größer als das Basis-Codeintervall von 2,025 mm; möglicherweise ist der Abbildungsprozess durch bei dieser Entfernung leicht überstrahlte helle Codelemente beeinflusst.

Im Zuge der Untersuchung wurde bei dieser Latte auch der Nullpunkt bestimmt, der bei ca. 0,24 mm und damit innerhalb der Spezifikationen lag.

3.2 Test einer neuwertigen Latte aus der Serienfertigung 2009 mit einem Trimble DiNi12

Bei dem in diesem Abschnitt beschriebenen Test wurde eine LumiScale-Latte (Trimble Code, Herstellungszeitraum: 10/2009) in Kombination mit einem DiNi12 (SW-Vers. 3.40) verwendet. Der Bildsensor des DiNi hat im sichtbaren Bereich (ca. 550 nm) die größte Empfindlichkeit. Das Dini hat zwar einen 5° großen Öffnungswinkel, verwendet aber ab ca. 3,4 m Entfernung immer nur

einen 30 cm großen Lattenabschnitt zur Berechnung der Höhenwerte. Lattenendeffekte und Übergangseffekte beim Stoß sollten daher überwiegend in einem kleineren Bereich auftreten, als beim zuvor gezeigten Beispiel.

Die Kalibriermessungen fanden im komplett finsternen Messlabor bei eingeschalteter EL-Folie der LumiScale statt, mit einer Ausnahme (4,0 m), wo der Einfluss einer teilweisen Beleuchtung überprüft werden sollte (Abb. 6). Die Messdistanzen lagen bei 1,5 m, 3,0 m, 4,0 m 10,0 m, 20,0 m und 29,4 m, wobei die Messungen mit dem Nivellier, wie zuvor, jeweils in der Mitte der Teilung, auf die orthogonal ausgerichtete Latte, durchgeführt wurden.

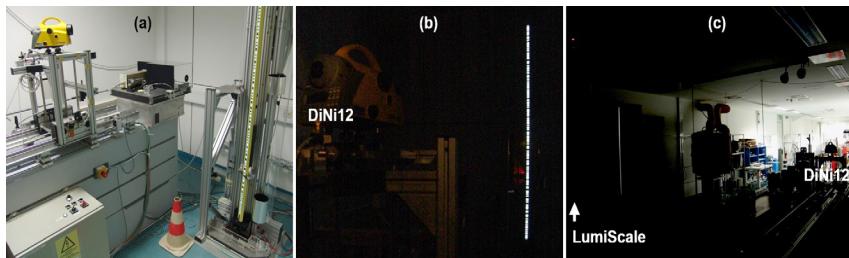


Abb. 6: (a) Beleuchteter Aufbau bei 1,5 m Distanz, (b) Kalibrierung im finsternen Labor bei 3 m Distanz mit für das Foto angeleuchtetem Nivellier, (c) Kalibrierung bei teilweise abgedunkeltem Labor bei 4 m Distanz

Wie zuvor, bestand jede Kalibriermessung aus einer Hin- und einer Rückmessung mit drei Einzelmessungen an jeder Messposition. Das Abtastintervall wurde mit ca. 11 mm gewählt, wobei die Messpositionen der Rückmessung gegenüber jenen der Hinmessung wieder um die Hälfte versetzt wurden. Der Messbereich umspannte die gesamte Latte (0,0 m bis 2,2 m), samt den Lattenendbereichen mit den dort zu erwartenden größeren Abweichungen.

Abb. 7 zeigt die Abweichungen bei den verschiedenen Distanzen. Diese zeigen zwar wieder Systematiken, liegen aber auch hier bei allen Distanzen innerhalb der Spezifikation. Die bei 4,0 m erfassten Daten sind durch die Mischbeleuchtung nicht beeinflusst.

Bei ca. 1,10 m ist wiederum ein Sprung (ca. 0,5 mm) durch das Aneinanderlegen der beiden Schablonen bei der Fertigung erkennbar, sowie unterschiedlichen Maßstäbe im unteren und oberen Lattenabschnitt (ca. -220 und -350 ppm). Die größten Abweichungen in den Lattenendbereichen betragen in etwa 0,2 mm, können bei geänderter Hintergrundtextur an einem anderen Aufstellungsort aber durchaus auch größer sein.

Die Größe des Übergangsbereichs um den Stoß in Lattenmitte sowie der Lattenendbereiche bleibt beim DiNi ab ca. 3,4 m gleich und entspricht im Wesentlichen dem für die Höhenberechnung verwendeten 30 cm-Abschnitt. Ledig-

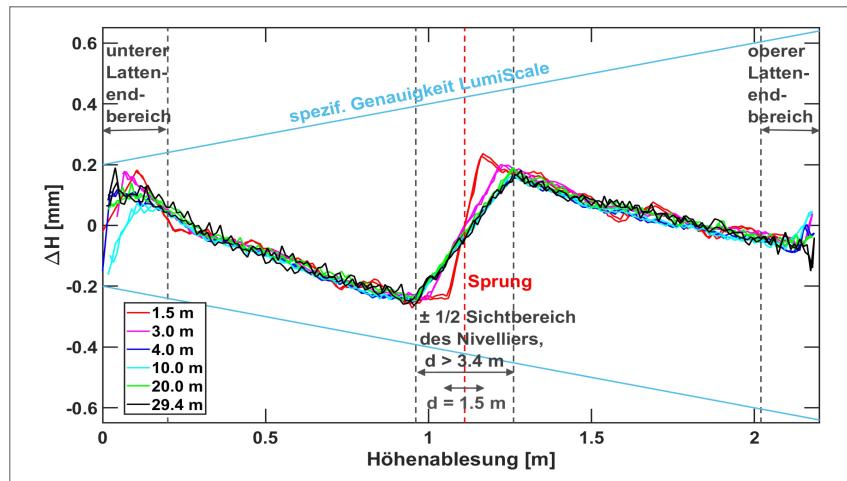


Abb. 7: Abweichungen einer mit einem Trimble DiNi12 getesteten LumiScale (Bj. 2009) bei verschiedenen Visurweiten mit eingeschalteter Leuchtfolie

lich bei den beiden kürzeren Distanzen ist dieser kleiner (13 cm bei 1,5 m und 26 cm bei 3,0 m), weshalb sich dort auch die Abweichungen im Übergangsreich von jenen der übrigen Distanzen unterscheiden.

4 Kalibrierung

Die im vorangegangenen Abschnitt gezeigten Abweichungen sind systematischer Natur und liegen im Herstellungsprozess der Latten begründet. Auf den gemessenen Höhenwert haben sie aber unterschiedliche Auswirkungen, je nach verwendetem Nivelliersystem und dem implementierten Auswertealgorithmus. Dieser ist für die gängigen Systeme bekannt und wurde in Woschitz (2003) zusammengefasst.

Eine individuelle Kalibrierung mit einem einfachen Modell erscheint daher möglich und könnte für Einzelanwendungen interessant sein, wo der Vorteil der LumiScale-Latte genutzt werden soll, die spezifizierte Genauigkeit aber nicht ausreichend ist. Dies soll anhand der in Abb. 7 gezeigten Abweichungen versucht werden, die gemäß Abb. 8 in mehrere Bereiche eingeteilt wurden, in denen die Abweichungen annähernd lineares Verhalten, aber unterschiedliche Maßstäbe zeigen.

Die bei der 1,5 m-Distanz erfassten Daten wurden wegen des deutlich kleineren verwendeten Lattenabschnitts und der daraus resultierenden abweichenden Systematiken bei der Schätzung der Regressionsgeraden ebenso nicht verwendet

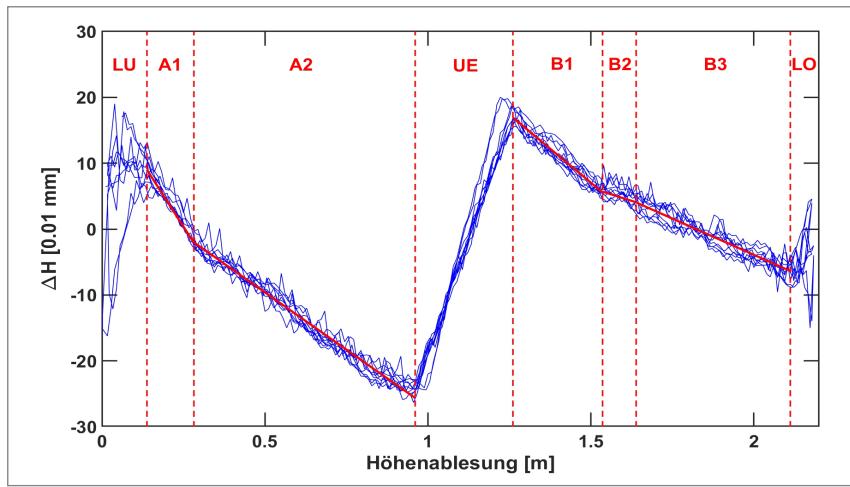


Abb. 8: Für das einfache Korrekturmödell identifizierte lineare Bereiche (rot) der in Abb. 7 gezeigten Abweichungen (blau)

Tab. 2: Koeffizienten der Korrekturfunktionen für die unterschiedlichen Bereiche der untersuchten LumiScale

	Bereich auf der Latte		Offset a [mm]	Maßstab b [mm/m]
	von B_U [m]	bis B_O [m]		
LU ¹⁾	0,000	0,138	0	0
A1	0,138	0,282	0,196	-0,769
A2	0,282	$1,110 - L_{UE}/2$	0,078	-0,348
UE ²⁾	$1,110 - L_{UE}/2$	$1,110 + L_{UE}/2$	a_{UE}	b_{UE}
B1	$1,110 + L_{UE}/2$	1,536	0,690	-0,413
B2	1,536	1,639	0,298	-0,157
B3	1,639	2,112	0,401	-0,220
LO ¹⁾	2,112	2,200	0	0

¹⁾ keine Korrektur in den verfälschten Lattenendbereichen

²⁾ Berechnung von a_{UE} , b_{UE} in Abhängigkeit von L_{UE}

wie einzelne Ausreißer in den Teillbereichen. In Tab. 2 sind die Parameter der geschätzten Regressionsgeraden aufgelistet. In den verfälschten Lattenendbereichen werden keine Korrekturen durchgeführt, da die Abweichungen in diesem Bereich in Abhängigkeit von der Hintergrundtextur stark variieren können.

Die Länge des Übergangsbereichs L_{UE} ist gemäß

$$L_{UE} = \begin{cases} \frac{5^\circ \cdot \pi}{180^\circ} \cdot d & , \quad d \leq 3,435 \\ 0,30 & , \quad d > 3,435 \end{cases} \quad (2)$$

in Abhängigkeit von der Distanz d zu berechnen, weshalb auch die Bereichsgrenzen von A2 und B1 distanzabhängig sind. Die jeweiligen Korrekturwerte am Ende von A2 bzw. Anfang von B1 können zur Berechnung der Parameter a_{UE} und b_{UE} der Regressionsgeraden im Übergangsbereich verwendet werden.

Eine Höhenablesung h , die innerhalb der Bereichsgrenzen B_U und B_O liegt, kann nun mit den für diesen Bereich gültigen Parametern gemäß

$$h_{korr} = h + (a_i + b_i \cdot h) \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

korrigiert werden. Abb. 9 zeigt die Restabweichungen der zuvor gezeigten Kalibriermessungen nach Korrektur der Höhenwerte, wobei die Kurven in 0,1 mm-Schritten gegeneinander versetzt dargestellt sind.

Bei den kurzen Distanzen (1,5 m und 3,0 m) stehen im Vergleich zu den übrigen Distanzen weniger Codeelemente zur Mittelung zur Verfügung, weshalb sich hier einzelne Teilungsungenauigkeiten stärker auf den gemessenen Höhen-

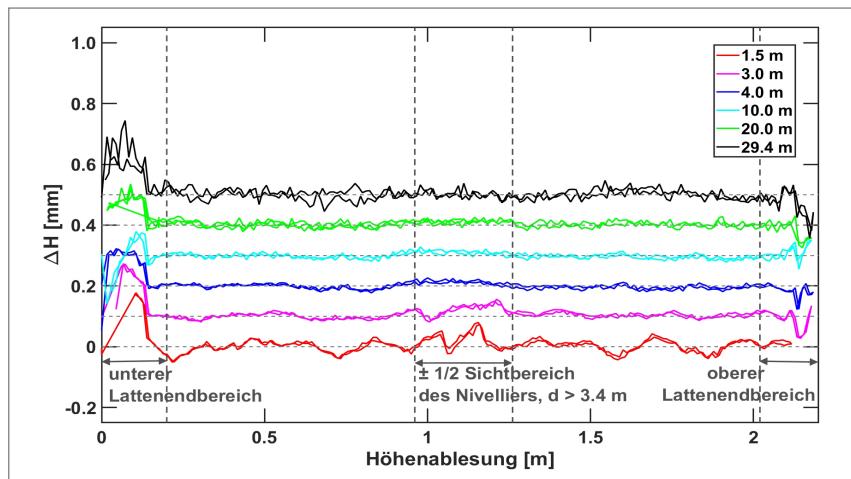


Abb. 9: Restabweichungen (DiNi12, LumiScale) bei verschiedenen Visurweiten mit eingeschalteter Leuchtfolie, nach Korrektur der Höhenablesungen des Nivelliers

wert auswirken. Dies erklärt die größeren Abweichungen und deren stärkere Strukturiertheit in Abb. 9 sowie die größere Standardabweichung der Residuen bei diesen beiden Distanzen (Tab. 3).

Im Vergleich dazu beträgt die Standardabweichung der Residuen der mit einem DiNi12 und einer Invarlatte gewonnenen Höhenwerte bei 3 m Entfernung 0,006 mm und bei 30 m ca. 0,018 mm. Damit weisen die mit dem einfachen Modell korrigierten LumiScale-Daten bei größeren Entfernungen in etwa die gleiche Präzision auf wie jene von Invarlatten; bei kürzeren Distanzen ist sie aufgrund der schlechteren Teilungsgenauigkeit etwas schlechter.

Tab. 3: Standardabweichungen s der Residuen (ohne Lattenendbereiche), erfasst mit DiNi12 und LumiScale

Distanz [m]	s [0,01 mm]
1,5	2,2
3,0	1,3
4,0	0,9
10,0	0,9
20,0	1,0
29,4	1,5

5 Eigenerwärmung der Latte

Abb. 10 zeigt die Erwärmung einer LumiScale-Latte nach dem Einschalten der EL-Folie. Die Latte wurde vor Versuchsbeginn vollständig akklimatisiert und die EL-Folie war zuvor für mehr als 24 Stunden ausgeschaltet. Die Temperaturen wurden in einer Höhe von 1,50 m mit Thermoelementen auf der Vorderseite der Trägerfolie, der Rückseite des Lattengehäuses und auf einer der vorderen Führungsschienen des Gehäuses erfasst und sind gefiltert dargestellt. Durch die relativ geringe Auflösung des verwendeten Dataloggers (0,1 K) entsteht eine leichte Welligkeit in den gezeigten Datenreihen. Der prinzipielle Verlauf mit der schnelleren Erwärmung der Trägerfolie um 0,65 K und der verzögerten, etwas geringeren, Erwärmung des Gehäuses ist aber dennoch gut erkennbar. Messungen in anderen Höhenpositionen der Latte und an anderen Latten zeigen teilweise eine geringfügig stärkere Erwärmung (0,1 bis 0,2 K).

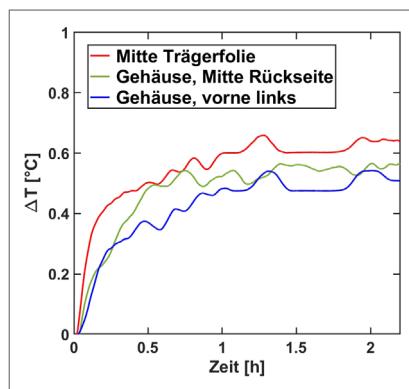


Abb. 10: Erwärmung einer akklimatisierten LumiScale nach Einschalten der EL-Folie, gemessen in 1,5 m Höhe an verschiedenen Positionen der Latte

6 Ausdehnungskoeffizienten

6.1 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Für die Trägerfolie der LumiScale wird vom Hersteller ein thermischer Ausdehnungskoeffizient von < 18 ppm/K angegeben, was für Kunststoffe ein vergleichsweise geringer Wert ist. Neben ihrer Zusammensetzung ist die Wärmeausdehnung von Kunststoffen auch von der Formgebung im Herstellungsprozess abhängig. Der thermische Ausdehnungskoeffizient der meisten Thermoplasten liegt bei etwa 70 bis 100 ppm/K und kann bei elastischen Kunststoffen noch größer sein. Durch Füllstoffe mit niedrigem Ausdehnungskoeffizient kann er aber herabgesetzt werden und bei glasfaserverstärkten Duroplasten mit höherem Glasgehalt bis auf etwa 12 ppm/K absinken (Bargel und Schulze 2008).

6.2 Hygroskopischer Ausdehnungskoeffizient

Über den möglichen Feuchteinfluss auf die Trägerfolie werden keine Informationen angegeben. Es ist aber davon auszugehen, dass aufgrund der langjährigen Erfahrung des Herstellers im Instrumentenbau die praktikabelste Lösung gewählt wurde und das verwendete Trägermaterial neben dem für Kunststoffe sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auch einen entsprechend kleinen hygroskopischen Ausdehnungskoeffizienten aufweisen sowie bei der Konstruktion der Latte (Lagerung des Trägers) auch auf die anderen Eigenschaften des Trägermaterials geachtet worden sein wird. Mit der Angabe, dass Polyesterfilm als Trägermaterial verwendet wird, können folgende Informationen gefunden werden, die einen Richtwert liefern könnten.

Polyesterfilm wurde in den 1940ern in England erfunden und nach dem Krieg z. B. von der Fa. E.I. duPont produziert und 1952 unter dem Markennamen „Mylar“ auf den Markt gebracht. Heute wird Polyesterfilm unter verschiedenen Markennamen in der Industrie und im täglichen Leben vielseitig verwendet.

DuPont Teijin Films (2003) gibt für den Polyesterfilm Mylar einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 17 ppm/K und einen hygroskopischen Ausdehnungskoeffizienten von 6 ppm/%r.F. an. Das Verhalten wird über einen großen Bereich als linear angegeben (siehe Abb. 11) und das Material soll über einen großen Temperaturbereich (-70°C bis +150°C) einsetzbar sein.

Bei einer reinen Temperaturänderung verlaufen thermische und hygroskopische Längenänderung gegenläufig – mit einer höheren Temperatur geht ja eine geringere relative Luftfeuchte einher – und heben sich teilweise auf.

Zur Abschätzung des Gesamteffektes kann ein Mollier-Diagramm für die entsprechende Meereshöhe verwendet werden.

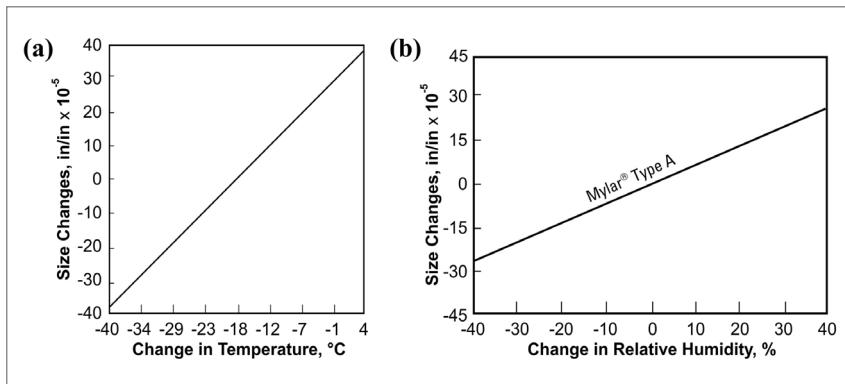


Abb. 11: (a) Thermisches und (b) hygroskopisches Verhalten eines Polyesterfilms am Beispiel von Mylar (DuPont Teijin Films 2003)

6.3 Experimentelle Bestimmung

Von Ehrhart und Vallazza (2010) wurde ein Versuch zur näherungsweisen Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der LumiScale und der Akklimatisationszeit durchgeführt. Da für die Temperierung der Latte keine Klimakammer in geeigneter Größe zur Verfügung stand und der Test mit vertikaler Latte (Gebrauchslage) durchgeführt werden sollte, wurde die Latte einen Tag lang im Messlabor bei konstanter Temperatur und Feuchte (19,8°C, 47 %r.F.) gelagert, danach schnell ins Freie getragen (5,8°C, 77 %r.F.) und die Längenänderung der Latte mit einem zuvor aufgebautem und akklimatisiertem DiNi12 (5,60 m Entfernung) kontinuierlich am oberen Ende der Latte (1,82 m) erfasst. Die EL-Folie blieb beim Versuch ausgeschaltet, um zusätzliche Störeffekte durch die Eigenerwärmung der Latte zu vermeiden.

Abb. 12 zeigt die Veränderung der Lattenlänge während der Anpassung an die meteorologischen Bedingungen im Freien, wobei in der Darstellung die Höhenmesswerte um den ersten Wert reduziert wurden. Die kurzen Datenlücken sind durch die zu diesen Zeitpunkten durchgeführten Referenzmessungen zur Kontrolle der Stabilität der Ziellinie des Nivelliers bedingt.

Um die während des Transports der Latte ins Freie bis zum Messbeginn (ca. 1 Min.) bereits stattfindende Akklimatisation zu erfassen, wurde der Akklimatisationsprozess mittels dynamischem Modell 1. Ordnung geschätzt und das Modell bis zur Zeit Null berechnet. Die Latte verkürzt sich in etwas mehr als einer Stunde um 0,55 mm, woraus sich mit den -14 K ein α_r von 21,6 ppm/K abschätzen lässt mit einer Akklimatisationszeit $t_{0,99}$ (ca. $4,6\tau$) von 47 Minuten, was in etwa 3,3 min/K Temperaturänderung entspricht. Die Streuung der Resi-

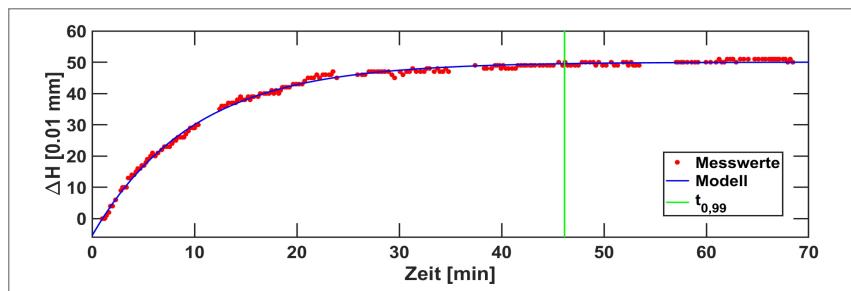


Abb. 12: Längenänderung einer LumiScale infolge geänderter Umgebungsbedingungen (-14 K), erfasst bei einer Höhe von $1,82 \text{ m}$ (nach Ehrhart und Vallazza, 2010, S. 17)

duen beträgt $0,008 \text{ mm}$, was geringfügig, aber nicht signifikant größer ist als jene bei entsprechenden Messungen im Messlabor.

Der bestimmte Wert liegt knapp über dem für die Trägerfolie angegebenen ($< 18 \text{ ppm/K}$, Tab. 1), aber durchaus im Bereich von Aluminium und bei einer kraftschlüssigen Verbindung der Trägerfolie mit dem Lattengehäuse, z. B. durch Verschmutzung, könnte dieser größere Wert durchaus realistisch sein.

Diese erste Betrachtung lässt jedoch die geänderte Luftfeuchte außer Betracht. Berechnet man nun mit den 18 ppm/K die theoretische Verringerung der Messwerte an der Ablesestelle, so beträgt diese lediglich $0,46 \text{ mm}$, also $0,09 \text{ mm}$ weniger als die gemessenen $0,55 \text{ mm}$. Bedenkt man außerdem, dass warme Luft mehr Wasser aufnehmen kann als kalte, und vergleicht den Wassergehalt der Luft im Messlabor (ca. $7,5 \text{ g/kg}$) mit jenem im Feld (ca. $4,5 \text{ g/kg}$), so wird klar, dass die Latte auch einer Abnahme der absoluten Feuchtigkeit ausgesetzt war, die vom Niveau der Labortemperatur aus gesehen, ca. -15% r.F. entspricht. Verwendet man nun einen möglichen Wert von $6 \text{ ppm/}\% \text{ r.F}$ (Abschnitt 6.2) zur Abschätzung der hygrokopisch bedingten Längenänderung des Teilungsträgers, so ergibt sich eine Verkürzung um $0,16 \text{ mm}$. Das ist zwar um $0,07 \text{ mm}$ mehr als tatsächlich gemessen, dieser Differenz soll hier aber nicht weiter nachgegangen werden, da sowohl thermischer als auch hygrokopischer Ausdehnungskoeffizient für das Trägermaterial nicht (genau) bekannt sind.

Das Experiment zeigt aber auf, dass die thermisch bedingte Längenänderung für bestimmte Anwendung nicht vernachlässigt werden sollte und für spätere Analysen jedenfalls auch die Luftfeuchte mitgemessen werden sollte.

7 Bedeutung für die Praxis

Die LumiScale ist eine gelungene Entwicklung und hat sich gegenüber vielen Individuallösungen zur Lattenbeleuchtung durchgesetzt. Die Untersuchungen

zeigen, dass die Genauigkeitsangaben des Herstellers für die LumiScale eingehalten werden.

Für „worst case“ Abschätzungen des jeweiligen Anwendungsfalls sollte jedenfalls die angegebene Grenzabweichung der Teilung (siehe Abschnitt 2.2) verwendet werden. Zusätzlich wird dabei für die vorherrschenden Umgebungsbedingungen eine Abschätzung der thermisch bedingten Längenänderung der Latte (Abschnitt 6.1), sowie ihre mögliche hygroskopisch bedingte Ausdehnung (Abschnitt 6.2) zu beachten sein. Für letztere liegen noch unzureichend Informationen vor, daher sollte die Luftfeuchte während den Messungen für spätere Analysen dokumentiert werden.

Abhängig vom Anwendungsfall, werden die gezeigten Teilungsabweichungen unterschiedliche Auswirkungen haben. Bei geringen Höhenunterschieden und Verwendung von nur einer Latte werden sie wohl aufgrund der ähnlichen Ablespositionen im Rück- und Vorblick durch die Differenzbildung größtenteils eliminiert werden. Bei größeren Höhenunterschieden mit Messungen nahe dem oberen und unteren Lattenende (z. B. bei 2,0 m und 0,2 m, was unter Tage bei homogenen Temperaturschichtungen wohl zulässig ist) wird die Abweichung aber stark von der individuellen Teilungscharakteristik der Latte abhängen. Im ersten gezeigten Beispiel (Abb. 5) wird dadurch pro 2 m Höhenunterschied eine Abweichung von 0,45 mm entstehen, im zweiten Beispiel (Abb. 7) hingegen werden sich die Abweichungen (trotz des auffälligen Sprungs in Lattenmitte) beinahe aufheben.

Weiters ist zu beachten, dass im Liniennivellement aufgrund der üblichen Systematiken (Markierung und damit identische Standpunkte im Hin- und Rückweg, annähernd konstante Instrumentenhöhe) der gewonnene Schleifenschlussfehler kaum von den systematischen Teilungsabweichungen beeinflusst werden wird, weshalb dieser zur Beurteilung systematischer Abweichungen und damit als Beurteilungskriterium einer Latte nicht geeignet ist. Dies lässt sich auch durch ISO Tests (ISO 17123-2) belegen, wo mit der zuvor für Abb. 7 verwendeten LumiScale-Latte mit 0,2 mm/√km derselbe mittlere km-Fehler erzielt wurde, wie bei Verwendung einer Invarlatte, und zwar sowohl nachts bei eingeschalteter, als auch tagsüber bei ausgeschalteter EL-Folie (Ehrhart und Vallazza 2010, S.8).

Die individuelle Teilungscharakteristik einer Latte und deren Einfluss auf die gemessenen Höhenwerte kann jedenfalls durch Systemkalibrierung erfasst werden. In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass entsprechende Korrekturfunktionen ableitbar sind und damit die erzielbare Genauigkeit gesteigert werden kann, sofern es für eine spezielle Anwendung notwendig und sinnvoll ist.

Für die Kurzvariante „LumiScale Control“ gelten die Überlegungen sinngemäß. Da diese hauptsächlich im stationären Einsatz verwendet wird, sollten die Messdistanzen achtsam gewählt werden, um Abweichungen durch Lattenendeffekte zu vermeiden, die durchaus größer sein können als die in diesem Beitrag

gezeigten Effekte. Auch hier werden sich durch die Differenzbildung systematische Teilungsabweichungen kaum auf die gemessenen Deformationswerte auswirken, wenn bei Wiederholungsmessungen annähernd gleiche Zielhöhen realisiert werden. Der Einfluss geänderter meteorologischer Bedingungen wird aber auch hier zu beurteilen sein.

Die angestellten Überlegungen und gezeigten Ergebnisse sollen dem Anwender helfen, abzuschätzen, für welche Anwendungen er die LumiScale einsetzen kann. Für Anwendungen wo höchste Genauigkeiten gefordert sind, sollten jedenfalls Invarlatten verwendet werden, wofür mittlerweile auch Spezialbeleuchtungen kommerziell verfügbar sind, die auf das Lattengehäuse montiert werden können. Über deren Leistungsfähigkeit wird in einem anderen Beitrag berichtet werden.

Die LumiScale hat sich jedenfalls aufgrund ihrer Bauform, ihres geringen Gewichts und der integrierten Beleuchtungseinheit in der Praxis als komfortable und leistungsfähige Latte etabliert.

Literatur

- Bargel, H. J., Schulze, G. (2008): Werkstoffkunde. 10. Auflg., Springer, 453 S.
- Brunner, F. K., Woschitz, H. (2004): Die selbstleuchtende Nivellierlatte. Allg. Vermessungs-Nachrichten 111: 104–109.
- DIN 18703:2021-06: Nivellierlatten. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, 8 S.
- DIN ISO 12858-1:2016-04: Optik und optische Instrumente – Zubehör für geodätische Instrumente – Teil 1: Präzisions-Nivellierlatten (Invarlatten) (ISO 12858-1:2014). Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag, Berlin, 8 S.
- DuPont Teijin Films (2003): Mylar Polyester Film, product information. Hopewell, VA, USA, Dok.Nr. H-37232-3, 6 S.
- Ehrhart, M., Vallazza, M. (2010): Untersuchung der selbstleuchtenden Nivellierlatte „LumiScale“ von Nedo. Unpubl. Bakkalaureatsarbeit, Inst. f. Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz, 59 S.
- Heister, H., Woschitz, H., Brunner, F. K. (2005): Präzisionsnivellierlatten, Komponenten- oder Systemkalibrierung? Allg. Vermessungs-Nachrichten 112: 233–238.
- ISO 17123-2 (2001): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 2: Levels.
- Nedo (2005): www.nedo.com.
- Nedo (2018): LumiScale Bedienungsanleitung. NEDO GmbH & Co.KG, Dornstetten, Dok.Nr. 060800 vom 31.07.2018.
- Nedo (2022): https://nedo.com/fileadmin/user_upload/pdfs/Prospekte_Produnktinfo/Vermessungszubehoer/LumiScale_DE.pdf, letzter Zugriff 04/2022.
- Woschitz, H. (2003): System Calibration of Digital Levels: Calibration Facility, Procedures and Results. Shaker Verlag, Aachen: 210 S.

- Woschitz, H. (2005): Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen. Allg. Vermessungs-Nachrichten 112: 239–244.
- Woschitz, H., Brunner, F.K. (2003): Development of a Vertical Comparator for System Calibration of Digital Levels. In: Schuh, H., Brunner, F.K., Kahmen, H. (Hrsg): IUGG-Schwerpunkttheft. Österr. Z. f. Vermessung und Geoinformation 91: 68–76.
- Woschitz, H., Schauer, M. (2017): Untersuchung einfacher Nivellierlatten vom Typ Leica GKNL4M. Allg. Vermessungs-Nachrichten 124: 243–255.
- Zischinsky, R. (1994): Nivellierlattenbeleuchtung für Digitalnivelliere. Unpubl. Seminararbeit, Inst. f. Angewandte Geodäsie, TU Graz.

Kontakt

Dr. Helmut Woschitz

Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, TU Graz

Steyrergasse 30, 8010 Graz, Österreich

helmut.woschitz@tugraz.at

Aufbau und Kalibration eines komplexen mobilen Multisensorsystems – Ein Überblick

Alexander Reiterer | Philipp von Olshausen | Philip Maus |
Simon Frey | Stefan Schwarzer

1 Einleitung

Die Digitalisierung unserer Umwelt gewinnt zunehmend an Bedeutung; Digitale Abbilder der Realität sind die Basis für Planungsprozesse oder (prädiktive) Instandhaltung zum Beispiel von Infrastruktur. Die Digitalisierung beginnt dabei immer mit der Erfassung relevanter Daten und der Ableitung entsprechender Parameter, um Objekte digital rekonstruieren (z. B. für den digitalen Zwilling) oder ihren Zustand möglichst schnell und effizient beurteilen zu können.

3D-Daten von Gleisen, Straßen, Brücken oder Gebäuden sind eine wertvolle Grundlage für die Instandhaltung. Aber nicht nur einzelne Objekte, sondern auch große Landstriche lassen sich inzwischen mithilfe mobiler Laserscanner und Kameras effizient erfassen.

Mit dem Umfang der Digitalisierung geht der Bedarf einher, den Prozess der Erfassung und Auswertung möglichst schnell und effizient durchführen zu können. Ein möglicher Schritt ist dabei der Einsatz von mobilen Plattformen als Träger für die Erfassungssensorik. Mögliche Trägerplattformen können dabei Fahrzeuge auf der Straße und Schiene, Drohnen, Boote und Unterwasserfahrzeuge sein. Weitgehend unabhängig von der Plattform kommen für die Erfassung eine ganze Reihe von Sensoren zum Einsatz, die entsprechend kombiniert und fusioniert werden müssen. Für die gemeinsame Nutzung der unterschiedlichen Datenströme in einem einheitlichen räumlichen Koordinatensystem müssen die Sensoren entsprechend positioniert und kalibriert werden.

2 Aufbau eines mobilen Multisensorsystems

Im vorliegenden Beitrag wollen wir uns auf ein mobiles Erfassungssystem für die Straße und deren Umgebung konzentrieren. Die Basis für dieses Messfahrzeug bildet das modulare Systemkonzept „Mobile Urban Mapper MUM“ des Fraunhofer IPM. Dieses Baukastensystem erlaubt es, Sensoren beliebig zu kombinie-

ren und über eine entsprechende zeitliche und räumliche Synchronisierung einheitliche Datenströme zu erzeugen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Systemaufgaben beschrieben.

2.1 Erfassung der Straßenoberfläche

Die Zustandserfassung der Bundesfernstraßen und nahezu aller Landesstraßen erfolgt regelmäßig alle vier Jahre. Es müssen dabei folgende Merkmale erhoben werden:

- a) Ebenheit in Längs- und Querrichtung,
- b) die vorhandene Griffigkeit und
- c) die Substanzmerkmale der Oberfläche (Risse, Flickstellen etc.).

Die Erfassung erfolgt berührungslos durch mobile Messsysteme (Ausnahme Griffigkeit). Die Erfassung der Querebenheit erfolgt gemäß der aktuellen Technischen Prüfvorschrift (TP) Ebenheit, Teil berührungslose Messungen aus dem Jahr 2009 (FGSV 2009).

Anforderungen an das Messsystem umfassen: Messbreite auf Bundesautobahnen von 3,20 m (Bundesstraßen 3,00 m), Punktabstand im Querprofil von 10 cm und eine Punktgenauigkeit der Einzelmessung von 0,2 mm.

Das hier präsentierte Messfahrzeug setzt auf den Pavement Profile Scanner PPS des Fraunhofer IPM für die Erfassung der Querebenheit. Der PPS misst die Entfernung zur Straßenoberfläche zwei Millionen Mal pro Sekunde. Dabei bewegt ein schnell drehender Spiegel den Laserstrahl 800-mal pro Sekunde über die Straße, um dabei jeweils ein Querprofil mit 1800 Messpunkten aufzunehmen. Der Scanwinkel beträgt 70°; die Montagehöhe des Scanners bestimmt daher die maximale Breite der gescannten Fläche (Fahrbahn). Die Anforderungen an die Genauigkeit sind zudem sehr hoch. Die Querebenheitsmessung muss mit einer Messunsicherheit deutlich unter einem Millimeter durchgeführt werden. Für die Sensorik bedeutet dies, dass die Messungen im Zehntel-Millimeter-Bereich erfolgen müssen.

Für die Erfassung der Längsebenheit sind an einem Längsmessbalken, der auf der Unterseite des Fahrzeuges in der rechten Rollspur montiert ist, vier Triangulationssensoren angebracht. Diese sind an den Positionen 0 cm, 10 cm, 100 cm und 200 cm (von vorne nach hinten) auf einer geraden Linie entlang der Fahrrichtung positioniert. Jeder Sensor misst die Distanz zur Straßenoberfläche mit einer Frequenz von 4 kHz und einer Auflösung von mindestens 0,05 mm.

Da die Sensoren auf der Fahrzeugunterseite montiert sind, können hier Laser der Laserklasse 3 verwendet werden, ohne die Augensicherheit umgebender Passanten zu gefährden. Dies ermöglicht die hohe Abtastrate, selbst bei starker,



Abb. 1:
Messfahrzeug von hinten mit dem Sensoraufbau im oberen Bereich und den LEDs für die Ausleuchtung der Straße im unteren Bereich



Abb. 2:
Messfahrzeug von vorne mit Sensoraufbau im oberen Bereich. Nicht sichtbar ist das System für die Erfassung der Längsebene unterhalb des Fahrzeugs.

seitlicher Sonneneinstrahlung. Die so erfassten Messdaten ermöglichen eine Analyse der Längsebene nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM – High Speed Road Monitoring) (Neubeck 2015).

Für die Erfassung der Substanzmerkmale verfügt das Fahrzeug über zwei Flächenkameras, welche an der Rückseite des Fahrzeugs verbaut sind (auf Dachhöhe). Die Kameras sind von oben, mit leichtem Winkel nach außen geneigt, auf die Straßenoberfläche ausgerichtet (Abb. 1), sodass sich die Bildbereiche in der Mitte überlappen. Insgesamt wird eine Fahrbahnbreite von 4,5 m von den Kameras erfasst.

Um bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h ein scharfes Abbild der Straßenoberfläche zu erhalten, muss die Belichtungszeit gering gehalten werden. Dies wird dadurch ermöglicht, dass sieben LED-Beleuchtungspanele an der unteren Fahrzeugrückseite (Abb. 1) für eine helle, homogene Ausleuchtung der abzubildenden Oberfläche sorgen. Dies erlaubt eine Belichtungszeit von 50 µs. Bildaufnahme und Beleuchtung werden alle 3 cm getriggert. Die Kameras nehmen Bilder über die volle Breite, jedoch nur 3,6 cm Länge (entlang der Fahrtrichtung) auf. So kann die hohe Bildfrequenz realisiert werden und die Ausleuchtung muss

nur für einen schmalen Streifen optimiert sein. Die Blende der Objektive ist so eingestellt, dass sowohl die Fahrbahnmitte als auch der Außenbereich scharf abgebildet werden.

In einem nachgelagerten Verarbeitungsschritt werden die aufgenommenen Bildausschnitte zu Oberflächenbildern von 10 m Länge und 4,5 m Breite verrechnet.

2.2 Erfassung der Straßenumgebung

Für die Erfassung des Straßenumfelds wird eine Kombination aus Laserscanner und Kameras verwendet. Das System umfasst den High-End-Laserscanner CPS (Clearance Profile Scanner) des Fraunhofer IPM, welcher den Objektabstand im Winkelbereich von 0° bis 355° nahezu senkrecht zur Fahrtrichtung misst. Der CPS zeichnet sich durch eine Messfrequenz von 2 Millionen Messpunkten pro Sekunde und eine Scanfrequenz von 200 Hz bei einer Einzelpunktgenauigkeit von ca. 3 mm (Präzision abhängig von der Reflektivität der Objektoberfläche) aus.

Um eine bildliche Darstellung der Umgebung zu generieren und zur Texturierung der Punktwolke mit Farbinformationen, werden vier hochauflösende Kameras eingesetzt. Zusätzlich sind zwei Panoramakameras integriert, welche im Postprocessing einen schnellen Überblick über die Gegebenheiten vor Ort ermöglichen. Die vier Kameras erzeugen Bilder mit einer Auflösung von 5 Megapixel, die Panoramabilder haben 30 Megapixel. Alle Kameras können zeit- oder weggesteuert ausgelöst werden – typischerweise werden alle 5 m Bilder erzeugt.

2.3 Weitere Systeme

Da die 3D-Messsysteme (Laserscanner) auf einem fahrenden Fahrzeug montiert sind, enthalten diese 3D-Daten zunächst alle Fahrzeuggbewegungen wie zum Beispiel Einfederung oder Schwingungen. Diese Bewegungen sind um ein Vielfaches größer als die geforderte Genauigkeit der Ebenheits- oder Umgebungs-messung und müssen daher mit mindestens der gleichen Präzision erfasst und rechnerisch kompensiert werden. Durch Einsatz eines inertialen Messsystems kann eine entsprechende Korrektur (Fahrzeuggbewegungen werden von den Messdaten rechnerisch getrennt) der Daten vorgenommen werden. Durch die zusätzliche Verwendung eines GNSS-Systems können die Daten in der Welt referenziert werden. Am Ende liegen präzise Informationen über Fahrbahnunebenheiten in Längs- und Querrichtung vor. Zudem lassen sich 3D-Daten der Umgebung georeferenziert errechnen.

Um dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, sich auf den Verkehr konzentrieren zu können, wurde eine Spurhaltekamera in das System integriert. Über eine entsprechende Visualisierung wird der Fahrer in einem konstanten Abstand zum Seitenstreifen der Straße geführt.

2.4 Datenmengen

Die aufgezeichneten Datenmengen pro Kilometer sind sehr umfangreich, was es bei der Auslegung der Computer-Infrastruktur des Fahrzeugs zu berücksichtigen gilt. Tab. 1 gibt einen Überblick über die erzeugten Datenmengen der Systemeinheiten.

Tab. 1: Datenmengen der Systemeinheiten des Messfahrzeugs in Gigabyte pro Kilometer

Systemeinheit	GB pro km
4 Längsebenheitslaser	0,02
PPS*	3,3
2 Oberflächenkameras	14,5
CPS*	5,4
4 Umgebungskameras	3,5
2 Panoramakameras	12,1

* Durchschnittswerte in der Stadt,
da die Systeme kontinuierlich und
nicht weggetriggert aufzeichnen.

3 Kalibration

Bei der Kalibration des Messsystems unterscheiden wir zwischen den Kalibrationen der einzelnen Sensoren (z. B. Kameras, Laserscanner etc.) und der Kalibration des Gesamtsystems. Im Nachfolgenden sollen diese Prozesse als innere und äußere Kalibration bezeichnet werden.

3.1 Innere Kalibration

a) Kalibration der Laserscanner

Bei der Kalibration des Laserscanners wird eine mathematische Funktion ermittelt, die Distanz-, Winkel- und Intensitätsabhängigkeit der Messungen modelliert. Damit kann nach der Kalibration aus diesem Modell für beliebige Mes-

sungen in Abhängigkeit von diesen Größen die entsprechende Messunsicherheit ermittelt und zur Korrektur der gemessenen Werte herangezogen werden.

Der optische Aufbau und die Eigenschaften der elektronischen und optoelektronischen Komponenten eines Laserscanners sind hochkomplex, sodass jedes System individuelle Eigenschaften aufweist. Beispiele für mögliche Einflussfaktoren auf das Messresultat sind die optische Abbildung auf die Detektoroberfläche, die Ladungsträgerlaufzeit durch verschiedene Bereiche des Detektors, der Einfluss der analogen elektronischen Beschaltung oder die nicht-linearen Änderungen des Verhältnisses von Komponenten unter Temperatureinfluss.

Daneben gibt es Effekte, die zu veränderlichen nicht reproduzierbaren Distanzfehlern führen. Dies kann beispielsweise das zeitabhängige elektronische Rauschen oder auch die Änderung der Ausleuchtung des Detektors durch verschiedene Interferenzmuster bei Änderung der angestrahlten Oberfläche sein.

Es ist nicht immer klar, in welche Klasse beobachtete Effekte fallen und über welche Parameter sie im Messfehlermodell ggf. berücksichtigt werden können. Ebenfalls können Effekte, die eigentlich als stabil und damit gut charakterisierbar gelten, mit der Zeit und der Alterung von Bauteilen eine gewisse Dynamik entwickeln. Daher ist es nicht immer die richtige Strategie, das Messfehlermodell durch lange Messreihen (typischerweise auf einen Punkt) zu ermitteln. In jedem Fall sollten immer veränderliche Messfehler mitberücksichtigt werden.

Es verbleibt damit immer ein Rest von Unsicherheit hinsichtlich der Berücksichtigung aller Faktoren. Häufig verbleiben systematische Effekte in der Größenordnung von ca. 30 % der Standardabweichung einer Abstandsmessung.

b) Kalibration der Kameras

Bei der Kalibration der Kameras werden nach dem Stand der Technik die geometrischen und radiometrischen Modellparameter bestimmt. In der Literatur finden sich eine ganze Reihe unterschiedlicher Methoden und Prozesse, um je nach Anwendung eine effiziente Kalibration durchführen zu können. Für das Messsystem, wie es hier präsentiert wurde, erfolgt die geometrische Kamera-Kalibration als Teil der äußeren Orientierung durch das Erfassen von bekannten 3D-Punkten (siehe Abschnitt 3.2).

c) Kalibration der inertialen Messeinheit

Die inertielle Messeinheit wird als Black-Box-System verwendet. Eine Kalibration der inneren Parameter ist durch den Hersteller gegeben. Die Kalibration der externen Parameter und eine Bestimmung der Translations- und Rotationsparameter aller Sensoren im Verhältnis zur inertiellen Messeinheit erfolgt als Teil der äußeren Kalibration (siehe Abschnitt 3.2).

3.2 Äußere Kalibration

Den Startpunkt für die äußere Kalibration bildet die grobe Information der Position und Ausrichtung der einzelnen Sensoren. Diese Information kann entweder messtechnisch erfasst werden (Angaben auf einige Zentimeter reichen aus) oder über eine Konstruktionszeichnung bestimmt werden.

Für die Erfassung der entsprechenden äußeren Kalibrationsparameter wurde am Fraunhofer IPM ein Prozess entwickelt, der einen Lasertracker, ein frei bewegliches Koordinatenmessgerät und eine spezielle Zieltafel nutzt.

Mit dem frei beweglichen Koordinatenmessgerät, welches über einen Lasertracker kontinuierlich verfolgt wird, werden die Sichtbereiche der jeweiligen Sensoren abgeschritten. Dabei wird darauf geachtet, dass der gesamte Sichtbereich in unterschiedlichen Entfernungen abgedeckt wird. Die Zieltafel kann dabei kontinuierlich bewegt werden (siehe Abb. 3).

Im Fall der Einzel- und der Panoramakameras wird in den erfassten Bildern die Zieltafelposition automatisiert erkannt und mit den räumlichen Koordinaten und Orientierungsparametern aus dem Lasertracker verknüpft. Diese Verknüpfung gelingt, da sowohl Lasertracker als auch Kameras mit einem hochgenauen Zeitsignal (Fehler < 1 μ s) versorgt werden. Ein Optimierungsalgorismus rechnet dann die entsprechenden Orientierungsparameter für die Kameras inkl. der Verzeichnung. Pro Kamera empfiehlt es sich um die 500 Punkte gleichmäßig über das gesamte Gesichtsfeld verteilt zu erfassen. Eine Darstellung der Bewegung des Targets durch eine Serie von Einzelbildern ist in Abb. 4 dargestellt. Ein Bild aus der Kalibration der Panoramakamera findet sich in Abb. 5.

Um alle Sensoren des Fahrzeugs mit dieser Methode kalibrieren zu können, muss die Position des Lasertrackers gewechselt werden. Die Verknüpfung der einzelnen Standpunkte erfolgt über die Nutzung eines Koordinatenfeldes im Labor (ausgestattet mit „Nestern“ für die Aufnahme spezieller Reflektoren).

Bei der Kalibration der Laserscanner wird die kreisrunde Zieltafel aus Abb. 3 durch eine flächenmäßig größere Zieltafel ersetzt. Die Fläche wird in einem spe-

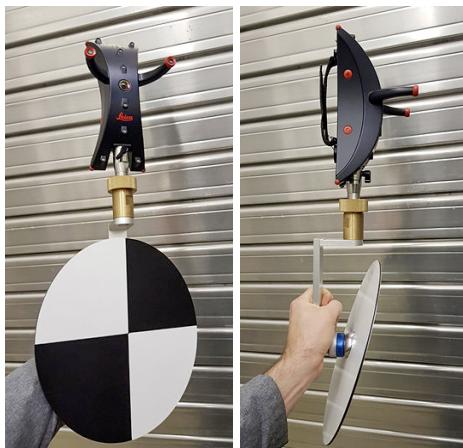


Abb. 3: Zieltafel gekoppelt mit frei beweglichem Koordinatenmessgerät

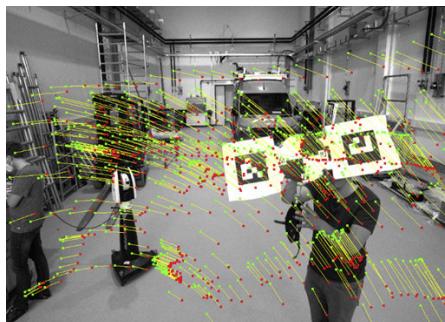


Abb. 4:
Bewegung der Zieltafel in einer Serie von Einzelbildern. Die Punkte stellen die gemessenen Mittelpunkte der Zieltafel dar, wobei die roten Punkte vom Lasertracker stammen, die grünen aus den Kamerabildern. In Gelb sind die entsprechenden Reprojektionsfehler dargestellt.

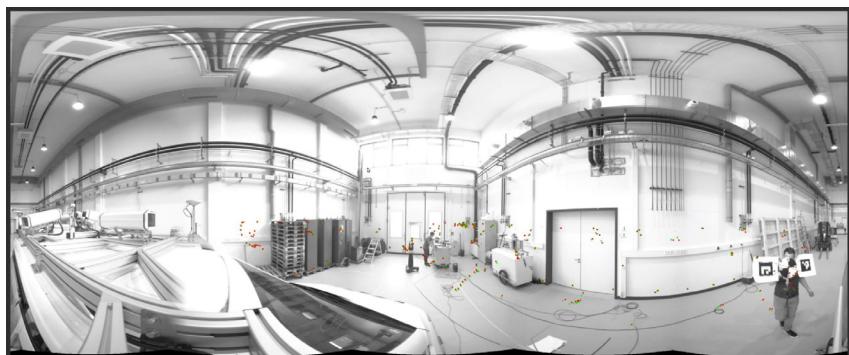


Abb. 5: Bild aus der Panoramakamera im Zuge der Kalibration. Der Farbcode der dargestellten Punkte ist identisch zu dem in Abb. 4.

ziellen Arbeitsschritt mit dem Lasertracker bestimmt. Im Falle des Laserscanners können somit nicht nur die äußeren Orientierungsparameter bestimmt werden, sondern auch die Spiegelfacettenkorrektur.

Für die äußere Kalibration der inertialen Messeinheit fährt das Fahrzeug auf einem speziellen Parcours des Fraunhofer IPM. Koordinativ bekannte Punkte werden in den Bildern und im Laserscan identifiziert. In einem nachgelagerten Prozess wird die Gesamtanordnung der Sensoren gegenüber der inertialen Messeinheit mittels eines Optimierungsalgorithmus virtuell verschoben und verdreht bis die Datenströme bestmöglich zueinander passen. Aus dieser Verschiebung und Verdrehung ergeben sich dann die äußeren Kalibrationsparameter der inertialen Messeinheit.

In einem finalen Schritt werden Translation und Rotation aller Sensoren gegenüber der inertialen Messeinheit bestimmt und in eine Kalibrationsdatei übertragen.

4 Evaluierung der Kalibration

Die Evaluierung eines komplexen Multisensorsystems kann auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden. Am Fraunhofer IPM hat sich gezeigt, dass die beste und für den Anwendenden gewinnbringendste Evaluierung durch die Befahrung eines eigenen Testparcours erreicht werden kann. Dazu haben wir in Freiburg auf einer Strecke von 5 km verschiedene markante Objekte wie Laternenpfosten, Hauskanten, Gullideckel etc. hochgenau eingemessen. Diese dienen als Referenzobjekte.

Wichtig dabei ist, dass die Objekte in unterschiedlichen Abständen und in unterschiedlichen Höhen zu finden sind, sodass die Evaluierung tatsächlich den gesamten 3D-Raum abbildet. Ebenfalls entlang des Parcours finden sich Objekte, die sich besonders gut dazu eignen, die äußere Orientierung der Kameras und Laserscanner zu prüfen. Ideal sind dafür Oberleitungsdrähte von Straßenbahnen oder vertikale Masten. Bereits mit dem freien Auge kann geprüft werden, ob



Abb. 6:
Überprüfung der
Kalibration des Gesamt-
systems. Besonders gut
geeignet für die Prüfung
sind schmale Objekte wie
Oberleitungen, Masten
etc. Die Punktwolke des
Laserscanners (schwarze
Punkte) und die Bilder
sollten möglichst de-
ckungsgleich sein.

Punktwolke und Bilder zueinander passen und sich in den markanten Objekten überlagern – siehe Abb. 6.

Um den Einfluss von GNSS zu berücksichtigen, wird der Parcours typischerweise mehrmals und in unterschiedlichen Richtungen befahren. Jede Messfahrt wird dann einzeln ausgewertet. Erst wenn alle Messfahrten und die dazugehörigen Datenvergleiche innerhalb der vorgegebenen Spezifikationen sind, wird das Gesamtsystem für den Einsatz in der Praxis frei gegeben.

Dieses aufwändige Prüfverfahren inklusive der Überprüfung aller Sensoren wird einmal im Jahr durchgeführt. Wenn einzelne Sensoren Auffälligkeiten aufweisen, wird eine Kalibration des Sensors durchgeführt. Das gleiche gilt für das Gesamtsystem. Eine Kalibration erfolgt, sobald festgestellt wird, dass einzelne Datenströme nicht mehr perfekt zueinander passen. Durch den mecha-

nisch stabilen Aufbau des Gesamtsystems hat sich gezeigt, dass die Kalibration typischerweise erst nach drei Jahren wiederholt werden muss (Erfahrungswert aus einer jährlichen Fahrstrecke von 50.000 km pro Fahrzeug). Abhängig ist dies jedoch von der mechanischen Beanspruchung des Messfahrzeugs, zum Beispiel durch die Fahrt durch Schlaglöcher, Buckelpisten etc.

5 Schlussbemerkung und Ausblick

Abschließend kann gesagt werden, dass mit dem von Fraunhofer IPM entwickelten Konzept und dem darauf aufbauenden Gesamtsystem im Zusammenspiel mit entsprechender Auswertesoftware ein einmaliges Messsystem zur Verfügung steht. Dieses Messfahrzeug ermöglicht eine präzise Abtastung der Straßenoberfläche und -umgebung (die Kombination von zwei Oberflächenkameras, Oberflächenscanner, Umgebungskameras, Umgebungsscanner und zwei Panoramakameras ist weltweit einzigartig) bei hohen Geschwindigkeiten und kann gleichzeitig die von der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt geforderten Genauigkeiten erreichen (der erforderliche Zulassungsprozess ist zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Beitrages noch nicht abgeschlossen).

Es zeigt sich auch, dass der Kalibration der einzelnen Komponenten, aber auch des Gesamtsystems eine zentrale Rolle zukommt: Ohne eine hinreichend genaue Kalibration lässt sich das Potenzial der umfangreichen Datenströme nicht ausreizen. Es wird aber auch deutlich, dass ein Multisensorsystem nur mit sehr großem Aufwand hinreichend genau kalibriert werden kann. Daher haben wir am Fraunhofer IPM versucht, die Vorgänge so weit zu automatisieren und zu vereinfachen, dass ein komplettes Messsystem mit den oben angeführten Sensoren in einem Tag kalibriert werden kann. Ein weiterer Tag ist dann für die Evaluierung der Daten notwendig.

Neben der Kalibration steht die Nutzung der Daten in der Zukunft noch weiter im Fokus. Durch eine möglichst flexible Datenaufnahme können in Zukunft ein Reihe von spannenden Problemstellungen adressiert werden:

- Betrachtung der Straßenebenheit in 3D: Derzeit erfolgt die Betrachtung der Straßenebenheit getrennt in Längs- und Querrichtung. Die Anregung der Fahrzeuge erfolgt jedoch aus einer Überlagerung beider Ebenen. Für spezifische Aufgabenstellungen (z.B. Aquaplaningstudien) kann die Betrachtung des tatsächlichen 3D-Oberflächenmodells Sinn ergeben.
- Nutzung der Intensitätswerte für die Bildauswertung: Neben der Entfernungsmessung steht beim Laserscanning auch ein Intensitätswert bei jeder Messung zur Verfügung. Dieser lässt sich wie ein Grauwert eines Bildes interpretieren. Bisherige Untersuchungen des Fraunhofer IPM zeigten, dass es mit einem hochauflösenden Laserscanner zwar möglich ist, ein hochauflö-

sendes Straßenoberflächenbild zu erzeugen (eine räumliche Auflösung von $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ konnte nachgewiesen werden), Risse jedoch auf Grund des physikalischen Grundprinzips (Beleuchtung und Aufnahme aus der gleichen Richtung) im 2D-Intensitätsbild schwer oder gar nicht sichtbar werden. Durch eine Umsetzung einer hochauflösenden 3D-Messung könnte eine Datenqualität ermöglicht werden, die auch die Risserkennung aus einem Laserscanner zulässt, da neben der reinen 2D-Information dann auch die 3D-Information zur Verfügung steht. Offen ist noch, ob dies aufgrund der Spotgröße des Lasers zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen wird.

- Automatisierte Datenauswertung: Die Fusion von Bild- und Scandaten lässt eine weitgehend vollautomatisierte Auswertung der erfassten Daten zu. Ein solcher Prozess wurde vom Fraunhofer IPM für eine spezifische Aufgabenstellung (für die Deutsche Telekom) bereits realisiert und steht seit kurzem auch als *Software-as-a-Service* zur Verfügung. Dieser Prozess kann auch auf andere Anwendungsfälle übertragen werden, u. a. die automatisierte Schadstellenerkennung auf der Straßenoberfläche – ein entsprechendes Forschungsprojekt läuft aktuell am Fraunhofer IPM und kommt Mitte 2022 zum Abschluss.

Literatur

Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009): Technische Prüfvorschrift zur Messung der Ebenheit. Teil berührungslose Messungen. Bonn.
Neubeck, J., Wiesebrock, A. (2015): Längsebenheitsmesssysteme. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 92, November 2015.

Kontakt

Prof. Dr. Alexander Reiterer
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg
alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de

Session 2:

Prüfung und Kalibrierung von geodätischen Instrumenten

Zur Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des TLS-Prüfverfahrens nach ISO 17123-9

Franziska Altemeier | Bianca Gordon | Peter Wasmeier | Ingo Neumann

1 Einleitung

Mit der Etablierung des terrestrischen Laserscannings als gängiges Messverfahren auch für Anwendungen, in denen Genauigkeiten in der Größenordnung von wenigen Millimetern oder genauer gefordert werden, ergab sich die Notwendigkeit ein standardisiertes Verfahren zur Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit der eingesetzten Instrumente zu entwickeln. Seit 2018 steht mit der ISO-Norm 17123-9 ein standardisiertes Prüfverfahren zur Verfügung, um im Felde den Einfluss systematischer Messfehler und -abweichungen, die sich aus dem Gerät ergeben, erkennen und die Einsatzfähigkeit des untersuchten Instruments beurteilen zu können. Dies fördert neben einer qualitativ hochwertigeren Vorgehensweise auch den wirtschaftlichen Einsatz des terrestrischen Laserscannings.

In diesem Beitrag werden zum einen Untersuchungen auf theoretischer Ebene zur Leistungsfähigkeit dieser standardisierten Prüfung vorgestellt und zum anderen die Praxistauglichkeit des Verfahrens unter Verwendung verschiedener Instrumente und Auswertesoftware analysiert.

2 Das TLS-Prüfverfahren nach ISO 17123-9

Die ISO-Norm 17123-9 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 9: Terrestrial laser scanners stellt ein standardisiertes Feldprüfverfahren für terrestrische Laserscanner (TLS) zur Verfügung, welches dem Anwender die Überprüfung der Einhaltung konkreter Genauigkeitsanforderungen ermöglicht sowie andernfalls die Notwendigkeit einer herstellerseitigen Kalibrierung bzw. Justierung aufzeigt. In die Erarbeitung dieses international anerkannten Standards flossen Erkenntnisse aus vorangegangenen Untersuchungen (z. B. Feldmann et al. 2011, Staiger und Heister 2013), Prinzipien und Empfehlungen aktueller Regelwerke (GUM 2008, ISO 17123-4 2012) sowie Diskussionsbeiträge verschiedener Gremien ein, die tlw. in ähnlicher Form bereits 2014 im DVW-Merkblatt „Verfahren zur standardisier-

ten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)“ verschriftlicht wurden. Darüber hinaus umfasst die ISO-Norm neben einem vollständigen auch ein vereinfachtes Verfahren sowie eine umfassendere Berücksichtigung von Messunsicherheiten.

Als Feldprüfverfahren wurde bei der Konzeption auf eine gute Realisierbarkeit geachtet. Im Detail bedeutet dies, dass die Prüfung unabhängig vom Messprinzip des Laserscanners und innerhalb eines halben Arbeitstages mit Standardausrüstungsgegenständen wie Stativen und Zielzeichen durchführbar ist. Das vorliegende Prüfverfahren reagiert sensitiv auf zahlreiche Instrumentenabweichungen, insbesondere Abweichungen der Achsgeometrie, Abweichungen der internen Laserstrahlrichtung und konstante Abweichungen des Distanzmessers. Jedoch findet keine explizite Feststellung von konkreten Instrumentenabweichungen statt. Stattdessen erhält der Anwender als Ergebnis eine Ja-/Nein-Aussage bezüglich der Tauglichkeit des Laserscanners für zukünftige Messaufgaben. Lediglich auf eine konstante Abweichung der Distanzmessung kann gegebenenfalls geschlossen werden. Da bewusst auf Sollwerte oder Messungen mit Instrumenten übergeordneter Genauigkeit verzichtet wird, kann der Maßstab der Distanzmesseinheit nicht überprüft werden. Die ISO-Norm verweist diesbezüglich ebenso auf die Arbeiten von Feldmann et al. (2011) sowie Staiger und Heister (2013).

2.1 Durchführung der Feldprüfung

Zur Feldprüfung des Laserscanners nach der ISO-Norm 17123-9 ist der in Abb. 1 (links) dargestellte Messaufbau vorgesehen. Die Konfiguration besteht aus vier Zielmarken (Targets T1-T4), die gemeinsam mit den beiden TLS-Standpunkten (S1, S2) in zwei möglichst rechtwinkligen Dreiecken angeordnet werden. Die Ausdehnung des Messaufbaus ergibt sich in Abhängigkeit der für das zu prüfende Instrument empfohlenen maximalen Messdistanz auf Zielzeichen (d_m), welche die Länge der Hypotenuse $\overline{S1T3}$ im horizontalen Dreieck vorgibt. Für die Aufdeckung von Abweichungen im Achssystem des TLS ist insbesondere die Höhe des Zielzeichens T4 relevant. Dieses soll daher in einer möglichst hohen Position angebracht werden, so dass es vom Standpunkt S1 mit einer Elevation von mindestens 27° (30 gon) beobachtet werden kann.

Die Zielzeichen sind von beiden Standpunkten aus einfach (vereinfachtes Verfahren) bzw. dreifach (vollständiges Verfahren) so zu scannen, dass die Zielmarken T2, T3 und T4 in jeweils unterschiedlichen Scannerlagen erfasst werden. Bei einem „Full Dome“-Scan wird dies durch die in Abb. 1 rechts dargestellte empfohlene Anfangsorientierung des TLS auf dem jeweiligen Standpunkt erreicht. Durch die drei gemessenen Sätze ermöglicht das vollständige Verfahren

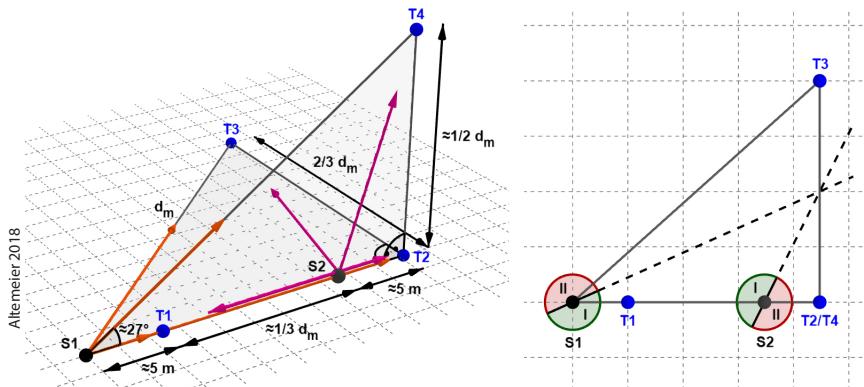


Abb. 1: Messkonfiguration (links) und empfohlene Anfangsorientierung des TLS auf den beiden Standpunkten (rechts) nach ISO 17123-9 mit S1, S2: Instrumentenstandpunkte; T1, T2, T3, T4: Zielmarken; d_m : maximale Distanz, I: Lage 1, II: Lage 2

zusätzlich zu einer Beurteilung der Präzision des TLS die Durchführung weiterer statistischer Tests.

2.2 Auswertung der Messungen

Anhand der Punktwolken sind die Zielzeichenzentren mit der projektrelevanten Software zu bestimmen, wobei eine Ausreißerelimination berücksichtigt werden soll. Somit liegen schließlich für jeden Standpunkt die kartesischen Koordinaten der Zielzeichen vor.

Zur Detektion etwaiger Instrumentenabweichungen sind dann für jeden Standpunkt anhand der kartesischen Koordinaten Strecken zwischen den Zielzeichen als euklidische Distanzen zu ermitteln. Im Zuge des vollständigen Verfahrens werden diese anschließend über die drei Sätze gemittelt. Aus den sechs Strecken zwischen den Zielzeichen werden schließlich die Streckendifferenzen $\Delta_{1,2}$, $\Delta_{1,3}$, $\Delta_{1,4}$, $\Delta_{2,3}$, $\Delta_{2,4}$, und $\Delta_{3,4}$ zwischen den Standpunkten berechnet, welche zur Beurteilung des TLS herangezogen werden.

Die Konfiguration des Testfeldes bewirkt, dass sich mögliche Abweichungen in der Distanzmesseinheit, im Achssystem oder in der internen Laserstrahlrichtung des Laserscanners auf die Beobachtungen der beiden unterschiedlichen Standpunkte unterschiedlich stark auswirken. Somit können signifikante Instrumentenabweichungen durch Vergleich der zu Standpunkt S1 gehörenden Strecken mit den Strecken, die sich für Standpunkt S2 ergeben, detektiert werden. Folglich deutet eine signifikante Streckendifferenz auf eine vorliegende Instrumentenabweichung hin.

2.3 Beurteilung des Prüfergebnisses

Zur Beurteilung der Signifikanz der Streckendifferenzen ist eine Vergleichsgröße U_{Δ} zu definieren, die als erweiterte Messunsicherheit einer Streckendifferenz zu verstehen ist. Sie wird anhand der standardisierten Messunsicherheit der Zielmarkenzentren u_T durch Unsicherheitsfortpflanzung und mit Berücksichtigung des Erweiterungsfaktors k bestimmt nach $U_{\Delta} = k \cdot 2 \cdot u_T$.

Die Unsicherheit der Zielmarkenzentren ist durch den Anwender festzulegen. Hierfür wird empfohlen, sämtliche verfügbaren Informationen, wie z. B. Herstellerangaben, Wiederholpräzision der Zielzeichen aus Mehrfachmessungen und eigene Erfahrungswerte zur Festlegung der Unsicherheit zu nutzen und nach GUM (2008) zu einer kombinierten Standardunsicherheit u_T zusammenzufassen. Die ISO-Norm 17123-9 unterscheidet hierzu drei Varianten je nach Verwendung von Typ A- und/oder Typ B-UNSicherheitskomponenten und demonstriert die jeweilige Berechnung exemplarisch für das vollständige Prüfverfahren.

Liegt die Vergleichsgröße U_{Δ} vor, kann die Beurteilung des untersuchten Laserscanners stufenweise erfolgen. In einem ersten Schritt wird zunächst die Streckendifferenz $\Delta_{1,2}$ betrachtet. Übersteigt sie den Vergleichswert, ist von einer signifikanten Abweichung in der Distanzmessung auszugehen. In diesem Fall kann keine Beurteilung zu weiteren Abweichungen erfolgen, da ihre etwaigen Einflüsse vom Einfluss der Distanzmessabweichung überlagert werden.

Ist die Streckendifferenz $\Delta_{1,2}$ kleiner als die Vergleichsgröße U_{Δ} , sollten in einem zweiten Schritt die weiteren Streckendifferenzen $\Delta_{1,3}, \Delta_{1,4}, \Delta_{2,3}, \Delta_{2,4}$ und $\Delta_{3,4}$ betrachtet werden. Übersteigt eine dieser Streckendifferenzen den Vergleichswert, ist von einer Abweichung der Drehkreisrichtung oder des Kippwinkels auszugehen und es empfiehlt sich eine Kalibrierung durch den Hersteller. Die endgültige Entscheidung für einen Herstellereingriff ist jedoch erst nach Wiederholung des Ergebnisses durch eine zweite Messung zu empfehlen.

3 Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit

Basierend auf dem vorgestellten TLS-Prüfverfahren werden in diesem Kapitel Untersuchungen auf theoretischer Ebene zur Sensitivität des Verfahrens vorgestellt, um die Auswirkungen ausgewählter systematischer Messabweichungen auf die Messgrößen des TLS sowie die im Rahmen der Prüfung abgeleiteten Streckendifferenzen und damit letztendlich den Ausgang des Feldprüfverfahrens abschätzen zu können.

3.1 Sensitivitätsanalyse für das Feldprüfverfahren

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird untersucht, inwiefern sich Variationen der Konfiguration des vorgesehenen Testfelds sowie sechs systematische Messabweichungen aus dem etablierten geometrischen Fehlermodell von Muralikrishnan et al. (2015) einzeln und in Kombination auf das Prüfergebnis auswirken. Zu diesem Zweck wird das Feldprüfverfahren nach ISO 17123-9 in einer Closed-Loop-Simulation mit der Software MATLAB umgesetzt, so dass verschiedene Größenordnungen der Parameter des Fehlermodells bei unterschiedlichen Messkonfigurationen analysiert werden können.

3.1.1 Fehlermodell

Die Ursachen für systematische Messabweichungen bedingt durch die opto-mechanische Konstruktion eines TLS wie Offsets, Exzentrizitäten und Neigungen sind vielfältig. Muralikrishnan et al. (2015) unterscheiden diesbezüglich insgesamt 18 Einflussgrößen und vereinen diese in ihrem geometrischen Fehlermodell. Die Untersuchung dieser Parameter erfordert zum Teil spezifische Testanordnungen, die durch die vorgestellte Messanordnung nach ISO 17123-9 nicht abgedeckt werden und den Anspruch eines Feldprüfverfahrens übersteigen. Aus diesem Grund wird sich im Rahmen der Sensitivitätsanalyse auf die sechs dominierenden und in Tab. 1 aufgeführten Einflussgrößen beschränkt. Dabei wirken sich die ersten fünf Instrumentenabweichungen auf die horizontale (Hm) bzw. vertikale (Vm) Richtungsmessung aus, während der sechste Parameter einzig die Streckenmessung (Rm) beeinflusst.

Tab. 1: Untersuchte geometrische Instrumentenabweichungen nach Muralikrishnan et al. (2015, S. 4 ff.)

Parameter	Beschreibung	Beeinflusste Messgröße
x_4	Indexabweichung des Vertikalkreises	Vm
x_{5n}	Strahlneigung in horizontaler Richtung	Hm, Vm
x_{5z}	Strahlneigung in vertikaler Richtung	Hm, Vm
x_6	Zielachsabweichung	Hm
x_7	Kippachsabweichung	Hm
x_{10}	Additionskonstante	Rm

Damit ergeben sich als das der Simulation zugrunde liegende Fehlermodell nach Muralikrishnan et al. (2015) folgende Zusammenhänge zwischen den wahren, d.h. korrigierten Messelementen (R, H, V), den gemessenen Werten (Rm, Hm, Vm) und den additiven Korrekturtermen ($\Delta Rm, \Delta Hm, \Delta Vm$):

$$R = Rm + \Delta Rm \text{ mit } \Delta Rm = x_{10}, \quad (1)$$

$$H = Hm + \Delta Hm \text{ mit } \Delta Hm = l_{1,2} \left(\frac{x_{5z}}{\tan Vm} + \frac{2x_6}{\sin Vm} - \frac{x_7}{\tan Vm} \right) + x_{5n}, \quad (2)$$

$$V = Vm + \Delta Vm \text{ mit } \Delta Vm = l_{1,2} (x_4 + x_{5n} \cos Vm) + (-x_{5z} \sin Vm). \quad (3)$$

Der Faktor $l_{1,2}$ in (2) und (3) dient hierbei zur Berücksichtigung der Lage, in der die TLS-Messung erfolgt und wird für Messungen in erster Lage $l_1 = 1$ und für Messungen in zweiter Lage $l_1 = -1$ gesetzt.

3.1.2 Closed-Loop-Simulation

Die implementierte Simulation des Feldprüfverfahrens erlaubt die Modellierung unterschiedlicher Konfigurationen des Messaufbaus sowie die Berücksichtigung von zufälligen und systematischen Messabweichungen. Abb. 2 gibt einen Überblick über den Ablauf der Simulation.

Als Eingangsgrößen sind zunächst die maximale Strecke d_m und die Höhe der Zielflage T4 vorzugeben, um die Ausdehnung des Testfelds zu definieren. Zudem können hier verschiedene Abweichungen von der angedachten Konfiguration, z.B. bzgl. der Rechtwinkligkeit der Dreiecke, berücksichtigt werden.

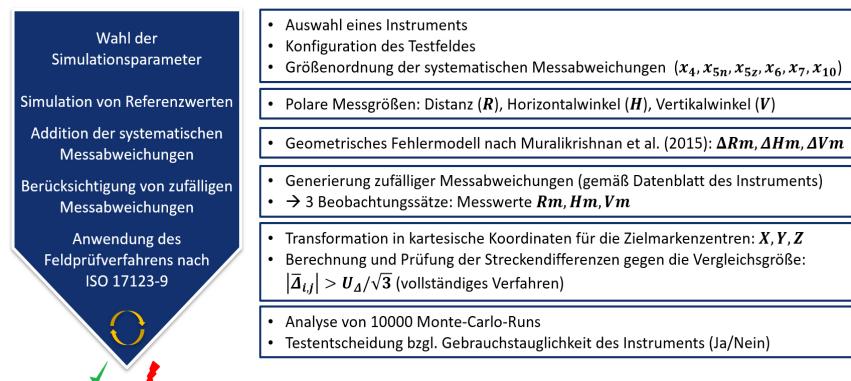


Abb. 2: Ablauf der Closed-Loop-Simulation zur Sensitivitätsanalyse des Feldprüfverfahrens nach Altemeier (2018)

Daneben sind die Größenordnungen der systematischen Messabweichungen des Fehlermodells festzulegen. Für die Berechnung von zufälligen Messabweichungen sind außerdem die Messgenauigkeiten des simulierten TLS relevant.

Anhand der Vorgaben lassen sich die polaren Messelemente (R , H , V) der vier Zielmarkenzentren als Soll-Beobachtungen im lokalen Koordinatensystem des TLS für die beiden Standpunkte berechnen, auf die die Korrekturtermine (ΔR_m , ΔH_m , ΔV_m) zur Berücksichtigung von systematischen Messabweichungen aufgeschlagen werden. Mit der Annahme normalverteilter zufälliger Messabweichungen werden nach Transformation in kartesische Koordinaten (X , Y , Z) schließlich die im vollständigen Verfahren nach ISO 17123-9 geforderten drei Beobachtungssätze je Standpunkt erhalten und das Feldprüfverfahren wird durchgeführt.

Aufgrund der Verwendung normalverteilter Zufallszahlen zur Generierung zufälliger Messabweichungen werden im Rahmen der Simulation 10 000 Wiederholungen durchlaufen. Der Anteil an diesen Wiederholungen, in denen das Instrument als gebrauchstauglich bewertet wird, dient in der Analyse der Ergebnisse als Kennzahl für das jeweils simulierte Szenario.

3.1.3 Ergebnisse aus der Simulation

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die einzelnen Parameter des Fehlermodells auf die zu beurteilenden Streckendifferenzen und das Prüfergebnis bei unterschiedlichen Konfigurationen des Testfelds haben. In diesem Zusammenhang werden beispielsweise die Ausdehnung des Testfelds, die Höhe der Zielmarke T4 sowie Abweichungen weiterer Kriterien des angedachten Messaufbaus variiert. Abb. 3 zeigt exemplarisch die Auswirkungen einer Indexabweichung des Vertikalkreises auf die sechs Streckendifferenzen für eine Variation der Maximalstrecke (d_m) (Abb. 3 links) und eine Variation der Höhe der Zielmarke T4 (h_{T4}) (Abb. 3 rechts).

Der dargestellte Grenzwert für die maximal zulässige Abweichung wurde im Beispiel für einen TLS der Bauart Leica ScanStation P30/P40 mit einer Herstellerangabe zur Genauigkeit der Bestimmung des Zielmarkenzentrums von 2 mm (Leica 2016) abgeleitet. Dieser Wert kann als Unsicherheitskomponente vom Typ B nach ISO 17123-9 als standardisierte Messunsicherheit der Zielmarkenzentren u_T für die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit U_Δ verwendet werden, so dass sich mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$ ein Wert von $U_\Delta = k \cdot 2 \cdot 2 \text{ mm} = 8 \text{ mm}$ ergibt. Die Berücksichtigung der drei gemessenen Sätze im Rahmen des vollständigen Verfahrens liefert den verwendeten Grenzwert von $U_\Delta/\sqrt{3} = 8 \text{ mm}/\sqrt{3} \approx 4,62 \text{ mm}$.

Nur über diesen Vergleichswert hinausgehende Streckendifferenzen werden bei der Beurteilung als signifikant erachtet. Für eine Bejahung der Gebrauchs-

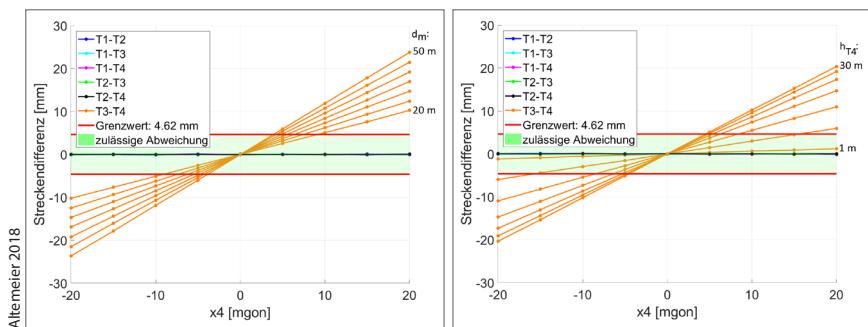


Abb. 3: Einfluss einer Indexabweichung des Vertikalkreises (x_4) auf die Streckendifferenzen für eine variierende Maximalstrecke (d_m) (links) und eine Variation der Höhe der Zielmarke T4 (h_{T4}) (rechts)

tauglichkeit des überprüften TLS ist es erforderlich, dass alle sechs Streckendifferenzen unterhalb der zulässigen Abweichung liegen.

Aus Abb. 3 geht hervor, dass sich die untersuchte Indexabweichung des Vertikalkreises signifikant in der Streckendifferenz zwischen den Targets T3 und T4 ($\Delta_{3,4}$) niederschlägt. Diese Streckendifferenz ist somit sensitiv für eine derartige systematische Messabweichung. Ebenso lassen sich für die weiteren Parameter des Fehlermodells sensitive Streckendifferenzen innerhalb des Testfelds identifizieren, die in Tab. 2 zusammengestellt sind. Die Untersuchungen hierzu zeigen zudem, dass die Messkonfiguration für unterschiedliche Größenordnungen der Parameter sensitiv ist und die Sensitivität für die winkelbeeinflussenden Parameter in der Reihenfolge $x_6 > x_4 > x_7 > x_{5z} > x_{5n}$ abnimmt.

Tab. 2: Einfluss der Parameter des Fehlermodells auf die Streckendifferenzen für eine Messkonfiguration nach ISO 17123-9 mit $d_m = 30$ m und $h_{T4} = 15$ m

	x_4	x_{5n}	x_{5z}	x_6	x_7	x_{10}
$\Delta_{1,2}$	–	–	–	–	–	+
$\Delta_{1,3}$	–	–	–	+	–	+
$\Delta_{1,4}$	–	+	+	–	–	+
$\Delta_{2,3}$	–	–	–	+	–	+
$\Delta_{2,4}$	–	+	–	–	–	+
$\Delta_{3,4}$	+	+	+	+	+	+

Legende: – kein Einfluss + signifikanter Einfluss + dominant

Die Sensitivitätsanalyse für variierende Messkonfigurationen lässt darüber hinaus folgende Trends erkennen:

- Die Sensitivität des Testfelds für einen systematischen Offset bei der Streckenmessung (x_{10}) wird maßgeblich durch die Streckendifferenz $\Delta_{1,2}$ zwischen den Targets T1 und T2 bestimmt und bleibt von der Gesamtausdehnung des Testfelds und der Höhe der Zielmarke T4 weitestgehend unbeeinflusst;
- Mit größerer Ausdehnung des Testfelds verbessert sich die Sensitivität zur Aufdeckung von systematischen Messabweichungen der Art x_4 , x_{5n} , x_{5z} , x_6 und x_7 ;
- Die Höhe der Zielmarke T4 ist von entscheidender Bedeutung für die Sensitivität bezüglich der Parameter x_4 , x_{5n} , x_{5z} und x_7 . Mit größerer Höhe wird die Messkonfiguration zunehmend sensibler und dominiert den Einfluss gegenüber der horizontalen Gesamtausdehnung;
- Eine Vernachlässigung der in der ISO 17123-9 vorgesehenen Zwei-Lagen-Messung auf den beiden verschiedenen Standpunkten (d.h. alle Zielmarken werden in derselben Lage gescannt) bedingt eine stark verminderte Sensitivität der Messkonfiguration für die Parameter x_4 , x_{5n} , x_{5z} , x_6 und x_7 ;
- Geringfügige Abweichungen vom in der ISO 17123-9 vorgesehenen Messaufbau in Hinblick auf die Anordnung der Standpunkte und Zielmarken in rechtwinkligen Dreiecken besitzen vernachlässigbare Einflüsse auf die Sensitivität des Testfelds. Für die praktische Umsetzung des Feldprüfverfahrens kann gefolgert werden, dass ein präzises Einmessen der Standpunkte und Zielmarkenpositionen nicht erforderlich ist.

3.2 Validierung

Die Validierung der simulativ identifizierten Sensitivitäten erfolgt anhand realer Messdatensätze, die von der Firma Leica Geosystems AG bereitgestellt wurden.

Dazu wurden Messungen nach den Vorgaben des Feldprüfverfahrens mit einem kalibrierten TLS der Bauart Leica ScanStation P30/P40 sowie mit bewusst manipulierten Kalibrierparametern durchgeführt, um das

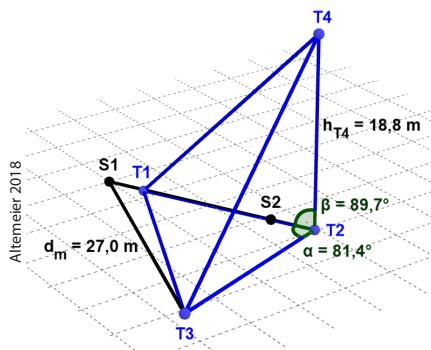


Abb. 4:
Messkonfiguration für die Validierungsdatensätze

Vorhandensein von signifikanten systematischen Messabweichungen – den Parametern x_4 , x_{5n} , x_{52} , x_6 und x_7 entsprechend – zu simulieren. Die insgesamt fünf Datensätze umfassen die für die jeweilige Instrumenteneinstellung ge-scannten und mit der Herstellersoftware bestimmten kartesischen Koordinaten der Zielmarkenzentren in beiden Lagen. Abb. 4 zeigt das genutzte Testfeld, welches die Empfehlungen der ISO 17123-9 im Wesentlichen berücksichtigt.

Die Beurteilung der nach ISO berechneten Streckendifferenzen bestätigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. So überschreiten die für die jeweiligen Parameter identifizierten Streckendifferenzen erwartungsgemäß den Vergleichswert und resultieren in einer Verneinung der Gebrauchstauglichkeit für die Datensätze mit gezielt verfälschten Kalibrierparametern. Auch der Einfluss der Lage, in der die Zielmarken gescannt werden, lässt sich anhand der realen Messdatensätze aufzeigen.

4 Erfahrungen zur Praxistauglichkeit

Die Anforderungen an eine Prüfroutine hinsichtlich der Praxistauglichkeit richten sich in erster Linie danach, dass in möglichst kurzer Zeit mit möglichst wenig Aufwand eine möglichst eindeutige (signifikant verifizierbare) Aussage getroffen werden kann – idealerweise unmittelbar vor Ort. Bekannte Verfahren, wie sie aus dem Nivellement oder der Achsfehlerbestimmung beim Tachymeter bekannt sind, erfüllen diese Anforderungen und können neben dem Prüfaspekt tlw. auch zur Ableitung von Korrekturparametern im Feld herangezogen werden. Aufwand und Ablauf der vorgestellten TLS-Prüfroutine sind davon jedoch klar zu unterscheiden, da diese eine gewisse Planung und Auswertung im Post-processing erfordern.

Da die ausgewerteten Größen der Prüfmessungen zudem nicht unmittelbar am Gerät anfallen, sondern mittels einer Auswerteroutine erst erzeugt werden müssen, sind auch die Einflüsse dieser Auswertungen auf die Resultate zu hinterfragen, um diese nicht falschlicherweise dem Instrument zuzuordnen.

4.1 Testfeld

In Kapitel 3.1.3 wird gezeigt, dass die Sensitivität der Testentscheidung maßgeblich von der Ausdehnung des verwendeten Testfelds und der Existenz eines Hochpunkts T4 abhängig ist. Insbesondere letzterer ist in der Praxis häufig schwierig und im Rahmen einer Feldprüfung am späteren Messort nahezu gar nicht zu installieren. Testfelder für die dargestellte TLS-Prüfung finden sich daher in der Regel reproduzierbar eingerichtet, beispielsweise auf Firmenparkplät-

zen mit benachbarter, zugänglicher Bebauung. Bei durchaus üblichen Arbeitsentfernungen für Laserscanner von ca. 50 m beträgt die vorgeschlagene Höhe des Zielpunkts T4 immerhin 25 m (bzw. mind. ca. 17 m), was in vielen Fällen außerhalb der Realisierbarkeit liegt.

Für den Hochpunkt ist zudem zu berücksichtigen, dass dieser mit einem zugänglichen und schwenkbaren Zielzeichen zu signalisieren ist. Im genannten Fall mit 25 m beträgt der Elevationswinkel für die Anzielung von den beiden Standpunkten ca. 43° bzw. ca. 79°, so dass sichergestellt werden muss, dass das Ziel entweder ungefähr mittig ausgerichtet ist oder ohne Veränderung seines Zentrums nachgeführt werden kann, um eine stabile und zuverlässige Auswertbarkeit zu gewährleisten.

Im Gegenzug stellt die horizontale Ausdehnung des Prüffelds meist keine größere Schwierigkeit dar, wenn ein geeigneter Hochpunkt erst gefunden ist. Grundsätzlich sollte die Position des Punktes T4 bestmöglich den vorgeschlagenen Abmessungen entsprechen; örtlichkeitsbedingte Abweichungen der Höhe von T4 oder der horizontalen Dreiecksseite $\overline{T2T3}$ um bis zu 50 % sind jedoch mit Abstrichen tolerierbar.

Die Zielzeichen T2 und T3 müssen während des Prüfvorgangs nicht bewegt werden; hier hat sich eine Lotstabauaufstellung als ausreichend erwiesen. Das Zielzeichen T1 ist hingegen auf die beiden Scannerstandpunkte auszurichten, so dass eine stabile Stativaufstellung zu empfehlen ist. Von entscheidender Bedeutung ist in jedem Fall die Einhaltung der Beobachtung in unterschiedlichen Lagen auf den beiden Standpunkten.

4.2 Messung und Punkt wolkenverarbeitung

Bei der Durchführung der Messung sind externe Einflüsse zu vermeiden, die mit Instrumentenabweichungen korrelieren oder als solche interpretiert werden könnten. Insbesondere muss sich daher der Scanner innerhalb der Verwendungsspezifikationen gemäß Handbuch befinden, On-Board-Prüf- und Justierroutinen sind, soweit vorhanden, im Vorfeld durchzuführen und es ist auf eine ausreichende Akklimatisierung zu achten. Die Untersuchungsbedingungen sollen jedoch dem späteren Einsatz in etwa entsprechen (und insbesondere keine „Laborbedingungen“ darstellen), aber bei stabilen Bedingungen erfolgen (keine starken Windböen etc.). Sofern am Scanner meteorologische Einflüsse hinterlegt werden können, sollten diese bestimmt werden. In jedem Fall empfiehlt es sich, das auch bei den Feldmessungen verwendete Zubehör für die Prüfmessungen zu verwenden.

Bei der Definition der Scans ist darauf zu achten, dass die Auflösung an den am weitesten entfernten Zielzeichen ausreichend ist, um eine zuverlässige Be-

stimmung des Mittelpunkts zu gewährleisten. Gegebenenfalls sind hier hochauflösende Scanfenster festzulegen; bei Scannern (insbesondere aus dem Segment geringer und mittlerer Qualität), die ausschließlich „Full Dome“-Scans durchführen, ist die höchste Auflösungsstufe zu wählen.

Weiterhin ist zu beachten, dass keine zusätzlichen Unsicherheiten oder gar Abweichungen durch den Auswerteprozess induziert werden, welche dann fälschlicherweise dem Erfassungsvorgang zugeordnet werden. Dies betrifft insbesondere die Algorithmen, die zur (automatischen) Zielzeichendetektion in den Punktwolken verwendet werden.

Untersuchungen mit üblicher Auswertesoftware (Leica Cyclone, Trimble RealWorks, Z+F LaserControl) und denselben Ausgangspunktwolken weisen für maximal 30 m lange relative Streckendifferenzen zwischen den Zielpunkten Abweichungen bis zu knapp 1 mm nach, was vernachlässigbar ist. Im Hinblick auf die Auflösung der Punktwolke ist jedoch darauf zu achten, ob die Zielzeichendetektion interpolierend arbeitet oder auf den nächstliegenden physischen Messpunkt abstellt.

4.3 Auswertung gemäß ISO-Norm

Für die Auswertung sieht die ISO-Norm 17123-9 entweder ein vereinfachtes Verfahren (für das dann auch beim Messen jeweils ein Messdurchlauf pro Standpunkt ausreichend ist) oder ein vollständiges Verfahren mit je drei Messdurchläufen vor. Da statistische Aussagen nur bei Vorliegen entsprechender Redundanz möglich sind und nach dem möglichen Anschlagen des vereinfachten Testverfahrens ohnehin das vollständige Verfahren durchgeführt werden soll, empfiehlt es sich, grundsätzlich die Messdaten in drei Durchläufen zu erheben.

Einen ersten Hinweis auf die Nutzbarkeit der Messungen geben die Residuen der einzelnen Streckendifferenzen sowie die daraus abgeleitete Standardabweichung einer Einzeldistanz (vgl. Abb. 5), die üblicherweise sehr klein ausfallen (selbst bei einem Leica BLK360 liegen diese regelmäßig nur im Bereich von 1 mm). Dennoch fallen im Beispiel für den 1. Standpunkt die Abweichungen in der Strecke T3-T4 deutlich auf, welche auch zu einer erheblich erhöhten mittleren Standardabweichung der Einzeldistanz führen. In diesem Fall ergibt der statistische Test, dass beide Standpunkte mit unterschiedlicher Genauigkeit gemessen worden sind und daher nicht gemeinsam ausgewertet werden sollten. Die Ursache könnte hier eine schlechte Auswertbarkeit eines der Zielzeichen oder eine Störung bzw. Instabilität bei der Messung gewesen sein. Allgemein zeigt sich, dass bei zunehmender Qualität der Messung (insbesondere hinsichtlich der Präzision der Zielpunkterfassung) bereits kleinere Störungen zu einem

Residuen [m]					
T1 - T2	T1 - T3	T1 - T4	T2 - T3	T2 - T4	T3 - T4
0,0001	-0,0003	-0,0001	0,0007	0,0003	0,0012
-0,0002	0,0000	0,0000	-0,0012	0,0004	0,0008
0,0001	0,0003	0,0000	0,0005	-0,0007	-0,0021
StdAbw einer Einzeldistanz s_{01} :					0,8943 [mm]
Residuen [m]					
T1 - T2	T1 - T3	T1 - T4	T2 - T3	T2 - T4	T3 - T4
0,0000	-0,0002	0,0000	-0,0004	-0,0003	-0,0001
-0,0002	0,0005	-0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
0,0002	-0,0003	0,0001	0,0002	0,0001	-0,0001
StdAbw einer Einzeldistanz s_{02} :					0,2710 [mm]

Abb. 5:
Residuen einer
Testmessung
mit einem
scannenden
Tachymeter
Leica MS60

signifikanten Anschlagen des entsprechenden Hypothesentests führen, was die Notwendigkeit einer stabilen Messumgebung zusätzlich unterstreicht.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Qualitätssicherung von geodätischen Messprozessen stellt die Prüfung des eingesetzten Instruments in Hinblick auf seine Gebrauchstauglichkeit für einen bestimmten Einsatzzweck eine wichtige Maßnahme dar. Mit der vorgestellten ISO-Norm 17123-9 steht hierfür ein standardisiertes und einfach zu realisierendes Feldprüfverfahren für TLS zur Verfügung.

Die Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Verfahrens auf theoretischer Ebene mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die vorgesehene Konfiguration sensitiv für eine Reihe von systematischen Messabweichungen ist, die sich aus dem Achssystem, der internen Laserstrahlrichtung und der Distanzmess-einheit des TLS ergeben. Die Ergebnisse legen zudem nahe, bei der praktischen Umsetzung des Feldprüfverfahrens insbesondere die Vorgaben für das hoch-liegende Zielzeichen T4 sowie für die Erfassung in unterschiedlichen Lagen zu berücksichtigen und grundsätzlich drei Sätze bei stabilen Messbedingungen zu erheben.

Literatur

- Altemeier, F. (2018): Sensitivitätsanalyse zur geometrischen Untersuchung des Unsicherheitsmodells von TLS-Messungen. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut, unveröffentlicht.
- DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. dvw.de/veroeffentlichungen/merkblaetter.
- Feldmann, E., Petersen, M., Staiger, R. (2011): Erste Erfahrungen mit Feldprüfverfahren für terrestrische Laserscanner. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge. DVW-Schriftenreihe, Band 66, Wißner-Verlag, Augsburg, 77–96.
- GUM (2008): Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM 100:2008. GUM 1995 with minor corrections.
- ISO 17123-9 (2018): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 9: Terrestrial laser scanner, ISO 17123-9:2018, International Organization for Standardization.
- ISO 17123-4 (2012): Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors), ISO 17123-4:2012, International Organization for Standardization.
- Leica (2016): Leica ScanStation P30/P40 Technische Daten. Heerbrugg, Schweiz: Leica Geosystems AG.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., et al. (2015): Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. In: Precision Engineering 40, 139–150.
- Staiger, R., Heister, H. (2013): Praxisnahe Prüfung terrestrischer Laserscanner. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. DVW-Schriftenreihe, Band 71, Wißner-Verlag, Augsburg, 65–88.

Kontakt

M.Sc. Franziska Altemeier | Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
Geodätisches Institut der Leibniz Universität Hannover
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
altemeier@gih.uni-hannover.de | neumann@gih.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Bianca Gordon
Leica Geosystems AG
Heinrich-Wild-Straße, 9435 Heerbrugg, Schweiz
bianca.gordon@leica-geosystems.com

Prof. Dr.-Ing. Peter Wasmeier
Fakultät für Geoinformation der Hochschule München
Karlstraße 6, 80333 München, Deutschland
peter.wasmeier@hm.edu

TRIMBLE X7 – Prinzipien der Selbstkalibrierung

Michael Vogel

Zusammenfassung

Mit der Einführung des 3D-Laserscanners Trimble X7 wird neben vielen Neuerungen erstmals ein Verfahren inklusive Vorrichtung zur Bestimmung der Achsenfehler im Instrumentarium angeboten. Der Benutzer wird von der Prüfung des Messsystems entlastet, auch entfallen damit die regulären Intervalle für Service und Rekalibrierung. Hauptkomponente für die Selbstkalibrierung des Laserscanners von Trimble ist ein im Instrumentenfuß integrierter Auto-Kollimator, welcher erstmalig Bestandteil eines Vermessungsinstruments ist. Instrumenteninterne Sensoren überwachen Temperaturänderungen und aktivieren automatisch die Selbstkalibrierung. Damit wird das Trimble X7 kalibriert und garantiert, dass die Genauigkeiten konform Spezifikation eingehalten werden.

1 Grundlagen

1.1 Einführung

Bekanntlich sind die Achsenfehler einer Totalstation oder eines Laserscanners nur endlich justierbar und Änderungen unterworfen, deren Ursache sowohl auf die Umgebungstemperatur als auch auf Stoß- bzw. Schockeinwirkungen zurückzuführen sind. Bei herkömmlichen Totalstationen hat der Benutzer die Möglichkeit der Feldkalibrierung, mit der die Achsenfehler 1. Ordnung bestimmt werden können. Grundlage ist hierfür die Möglichkeit eines Alhidadenaufbaus zur Zwei-Lagen-Messung gegen einen oder mehrere Punkte in größerer Entfernung. In der Produktion und im Service sind Kollimatoren in Benutzung, die Ziele im Unendlichen bei beschränktem Bauraum präsentieren. Für Laserscanner ist das Prinzip der Achsenfehlerbestimmung nur bedingt anwendbar, da hier u. a. aufgrund der Architektur die klassische Zwei-Lagen-Messung nicht möglich ist und das herkömmliche Achsensystem eines Tachymeters ergänzt werden muss. Aufgeführt werden hier die Erweiterungen der Achsen durch Ablenkmotor-Drehachse, den 45°-Spiegel für die Strahlablenkung und die Richtung der EDM-Laserquelle als Achse.

1.2 Die Achsenfehlerkorrektur einer Totalstation

Die Achsenfehler einer herkömmlichen Totalstation (Abb. 1) beschreiben und erfassen die Abweichung der folgenden Achsenpaare von der strengen Rechtwinkligkeit zueinander:

- Der Zielachsenfehler c (horizontaler Seitenkollimationsfehler) tritt auch, wenn die Zielachse ZZ nicht senkrecht zur Kippachse KK liegt.
- Der Kippachsenfehler k beschreibt die Abweichung der Orthogonalität von der Kippachse KK zur Stehachse VV eines Instrumentes.
- Ein Höhenindexfehler i (vertikaler Seitenkollimationsfehler) ist ein Offset auf den am Vertikalteilkreis abgelesene Richtung Va damit u. a. die Bedingung, dass bei einer Zielung im Horizont eine Ablesung von 100 gon, erfüllt wird.

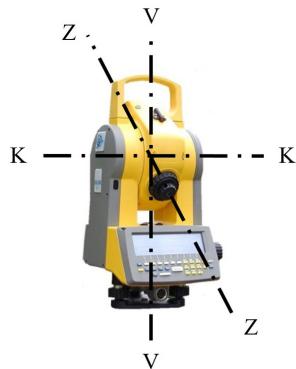


Abb. 1: Tachymeter-Achsen
eines Trimble 3600

1.3 Korrekturen der Achsenfehler

Die mathematisch exakte Korrektur, d. h. der Einfluss der Achsenfehler auf die Richtungselemente der Polarkoordinaten, liefert Stahlberg (1997):

$$\tan(\Delta Hz) = \frac{\cos(k) \cdot \tan(c) + \sin(k) \cdot \cos(Va + i)}{\sin(Va + i)} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \cos(V) &= \frac{\sin(k) \cdot \tan(c) - \cos(k) \cdot \cos(Va + i)}{\sqrt{1 + \tan(c)^2}} \\ &= \cos(c) \cdot [\sin(k) \cdot \tan(c) - \cos(k) \cdot \cos(Va + i)] \end{aligned} \quad (2)$$

ΔHz wird dabei als Zuschlag auf eine vom Instrument abgelesene horizontal Richtung Hza gewertet. Die um die Achsenfehler korrigierte Hz -Richtung ergibt sich demzufolge aus:

$$Hz = \Delta Hz + Hza \quad (3)$$

Zur Interpretation der Gleichungen (1) und (2):

- Der Zuschlag ΔHz konvergiert gegen ± 100 gon für Zielungen im Nadir bzw. Zenit.
- Erstmals wird eine vertikale Richtung V korrigierend berechnet wobei $V = k \pm c$ für Zielungen im Nadir bzw. Zenit konvergiert. $V = k + c$ und $V = k - c$ definieren jeweils einen Radius im Zenit und Nadir bei Drehung um die Stehachse, innerhalb welchem die Totalstation nicht in der Lage ist eine Zielung zu ermöglichen. Die Achsenfehler in Summe bzw. Differenz sind verantwortlich für „blinde Kegel“ entlang der Stehachse.

1.4 Wirkung von Achsenfehlern im Zenit und Nadir

Abb. 2 stellt schematisch eine Alhidade und deren Drehachsen dar. Der Schnittpunkt aller Achsen wir hier als M-Mittelpunkt bezeichnet. Betrachten wir nun zunächst den Fall das die Zielachse zz senkrecht auf der Kippachse KK steht, wir aber einen Kippachsenfehler k einführen. Rotiert man in dieser Konstellation die Alhidade um die Stehachse VV beschreiben die Achse zz sowohl im Zenit als auch im Nadir die Mantelfläche eines Kegels, wobei der Kegel exakt einen Öffnungsradius von k besitzt. Innerhalb des Kegels ist keine Visur oder Messung möglich, dieser beschreibt einen „blinden Kegel“ der je „unerreiehbar“ bleibt.

Führt man jetzt in einem weiteren Schritt ein den Seitenkollimationsfehler c ein so ergibt sich für eine Zielung im Zenit der Kegel mit dem Radius $k - c$ und für Visuren in den Nadir der Kegelradius $k + c$. Unter Annahme, dass es eine Zielachse ZZ' gibt, die sich beidseitig vom Punkt M beliebig verlängern lässt, sodann wäre diese für Beobachtungen in zwei Lagen geeignet, vorder- als auch rückseitig.

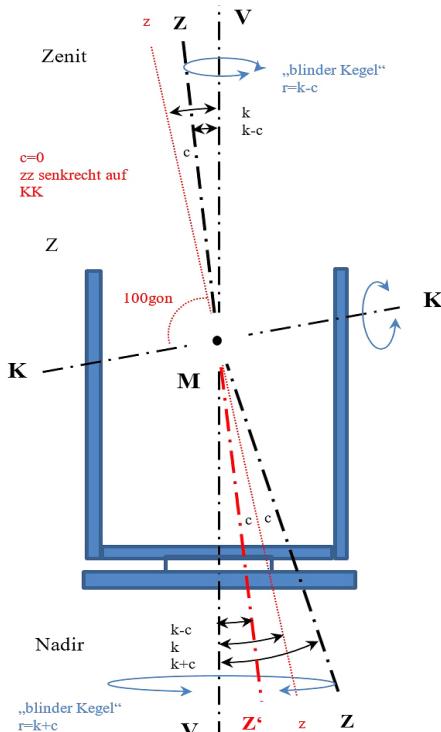


Abb. 2: Instrumentachsen im Zenit und Nadir-Seitenansicht

1.5 Übertrag auf Laserscanner

Betrachten wir ausschließlich den Scanvorgang ohne eine Drehung des Instruments um die Stehachse, sprich die horizontale Rotation des Scanners. Nun ist die Anzahl der Zielachsen bei einem Tachymeter mit koaxialem optischem Set-up auf 1 begrenzt. Ein Scanner jedoch spannt eine Scanebene oder einen Scanfächer mit einer Vielzahl n von einzelnen Zielachsen auf. Die Mannigfaltigkeit der Achsen wird durch die Strahlablenkung des rotierenden Ablenkspiegels als auch durch die Pulsfolge des Entfernungsmessers bestimmt. Jedem Messpuls des Entfernungsmessers erfolgt idealer Weise zeitsynchron eine Messung der vertikalen Richtung V_a gelesen am Winkelencoder des rotierenden Spiegels.

Zusammenfassend gilt für $1..n$, wobei n die Anzahl der Messungen/Zielachsen pro Umdrehung des rotierenden Ablenkspiegels ist:

- V_a_n – unkorrigierte abgelesene Vertikalrichtung,
- c_n, i_n – horizontaler und vertikaler Seitenkollimationfehler einer Zielachse n ,
- k – als gemeinsamer und einziger Kippachsenfehler gültig für alle Zielachsen n .

Jeder Zielachse n kann ein individuelles Achsenfehlerpaar c_n und i_n zugeordnet und durch Anwendung der Formeln (1) und (2) entsprechend die Richtungselemente der Polarkoordinaten berechnet bzw. korrigiert werden.

2 Der Aufbau des Trimble X7

2.1 Systemarchitektur

Das Grundkonzept der Alhidade ist dem einer herkömmlichen Totalstation gleich. Ein X7 (Abb. 3) beinhaltet beide Achsenbaugruppen incl. Antrieb-Positioniersysteme als auch Winkelencoder mit diametraler Abtastköpfen. Anstelle des klassischen Teleskops wurde jedoch ein Scan-Kopf integriert, welcher alle Komponenten eines Laserscanners enthält. Dazu zählen u. a. der EDM (Entfernungsmesser), der rotierende 45°-Spiegel mit Motor und Winkelencoder, usw. (Abb. 4). Wichtig an dieser Stelle zu erwähnen ist, dass der komplette Scan-Kopf um dessen eigene Achse mit Hilfe des vertikalen Alhidadenantriebs um die Kippachse gedreht und positioniert werden kann. Dies wird im weiteren Verlauf eine Schlüsselkomponente für die Selbstkalibrierung darstellen.

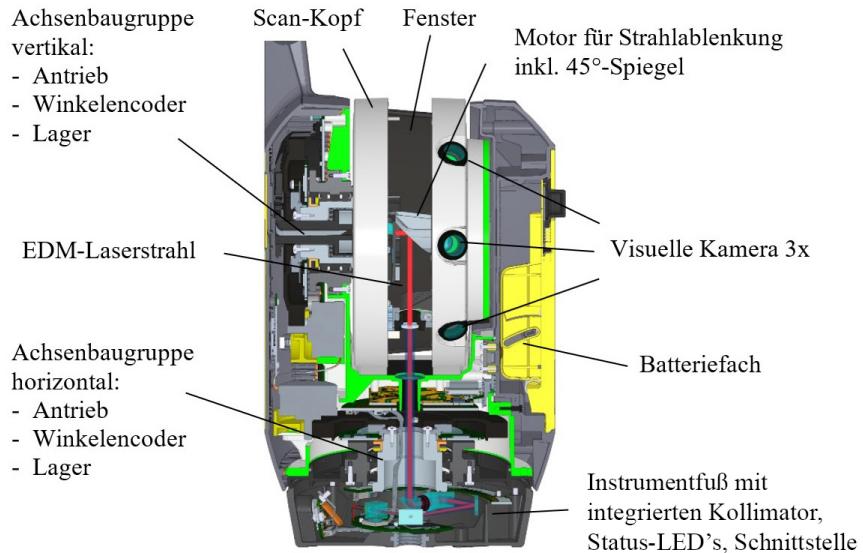


Abb. 3: Aufbau Trimble X7

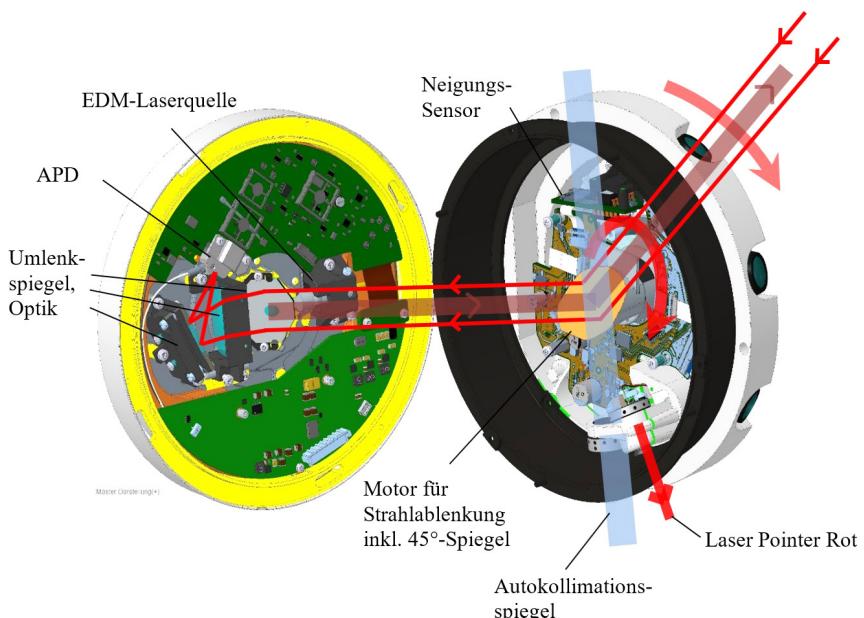


Abb. 4: Sende- und Empfangsstrahlengang

2.2 Scan-Kopf im Detail

Folgende Komponenten im Scan-Kopf seien kurz vorgestellt und erklärt:

- Drei visuelle Kameras à 10,5 Mpxl dienen zur Panoramabildaufnahme, um im Nachgang die 3D-Punktwolke zu colorieren. Die Verlängerung deren optischer Achsen schneiden sich gemeinsam im Mittelpunkt des Scan-Kopfes.
- Ein zusätzlicher Laser Pointer mit der Farbe Rot kann für vielfältige Anwendungen wie Markierung und Absteckung als Stationierungsaufgaben genutzt werden.
- Ein spezieller Autokollimationsspiegel dient für die Selbstkalibrierung. Dieser ist sowohl vorder- als auch rückseitig optisch messbar.
- Ein Neigungssensor dient zur Messung der Geräteneigung. Hierzu kann dieser unter Zuhilfenahme beider Antriebe in den Nullpunkt als auch um die Stehhachse gedreht/bewegt werden. Damit kann jederzeit der Sensor kalibriert als auch Neigungen außerhalb des vom Sensor spezifizierten Arbeitsbereiches gemessen werden.

2.3 Strahlengang im Kollimator-Instrumentenfuß

Im Instrumentenfuß, sprich im Dreifuß- oder Stativteller festem Bauteil des Gerätes, ist ein spezieller Kollimator integriert ([Abb. 5](#)). Dessen Öffnung ist in Richtung Nadir gerichtet. Da die horizontale Drehachse als Hohlachse ausgeführt ist kann dieser ungehindert Strahlung detektieren, die vom Scan-Kopf in Richtung Nadir gesendet wird.

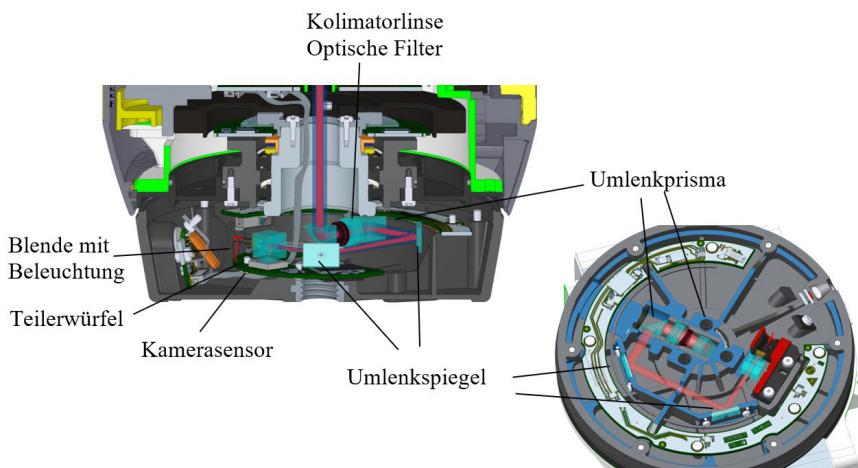


Abb. 5: Kollimatoraufbau

Aufgrund des geringen Bauraums muss der optische Pfad mehrfach gefaltet und/oder umgelenkt werden. Der Kollimator ist als Autokollimator ausgeführt. D.h. er kann ohne Umstände optische Spiegelfläche anmessen und deren Ausrichtung bzgl. der optischen Achse detektieren. Dazu ausgestattet ist dieser mit einem Teilerwürfel für Sende- und Empfängerstrahlengang.

3 Die Achsenfehler eines Scanners und deren Auswirkung

Schematisch soll in diesem Abschnitt auf die Achsenfehler eines Scanners und deren Auswirkung eingegangen werden (Abb. 6). Es sei erwähnt, dass es sich dabei nicht um die strenge mathematische Modellierung handelt und ausschließlich die Fehler erster Ordnung reduziert. Nehmen wir zunächst an, dass

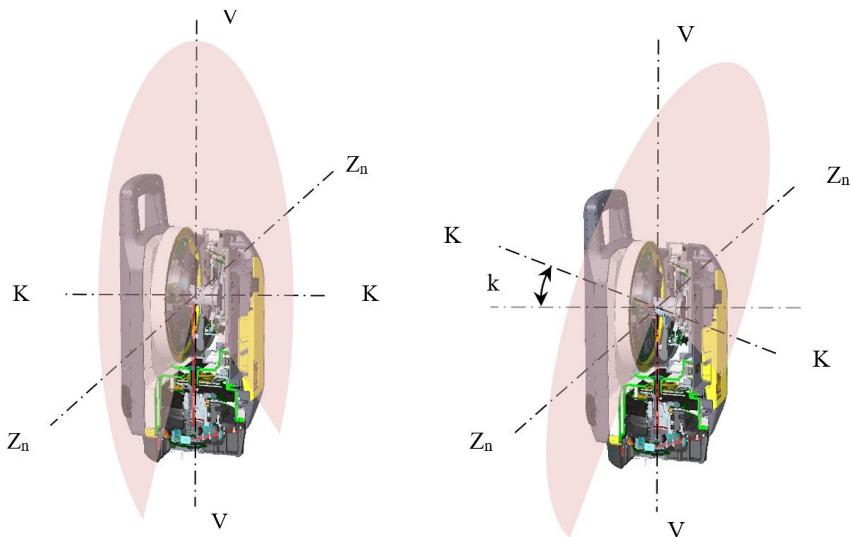
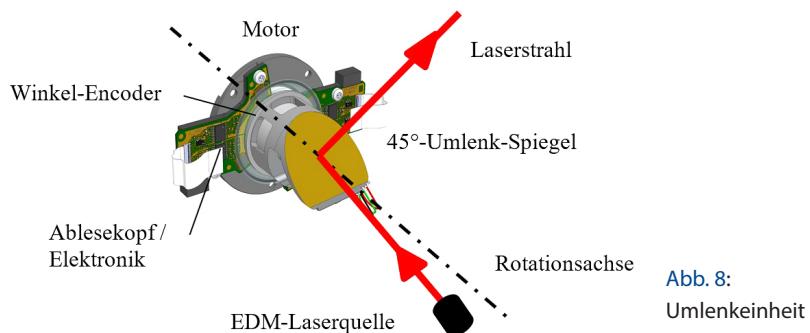


Abb. 6: Ideale Scanebene

Abb. 7: Geneigte Scanebene

wir einen ideal justierten Scanner haben. Sämtliche Achsen erfüllen die Orthogonalitätsanforderungen, usw. Alle gemessenen 3D-Punkte liegen in einer idealen Ebene und in regelmäßiger Verteilung in dieser. Fügen wir nun in einem ersten Schritt einen Kippachsenfehler k hinzu, erhalten wir eine um k geneigte Scanebene (Abb. 7).

Wie Abb. 8 zeigt, ist als Herzstück für Laserscanner der Motor mit 45°-Ablenkspiegel und EDM bezeichnend sowie auch die EDM-Laserquelle. Daraus ergeben sich zwangsläufig zusätzliche Achsen und auch Bedingungen, die näher



betrachtet werden müssen, um deren Einfluss auf die Scanebene zu erschließen. Betrachten wir zunächst wieder den idealen Fall, d.h. der Umlenkspiegel besitzt exakt einen 45° -Winkel in Bezug zur Drehachse des Motors. Und parallel zur oder besser auf der Drehachse des Motors liegt ebenfalls die EDM-Laserquelle, -Achse.

In der Annahme, dass der Umlenkspiegel einen Fehler hat und nicht exakt 45° beträgt, wird der Laserstrahl nicht um 90° abgelenkt. Damit wird die finale Scanebene zu einem Kegel deformiert. Das heißt, der Scan beschreibt pro Motorumdrehung einen Kegelmantel.

Ist nun zudem die Achse der EDM-Laserquelle nicht identisch mit der Rotationsachse des Motors, sodann wird auf den Kegelmantel zusätzlich eine Sinuswelle entstehen (Abb. 9).

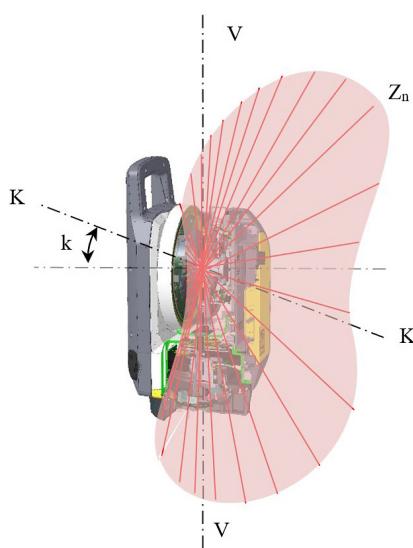


Abb. 9: Reale Scanfigur

Abb. 10 veranschaulicht die Charakteristik von horizontalen von vertikalen Seitenkollimationsfehlern c_n und i_n über den vertikalen Ablenkwinkel des Laserstrahls. Die horizontal und vertikalen Kollimationsfehler korrelieren miteinander. Dies lässt sich im speziellen auf die Baugruppe der Stahlablenkung, den 45° -Umlenkwinkel und die Ausrichtung der Laserachse zurückführen. Die mathematische Analyse der harmonischen Funktionen mittels Phasen, Amplituden und Offsets bieten Raum für die Modellierung und die Parameterschätzung einzelner Größen. Jedoch

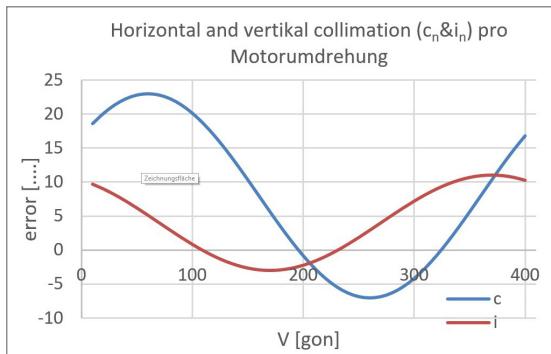


Abb. 10:
Simulation Achsenfehler

sei einschränkend erwähnt, dass nicht zwangsläufig alle Modelparameter aufgelöst werden können, da davon auszugehen ist, dass diverse Glieder in einer eins zu einer Korrelation vorliegen.

Vollständigkeitshalber erwähnt seien neben den Effekten von Eigen- und Fremdtemperatureinflüssen, Transport und Stoßbelastung weitere Einflussgrößen, welche Wirkungen auf die Seitenkollimationsfehler, sprich die Scanebene/Scanfigur, haben können.

- Es ist davon auszugehen, dass sich die räumliche Lage der Motordrehachse mit der Drehgeschwindigkeit ändert als auch der 45° -Winkel des Umlenkspiegels ebenfalls. Speziell die während der Rotation wirkenden Kräfte können eine Änderung des Spiegelwinkels zur Folge haben.
- Die Genauigkeit des Winkelmesssystems vom rotierenden Motor.
- Optische Effekte des Scannerfensters können ebenfalls im geringen Umfang für Stahlablenkungen verantwortlich sein.
- Signal- und Laufzeiteffekte innerhalb und entlang der elektronischen Verarbeitung der Messdaten können dazu führen, dass die Streckenmessung und Winkelmessung nicht zeitsynchron erfolgen.

4 Prinzipien der Selbstkalibrierung

4.1 Die Messung des Kippachsenfehlers k

Die Messung des Kippachsenfehlers k erfolgt in Autokollimation (Abb. 11). Dazu wird eine Zielung der Spiegelnormalen unter zu Hilfenahme des vertikalen Antriebs und Positionierungssystems in Richtung Nadir durchgeführt. Der Autokollimator projiziert dessen Blende ins unendliche. Diese Strahlung wird vom Spiegel in sich reflektiert und entsprechend rückwärtig auf den Kamerasensor

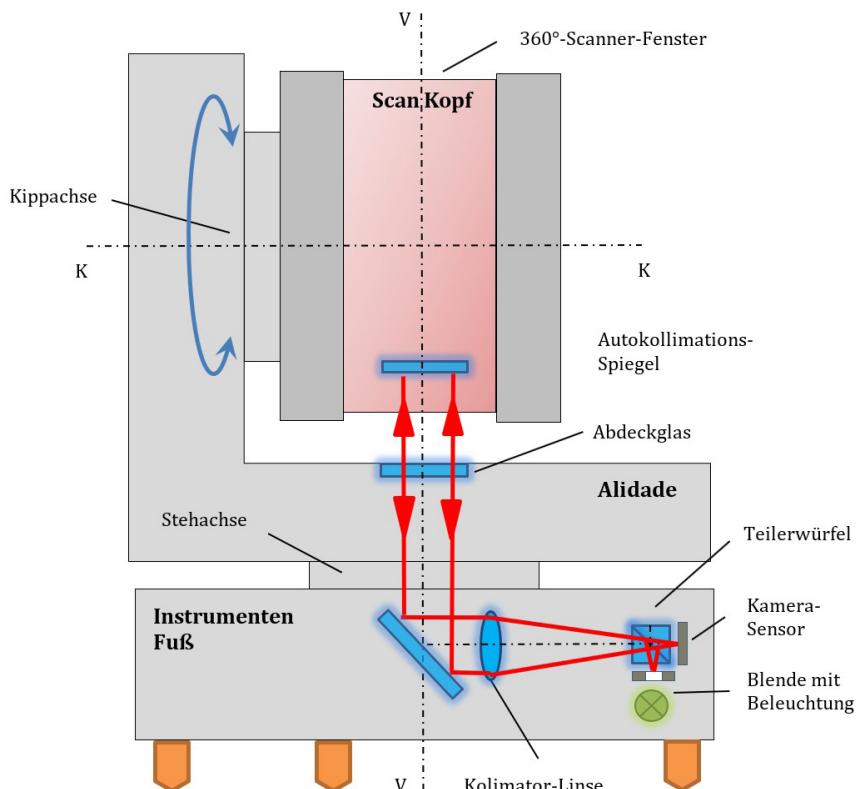


Abb. 11: Optischer Strahlengang Autokollimation

abgebildet. Es entsteht ein Bild der Blende auf dem Kamerabildsensor reflektiert von der Spiegelfläche.

Betrachten wir nun das Kamerabild unter der Abfolge von mehreren Bewegungsabläufen unter Benutzung der horizontalen als vertikalen Antrieb- und Positionierungssystem bei gleichzeitiger Bildaufnahme mittels Autokollimator. Vorausgesetzt wird an dieser Stelle, dass die Messung und Bildauswertung von z. B. Schwerpunkten dem Stand der Technik zuzuordnen ist und nicht näher erläutert wird.

Für den Fall (Abb. 12), dass der V-Winkel konstant gehalten wird und wir ausschließlich z. B. 4 Hz-Position (0, 100, 200 und 300 gon) nacheinander anfahren, so entsteht aus den vier adäquaten Messpunkten des Kamerabildsensors ein Kreis. Entscheiden von diesem ist weder der Radius, sondern vielmehr der Mittelpunkt. Der Mittelpunkt repräsentiert den Durchstoßpunkt der Stehachse mit/ auf dem Kamerabildsensor.

Für den Fall, dass der Hz -Winkel konstant gehalten wird und wir ausschließlich verschiedene V-Positionen (mindestens 2) nacheinander anfahren, so wird auf dem Kamerasensor eine Gerade entstehen bzw. entlang Einer abgetastet.

Fällt man das Lot vom Kreismittelpunkt auf die Gerade, es wird ein Lotfußpunkt erzeugt, so wissen wir, dass die Länge des Lotes die Summe aus Kippachsenfehler k und horizontalen Seitenkollimationsfehler c ist. An dieser Stelle sprechen wir ausschließlich vom c des Spiegels, der letztendlich ein Abfallprodukt ist und keine weitere Verwendung finden soll. Aus dem Lotfußpunkt kann des Weiteren ein Kalibriergröße abgeleitet werden. Es handelt dabei im den vertikalen Seitenkollimationsfehler i . In dieser Stelle tangiert die Gerade bei veränderten V-Winkel den „blinden Kegel“. D.h. im Umkehrschluss, dass im Lotfußpunkt eine Zielung exakt im Nadir erfolgt oder auch, dass der abgelesene V-Winkel im Lotfußpunkt 200 gon entsprechen muss.

Wiederholt man nun die Messung speziell bei konstanten Hz -Winkel in Siegellage II, d. h. der Scan-Kopf wird in V-Richtung um 200 gon gedreht, so entsteht eine zweite parallel Gerade. Der Kippachsenfehler k ergibt sich aus dem Mittel der Länge der Lote zu den Geraden in Spiegellage I und Spiegellage II und ist dadurch eliminiert vom Seitenkollimationsfehler c des Spiegels.

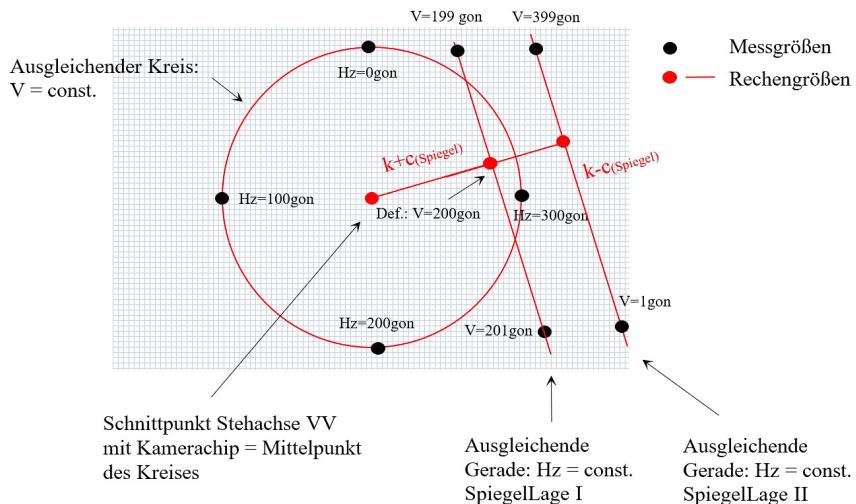


Abb. 12: Analyse der Kollimatoraufnahmen

4.2 Die Messungen von horizontalen und vertikalen Seitenkollimationfehlern c_n und i_n entlang der Scanebene

Die Bestimmung der Anteile c_n und i_n erfolgt nach den gleichen Schemata. Lediglich der Kollimator wird im Kollimationsmodus betrieben. Ein vom EDM gesendeter Laserpuls (Abb. 13) wird über den rotierenden Spiegel in Richtung Nadir abgelenkt und von der Kamera detektiert. Wenn die Messung abgeschlossen ist, wird ein nächster Punkt gemessen, indem der Scan-Kopf schrittweise um die Kippachse/V-Antrieb rotiert wird.

Die Analyse der Messungen folgt den gleichen Prinzipien. Die Länge des Lotes kann jedoch, da bereits der Kippachsenfehler k bekannt ist, nach den horizontalen Seitenkollimationfehlern c_n aufgelöst werden. Der vertikale Seitenkollimationfehler i_n ergibt sich aus der Abweichung des V-Winkels im Lotfußpunkt von 200 gon.

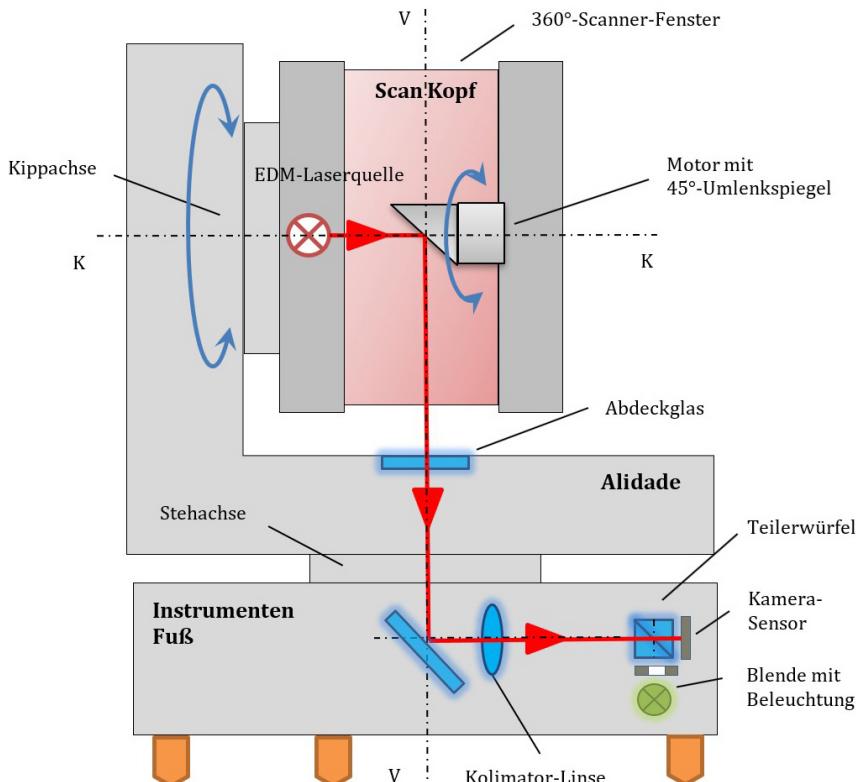


Abb. 13: Optischer Strahlengang Kollimation

Je nach Situation kann die Kalibrierung des Systems in dessen Umfang variiert werden. Zum Beispiel ist davon auszugehen, dass im Produktionsprozess oder auch im Service eine umfangreiche Kalibrierung zur Analyse vorgenommen wird, im Feldeinsatz jedoch die Kalibrierungen sich auf Minimum reduzieren. Eigens dafür hinterlegt ist dem Prozess des automatischen Kalibrierens ein permanentes und zeitliches Überwachen der internen als auch externen Temperaturänderungen.

5 Ergänzende Diskussion des vorgestellten Kalibrierverfahrens

Das Verfahren basiert auf keinerlei Grundlage einer absoluten Maßverkörperung oder Stabilitätsanforderung. Einige Anforderungen sind an die Qualität der Rotationsachsen der Alhidade (d.h. von Steh- und Kippachse, u.a. an die Taumelfehler und deren Positionierungs- und Winkelmesssysteme) zu stellen. Unter der positiven Annahme – da diese bereits seit Jahrzehnten in Totalstationen eingesetzt werden und der Entwicklungsstand in einer im Vergleich zum Scanner übergeordneten Genauigkeitsklasse liegt – können diese als Referenz verwendet werden.

Selbst absolute Anforderungen an den internen Kollimator seien nicht erforderlich. Durch die Messverfahren werden alle für die Messungen relevanten Größen, wie Durchstoßpunkt der Stehachse auf den Kamerasensor usw., jeweils neu bestimmt. Auch der Pixel/Winkelmaßstab im Kollimator kann jederzeit auf die Alhidaden-Winkelmesssysteme der Achsen zurückgeführt werden.

Von Vorteil erweist sich die Messung des Kippachsenfehlers k mit doppelter Genauigkeit durch das Autokollimationssprinzip, da ein Fehler von k sich in Fortpflanzung im Verhältnis eins auf die gemessenen Seitenkollimationsfehler c auswirken würde.

6 Zusammenfassung

Die Selbstkalibrierungsfunktion erleichtert dem Benutzer den Umgang im täglichen Einsatz. Aufwendige Routinen zur Prüfung des Equipments können reduziert werden und ersparen wertvolle Zeit. Das Gerät kann sich automatisch auf sich ändernde Umgebungsbedingung anpassen und gewährleistet somit die Genauigkeiten gemäß Spezifikation. Die Funktion unterstützt den effektiven Einsatz im Feld auf hohen Genauigkeitsniveau und erleichtert die Eigendiagnose.

Nichtsdestotrotz sollten für alle und besonders für die höchsten Genauigkeitsansprüche in sich kontrollierende Messanordnungen und Methoden nicht

abgewählt werden. Ein sorgsamer Umgang mit dem Instrument sowie dem zusätzlichen Equipment bleibt weiterhin relevant und ist immer empfehlenswert.

Literatur

- Deumlich, F., Staiger, R. (2002): Instrumentenkunde der Vermessungstechnik. 9., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Michael, V., Gregg, J., Arnaud, L., Gregory, L. (2020): White paper: Inside the Trimble X7 – Deep Dive into Trimble X-Drive Technology.
- Stahlberg, C. (1997): Eine vektorielle Darstellung des Einflusses von Ziel- und Kippachsenfehler auf die Winkelmessung. In: ZfV – Zeitschrift für Vermessungswesen, 122. Jg., Heft 5/1997, 225–235.
- Trimble Jena GmbH (2020): Vermessungsinstrument und Verfahren zur Kalibrierung eines Vermessungsinstruments. Erfinder: Michael V., Anmeldung: 15.02.2019, Patentschrift EP 3 696 498 A1.

Kontakt

Dr.-Ing. Michael Vogel
Trimble Jena
Carl-Zeiss-Promenade 10, 07745 Jena
michael_vogel@trimble.com

DIN-Norm 18213 GNSS-Feldprüfverfahren – Qualitätssicherung für die Berufspraxis

Barbara Görres | Klaus Fritzensmeier | Uwe Ehrhorn |
Rolf Hollmann | Michael Mayer | Florian Pollinger

1 Motivation für eine neue GNSS-Norm

Mit der DIN 18213 „Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte“ steht seit Februar 2022 erstmals eine Norm aus dem GNSS-Bereich zur Verfügung, die Anwendern aus der Praxis einfache Hilfestellungen gibt. Das Befolgen dieser Norm zur Verifikation des eingesetzten Instrumentariums soll es dem Anwender ermöglichen, sein Instrumentarium gemäß anerkannter „Best Practice“ mit einem vertretbaren Zeitaufwand im Feld zu verifizieren. Sie wurde vom Arbeitsausschuss NA005-03-04AA „Geodätische Instrumente und Geräte (SpA zu ISO/TC172/SC6)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) erarbeitet.

Im Jahr 2014 hatte eine Prüfung vorhandener Normen, bestehender Vorschriften und auch berufsgruppenspezifischer Empfehlungen (Fritzensmeier et al. 2017a) deutlich aufgezeigt, dass eine Übernahme als sogenannte DIN ISO Norm, wie dies bei anderen Normen der 17123 Reihe möglich war, nicht empfohlen werden konnte. Mit dem Teil 8 „GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)“ war bis zu diesem Zeitpunkt lediglich ein ISO-Dokument verfügbar war, das ausschließlich auf einen speziellen Typus abzielte.

So entstand der Wunsch nach einer erweiterten GNSS-Norm, die der Vielfalt an GNSS-Verfahren und Genauigkeitsbereichen sowie verschiedenen Anwendungen besser gerecht werden und daher alle Genauigkeitsbereiche und Messverfahren umfassen sollte. Die Diskussion in und mit den Fachkreisen ergab, dass hierzu bislang kein geeignetes und im Aufwand vertretbares Verfahren existierte, was die Entwicklung eines vollkommen neuen Prüfverfahrens erforderte. Der erarbeitete Ansatz verfolgt in Abgrenzung zu vielen bisherigen Instrumentennormen und Verifikationsansätzen in der geodätischen Forschung eine summarische Prüfung des Gesamtsystems „GNSS“ mit allen verwendeten Komponenten bis hin zur berechneten Koordinate als zentralem Messergebnis.

2 Highlights aus der DIN 18213 GNSS-Feldprüfverfahren

Ausgehend von der Tatsache, dass ein GNSS-Messgerät kein Messgerät im engeren Sinn ist, das unabhängig von externer Infrastruktur aus sich selbst heraus sowie ohne Soll-Vorgaben geprüft werden kann, muss dieses zusammen mit weiteren Komponenten (z. B. Antenne, Aufstellleinrichtung) als Teilkomponente eines Gesamtsystems betrachtet werden. Weitere Teile dieses Gesamtsystems sind Navigationssatelliten, Datenübertragungstechniken und -ströme, Daten-aufbereitungsverfahren inkl. der zur Positionsbestimmung eingesetzten Algorithmen sowie optional ergänzende Komponenten, wie z. B. Dienstleister von Korrekturdiensten mit deren zugehörigem Instrumentarium und deren Vernetzungssoftware (vgl. Abb. 1).

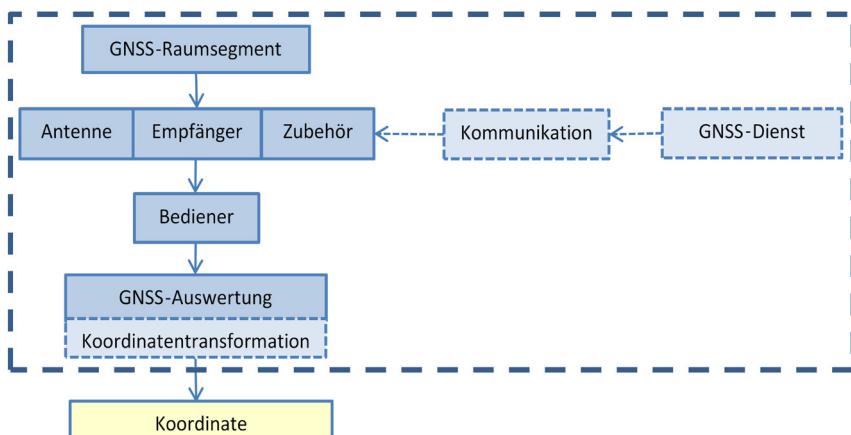


Abb. 1: GNSS-basierte Koordinate als integrales Ergebnis eines Messsystems (DIN 18123)

Den in der Norm betrachteten GNSS-Messgeräten ist jedoch gemein, dass sie ausgehend von empfangenen GNSS-Beobachtungsdaten schlussendlich dreidimensionale Koordinaten erzeugen und ausgeben.

Bei Anwendung der Norm wird also die im Feldprüfverfahren ermittelte dreidimensionale Koordinate als primäre Prüfgröße verstanden, die mit einem vorhandenen Sollwert verglichen wird. Das GNSS-Messgerät wird dazu in seiner Gebrauchskonfiguration in der Weise einer Prüfung unterzogen, dass die wesentlichen die Koordinatenbestimmung beeinflussenden Parameter in das Ergebnis der Prüfung einbezogen sind.

Das Feldprüfverfahren verfolgt einen dreistufigen Ansatz, so dass die Feldprüfungen mit zunehmendem Detailierungsgrad vorgenommen werden können. Die Verfahrensstufen sind:

1. Einfacher Soll-Ist-Koordinatenvergleich als schnelle Plausibilitätskontrolle auf einem koordinatenmäßig bekannten Messpunkt, der sowohl ein Referenzpunkt, der von Servicestellen betrieben wird, als auch ein nutzereigener Punkt sein kann,
2. Qualifizierter Koordinatenvergleich unter Einbeziehung einer vorgegebenen Messabfolge, der eine qualitative Bewertung erlaubt,
3. Erweiterte qualifizierte Prüfung ausgewählter GNSS-Systemteile, um die die bestehende Norm erweitert werden kann.

Die Verfahrensstufen sind bestimmten Messunsicherheitsklassen zugewiesen, die nicht auf geodätische Anwendungen begrenzt sind, sondern auf GNSS-basierte Anwendungen jedweder Art abzielen, die eine Koordinatenbestimmung liefern (vgl. Tab. 1 und Tab. 2). Die Norm ist somit beispielsweise unabhängig von dem im GNSS-Messgerät verwendeten Beobachtungsverfahren, den

Tab. 1: Klassifizierung der Messunsicherheiten in Lage- (U_{Lage}) und Höhekoordinaten ($U_{\text{Höhe}}$)

Klasse	U_{Lage} in mm	$U_{\text{Höhe}}$ in mm	Anforderung ergibt sich aus Anwendung in ...
A	< 10	< 20	hochwertigen Ingenieurvermessungen, z. B. Stabilitätsüberwachungen von Bauwerken und Rutschungshängen
B	[10; 30]	[20; 50]	typischen Vermessungen, u. a. in der Ingenieur- und Liegenschaftsvermessung
C	[30; 200]	[50; 200]	bautechnischen Vermessungen (z. B. Spatenmaß, Leitungsdokumentation)
D	[> 200; 5000]	[> 200; 5000]	Vermessungsaufgaben mit unscharfen Abgrenzungen

Tab. 2: Verfahrensstufen des GNSS-Feldprüfverfahrens

Verfahrens- stufe	Beschreibung	Messunsicherheitsklasse			
		A	B	C	D
1	Einfacher Koordinatenvergleich	x	x	x	
2	Qualifizierter Koordinatenvergleich	x	x		
3	Erweiterter qualifizierter Vergleich mit Konzentration auf ausgewählte System- teile		x		

genutzten Satellitendatenströmen sowie den gegebenenfalls verwendeten Korrekturdaten.

Abgerundet wird die DIN mit einer Auflistung der in der jeweiligen Messunsicherheitsklasse zu berücksichtigenden wesentlichen Einflussfaktoren sowie weitergehenden Empfehlungen bei Überschreitung der Messabweichungen, die Hinweise bei der Ursachensuche anbieten. Im Anhang der Norm ist eine Reihe typischer Beispiele enthalten.

Der Vorschlag zur Norm wurde erstmals auf dem DVW-Seminar „GNSS 2017“ dem Fachpublikum vorgestellt (Fritzensmeier et al. 2017b) und anschließend in den Gremien der AdV, des DVW, des VDV und des BDVI vorgelegt sowie mit Herstellern und Anwenderkreisen diskutiert. Zahlreiche Stellungnahmen, Meinungen, Hinweise, Änderungswünsche und/oder ergänzende Betrachtungen konnten hierdurch Eingang in die Norm finden, die immer mit dem Wunsch verbunden waren, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen. Noch offen ist derzeit der Transfer der hier beschriebenen Norm-Inhalte auf internationale Ebene.

3 Fazit und Ausblick

Die neue, hier vorgestellte DIN 18213 „Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte“ bietet dem sachkundigen Nutzer ein neues Feldprüfverfahren zur Untersuchung seines GNSS-Instrumentariums ohne Einschränkung auf eine bestimmte Genauigkeitsklasse, eine spezielle Instrumenten-Morphologie oder ein bestimmtes Beobachtungsverfahren an, wobei der Zeitaufwand einen routinemäßigen Einsatz ermöglichen soll. Die Mehrstufigkeit des Feldprüfverfahrens ermöglicht es, unterschiedlichsten Anforderungsprofilen gerecht werden zu können.

Literatur

- DIN 18213_2022-02: Optik und optische Instrumente – Feldverfahren zur Genauigkeitsuntersuchung geodätischer Instrumente – GNSS-Messgeräte.
- Fritzensmeier, K., Ehrhorn, U., Görres, B., Hollmann, R., Mayer, M., Pollinger, F. (2017b): Zum Status einer DIN-Norm zu GNSS-Feldprüfverfahren. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2017 – Kompetenz für die Zukunft. DVW-Schriftenreihe, Band 87, Wißner-Verlag, Augsburg, 57–69.
- Fritzensmeier, K., Haupt, M., Hülse, R., Hustedt, H., Kowalewski, D., Mayer, M., Peth, U. (2017a): GNSS-Einsatz in der Netzdokumentation der Energieversorgung. DVW-Merkblatt 13-2017. www.dvw.de/sites/default/files/merkblatt/daten/2017/13_DVW-Merkblatt_GNSS-Einsatz.pdf.

Kontakt

Dr.-Ing. Barbara Görres
Zentrum für Geoinformationswesen der Bundeswehr
Frauenberger Straße 250, 53879 Euskirchen
BarbaraGoerres@Bundeswehr.org

Dr.-Ing. Klaus Fritzensmeier
Manager Kunden Support und Service, Leica Geosystems GmbH Vertrieb
Triebstraße 14, 80993 München
klaus.fritzensmeier@leica-geosystems.com

Dipl.-Ing. Uwe Ehrhorn FRICS
ehrhorn vermessung
Georgstraße 15, 28832 Achim
u.ehrhorn@ehrhorn.de

Prof. Dr. Rolf Hollmann
Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg Schweinfurt,
Studiengang Geo
Röntgenring 8, 97084 Würzburg
rolf.hollmann@fhws.de

Dr.-Ing. Michael Mayer
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
michael.mayer@kit.edu

Dr. Florian Pollinger
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), AG 5.42
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
florian.pollinger@ptb.de

Aspekte der Qualitätssicherung für UAV-Anwendungen in der Photogrammetrie

Heinz-Jürgen Przybilla | Thomas Kersten

1 Einleitung

In der zurückliegenden Dekade hat sich die Anzahl der Nutzer von Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in geodätisch-photogrammetrischen Anwendungen deutlich erhöht. Fanden sich typische Aufgabenstellungen zu Beginn vorrangig in der topografischen Geländeaufnahme (mit dem Produkt „Orthophoto“) und der Volumenbestimmung von Halden und Gruben, so sind zwischenzeitlich auch Projekte im Bereich des Katasters (Rose 2016, Rembold 2022) und der Ingenieurvermessung (Beckmann 2019) nicht unüblich. Damit einhergehen wachsende Anforderungen an die Qualität und Genauigkeit der Produkte (Tab. 1).

Tab. 1: Geodätische UAV-Produkte und Genauigkeitsbereiche

Parameter	Topografie	Kataster	Ingenieurvermessung
Ground Sample Distance (GSD)	2,5 cm	1,5 cm	< 1 cm
Bildmaßstab	1:10000	1:5000	1:1000
Genauigkeitsbereich	10–20 cm	1–3 cm	0,2–1 cm
Genauigkeit erreichbar	+++	++	+
Georeferenzierung	RTK/PPK	RTK/PPK & GCP*	GCP**
Punktwolke	x	x	x
Volumina	x	–	–
Höhenlinien	x	–	–
Profile	x	–	x
Orthophoto	x	x	–
Karte	x	x	–
3D-Punkte	–	x	x

Quelle: Przybilla und Bäumker 2020

GCP* – mittels GNSS-Messung GCP** – mittels Netzmessung

Der Drohnen-(UAV-)Markt zeigt eine stetige technische Entwicklung, ebenso wie sich die Anzahl der Systemanbieter kontinuierlich vergrößert. Marktführer ist nach wie vor der chinesische Anbieter Da-Jiang Innovations Science and Technology Co. Ltd (DJI), allerdings mit sinkenden Marktanteilen (Abb. 1).

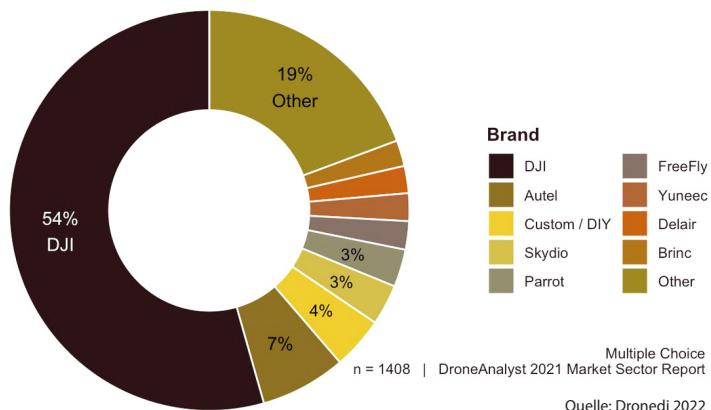


Abb. 1: Marktanteile kommerzieller Drohnenanbieter

Technologische Verbesserungen stehen im Fokus neuer Systeme. Diese umfassen Weiterentwicklungen der UAV-Hardware, wie z. B. Verlängerung der Flugzeiten, Systeme zur verbesserten Einbindung des UAV in den Luftraum, Kollisionserkennung und -vermeidung, redundante Systemkomponenten zur Verbesserung der Betriebssicherheit, Steigerung der Navigationsqualität durch Einsatz von Mehr-Frequenz-GNSS-Empfängern, etc.

Mit Blick auf das Ziel einer direkten Georeferenzierung bildgebender Sensoren (Kameras) sowie scannender Systeme ist die Verfügbarkeit der RTK/PPK-Technologie für die geodätische Anwendung von besonderer Bedeutung, da damit i. d. R. eine Aufwandsreduzierung bei den örtlichen Arbeiten (Passpunkt-Signalisierung und -bestimmung) einhergeht. Der erfolgreiche Einsatz von Airborne Scannern (auf UAV) ist zudem unmittelbar von der Qualität der Bestimmung der Trajektorie abhängig. Die Nutzung von Mehr-Frequenz-GNSS-Empfängern bietet hier sehr gute Voraussetzungen für eine im Vergleich zu bisherigen Möglichkeiten deutlich verbesserte Qualität der Positionsbestimmung. Allerdings werden die in den UAV verbauten Inertialen Messsysteme (INS/IMU) den diesbezüglichen Anforderungen nur bedingt gerecht, so dass insbesondere die Messung von Raumwinkeln der UAV-Plattform zur vollständigen Bestimmung der Lage im Raum verbesserungswürdig bleibt.

Das wesentlichste Hardwareelement einer UAV-Plattform ist jedoch durch den eingesetzten Sensor gegeben. In der geodätisch-photogrammetrischen An-

wendung ist dies in erster Linie ein bildgebendes System, d. h. eine digitale Kamera (Przybilla 2017). In jüngster Zeit wächst allerdings auch das Anwenderinteresse im Bereich der UAV-basierten Laserscanner. Der von DJI im Jahr 2021 verfügbar gemachte Laserscanner Zenmuse L1 zielt – insbesondere aufgrund seines Preises – auf den Massenmarkt. Von einer gesteigerten Nutzung – auch in Vermessungsprojekten – kann daher ausgegangen werden (Kersten et al. 2022).

2 Qualitätssicherung in UAV-Anwendungen

Maßnahmen zur Qualitätssicherung finden in allen Bereichen von Produktion und Dienstleistung statt, in der Regel auf der Grundlage nationaler (z. B. DIN) oder internationaler (z. B. ISO) Normen. Aber auch praxisorientierte Richtlinien (z. B. VDI/VDE) und/oder durch eine fachlich qualifizierte Person/Organisation definierte Rahmenbedingungen für einen Prozess (z. B. Merkblätter, DVW 2022) können qualitàsfördernd/-sichernd sein. Neumann und Alkhatib (2019) stellen in ihrem Beitrag „Normen, Richtlinien und Merkblätter für die Qualitätssicherung in der Geodäsie“ geltende Festlegungen übersichtlich vor. Eine umfassende Normen-Sammlung zu Geodäsie wird im DIN-Taschenbuch 111 „Geodäsie“ (DIN 2022a) gegeben. Schwieger und Zhang (2019) vertiefen das Thema Qualitätssicherung mit Blick auf die „Qualität in der Ingenieurgeodäsie“ und hier insbesondere auf die im geodätischen Alltag relevanten Qualitätsmerkmale „Genauigkeit und Zuverlässigkeit“.

Normen im Bereich photogrammetrischer Produkte (z. B. DIN 18740) und deren Begrifflichkeiten (DIN 18716) werden durch den Ausschuss NA 005-03-02 AA „Photogrammetrie und Fernerkundung“ bearbeitet (Baltrusch und Reulke 2017, DIN 2022b). Bzgl. des Themas „UAV“ und einer möglichen normativen Behandlung zur Qualitätssicherung gibt es bereits Diskussionen (Neumann und Alkhatib 2019), jedoch bis dato keine entsprechend ausgearbeiteten Vorschläge.

2.1 Komponenten der UAV-Prozesskette

Die nachfolgenden Ausführungen sind ein Versuch zur Beschreibung der Prozesskette (und der beteiligten Komponenten), die innerhalb einer Projektvermessung mittels UAV abgearbeitet wird. Zur Sicherung der Qualität eines erfolgreichen UAV-Betriebs sind verschiedene, miteinander verknüpfte Bereiche zu betrachten. Hierzu gehören:

- Administrativer Rahmen
- Fernpilot/Bediener
- Umgebungsbedingungen

- Technik der Flugplattform/des UAV
- Sensorik zur Datenerfassung
- Navigationsmodule und Verfahren zur Positionsbestimmung
- Fachwissen und Erfahrung (im Projektbetrieb)

Schwerpunkte der Betrachtungen sind dabei – aus geodätisch-photogrammetrischer Sicht – die Sensorik (das eigentliche Messgerät) und damit einhergehend die Verfahren zur Positionsbestimmung (z. B. direkte Georeferenzierung) sowie sich anschließende numerische Verfahren zur Bearbeitung der erfassten Bild- und ggf. Scannerdaten.

2.1.1 Administrativer Rahmen und Kompetenznachweis für Fernpiloten

Der administrative Rahmen hat sich für die Betreiber von UAV in den letzten Jahren deutlich reformiert. Ein wesentliches Ziel bestand in der Schaffung (möglichst) gleicher Betriebsbedingungen für UAV innerhalb der Europäischen Union (EU 2022a, 2022b; LBA 2022). Neben der Betreiberregistrierung sowie der Einordnung des UAV-Betriebs in eine Betriebskategorie ist der Kompetenznachweis für Fernpiloten ein wesentliches Element. Die Rolle der UAV als Teilnehmer im Luftraum wird durch diese Regularien deutlich gefestigt. Weitere Informationen finden sich z. B. beim Verband für unbemannte Luftfahrt (UAV DACH 2022) sowie dem Deutschen Modellflieger Verband (DMFV 2022).

2.1.2 Umgebungsbedingungen

Der Einsatz von UAV für Messzwecke ist – unabhängig von administrativen Vorgaben – nicht beliebig möglich. Einschränkungen des Betriebs ergeben sich vorrangig auf Grund der aktuellen Wetterlage (z. B. extreme Windverhältnisse), atmosphärischer Störungen, die die GNSS-Navigation beeinflussen können, sowie schlechter Objektbeleuchtung und Sichtbedingungen, mit unmittelbarem Einfluss auf die Belichtungsverhältnisse und fotografische Qualität der Luftaufnahmen (z. B. Schlagschatten, Unterbelichtung, Bildwanderung, Bewegungsunschärfen, etc.) wie in Abb. 2 dargestellt. Flüge vor und nach Sonnenaufgang (z. B. für Aufnahmen mit Thermalkameras) sind zudem nur mit behördlicher Genehmigung möglich.

2.1.3 Technik der Flugplattform/des UAV

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass das Ziel der Hersteller darin besteht, betriebssichere UAV-Systeme in den Markt zu bringen. In der Regel sind UAV für den EU-Markt mit einer CE-Kennzeichnung ausgestattet,



Abb. 2: Screenshots der APP „UAV Forecast“ mit Informationen zu aktuellen Umgebungsbedingungen. Links: Wetter, rechts: Flugzonen

die jedoch kein Qualitätssiegel darstellt, „sondern eine Kennzeichnung, die nur durch den Hersteller oder seinen Bevollmächtigten aufzubringen ist und mittels der er zum Ausdruck bringt, dass er die besonderen Anforderungen an das von ihm vertriebene Produkt kennt und dass Selbiges diesen entspricht“ (Wikipedia 2022).

Die in der neuen europäischen Drohnenverordnung vorgesehene Einteilung in Risikoklassen (C0-C4) beinhaltet neben Festlegungen für Gewicht und Funktionalität des UAV (z. B. ein System zur Fernidentifizierung, das die e-ID (elektronische Piloten Registriernummer) permanent sendet) auch Handlungsanweisungen für den örtlichen Einsatz (Flughöhen, Abstandsregeln) sowie Aussagen

zur Pilotenqualifikation (Drohnen.de 2022). Bis dahin geltende Übergangsregeln für Bestandssysteme enden zum 1.1.2023.

Sowohl technische Weiterentwicklungen als auch administrative Regularien sind im Sinne der Qualitätssicherung als positiver Schritt zu bewerten.

2.1.4 Sensorik zur Datenerfassung

Ein UAV kann grundsätzlich als ein Multi-Sensor-System betrachtet werden. Hierzu gehören Basis-Sensoren zur Stabilisierung der Flugplattform, zur Orientierung und Positionierung im Raum, zur Kollisionsvermeidung sowie entsprechende Aufnahmesensoren zur gezielten Erfassung ausgewählter Objekte und deren Eigenschaften.

Als Geometrie erfassende Sensoren finden – mit erster Präferenz – digitale Kameras Verwendung; dies auch in der geodätischen Anwendung, wenngleich perspektivisch von einer zunehmenden Nutzung von UAV-tauglichen Scannern ausgegangen werden kann. Przybilla (2017) zeigt in einer Marktübersicht Kamerasysteme, die auf UAV-Plattformen Verwendung finden, und teilt diese gleichzeitig in verschiedene Kategorien ein.

Die Entwicklungen der Kameratechnologie der zurückliegenden fünf Jahre haben sich auch auf dem UAV-Sektor bemerkbar gemacht. Größere Sensoren mit einer zum Teil deutlich erhöhten Anzahl von Bildpixelen (z. B. der sogenannte Vollformat-Sensor mit einem Bildformat von 36 mm × 24 mm) stehen aktuell zur Verfügung. Die Vergrößerung der einzelnen Bildpixel auf 4 bis 5 µm Seitenlänge hat gleichzeitig zur Verbesserung der Bildqualität – hier insbesondere im Bereich des Bildrauschens – geführt. Das grundsätzliche Konzept der Kameras ist jedoch beibehalten worden: es sind Systeme für den Massenmarkt der Fotografie, weniger auf die spezifischen Anforderungen einer photogrammetrischen Kamera hin orientiert.

Verglichen mit den digitalen Kameras für den Einsatz in der mantragenden Luftbild-Photogrammetrie werden die Anforderungen an eine langzeit-stabile Metrik durch im UAV-Bereich eingesetzte Kamerasysteme nicht erfüllt. Die Möglichkeit zur Verwendung von Wechselobjektiven steigert die fotografische Flexibilität bei der Aufnahme, verschlechtert gleichzeitig die gewünschte mechanische Stabilität der Kombination aus Kameragehäuse und Objektiv. Die Verwendung von Zoom-Objektiven stellt aus photogrammetrischer Sicht ein „No Go“ dar, da eine zuverlässige Bestimmung der Kamerakonstante nicht möglich ist. Eine im Sinne der Photogrammetrie stabile Metrik der Kamera lässt sich somit i. d. R. nicht erreichen.

Eine weitere, die Geometrie des Bildes ggf. beeinflussende Technik der Kamera ist durch den sogenannten „Rolling-Shutter“ (vergleichbar mit einem „Schlitzverschluss“) gegeben. Dies ist eine Methode zur Bilderfassung, bei der

ein Bild nicht im Ganzen, sondern Zeile für Zeile erfasst wird, so dass der obere Bildbereich etwas früher aufgezeichnet wird als der untere. Eine Nicht-Berücksichtigung dieses Effektes verschlechtert die numerische Bildorientierung eines UAV-Bildfluges zum Teil signifikant. Allerdings haben die gängigen Softwareanbieter zwischenzeitlich Korrekturfunktionen in ihren Programmen implementiert (z.B. Vautherin et al. 2016), die (bei Berücksichtigung durch den Nutzer) eine weitest gehende Kompensation dieses Effekts ermöglichen. Die durch den Rolling Shutter verursachten Problematiken treten bei Kameras mit „Global Shutter“ (Zentralverschluss) nicht auf. Dieser entspricht in seiner Funktion der strengen Zentralperspektive, da hier das komplette Bild zeitgleich erfasst wird (Lindstaedt und Kersten 2018).

Die oben genannten Qualitätskriterien erfordern daher einerseits eine individuelle Prüfung der geometrischen und radiometrischen Eigenschaften eines Kameratyps (z.B. durch universitäre Einrichtungen), andererseits aber auch deren entsprechende „Behandlung“ im photogrammetrischen Auswerteprozess (durch den Nutzer), in engem Kontext mit dem Thema einer notwendigen „Kamerakalibrierung“ (siehe Kap. 2.1.6).

2.1.5 Navigationsmodule und Verfahren zur Positionsbestimmung

UAV sind technisch mit Komponenten für autonome Flüge ausgestattet. Die Kenntnis der räumlichen Position ist dabei eine wesentliche Information, um Start- und Landepunkte zu definieren und mit dem UAV ausgewählte Zielorte anzusteuern. Barometrische Höhenmesser, inertiale Messeinheiten (IMU) auf der Grundlage von Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)-Bausteinen und GNSS-Systeme greifen hier ineinander. Die bisher (überwiegend) eingesetzten IMUs sind in der Lage, räumliche Winkel auf 0,1 bis 0,2 gon zu erfassen, was im Hinblick auf die Stabilisierung der Flugplattform ausreichend ist (als Messgrößen für eine direkte Georeferenzierung hingegen eher unzureichend). Mit Positionierungsgenauigkeiten von 3 bis 5 m liefern 1-Frequenz-GNSS-Empfänger zwar eine hinreichende Qualität für die Durchführung eines Bildflugs, für eine direkte Georeferenzierung der Bilddaten ist dies jedoch ebenfalls nicht ausreichend.

Von den Anbietern oftmals als „Vermessungsdrohnen“ bezeichnete Systeme verfügen daher über höherwertige 2-Frequenz-GNSS-Empfänger, die verfahrenstechnisch im Real-Time-Kinematic (RTK) oder Post-Processing-Kinematic (PPK) Modus betrieben werden können. Positionierungsgenauigkeiten von 1,5 bis 2 cm in der Lage und 2 bis 3 cm in der Höhe können bei ungestörtem GNSS-Empfang erreicht werden. Atmosphärische Bedingungen, aber auch der Betrieb des UAV im innerstädtischen Bereich (mit sichttoten Räumen zu den Satelliten und/oder eingeschränktem Empfang von Korrekturdaten infolge

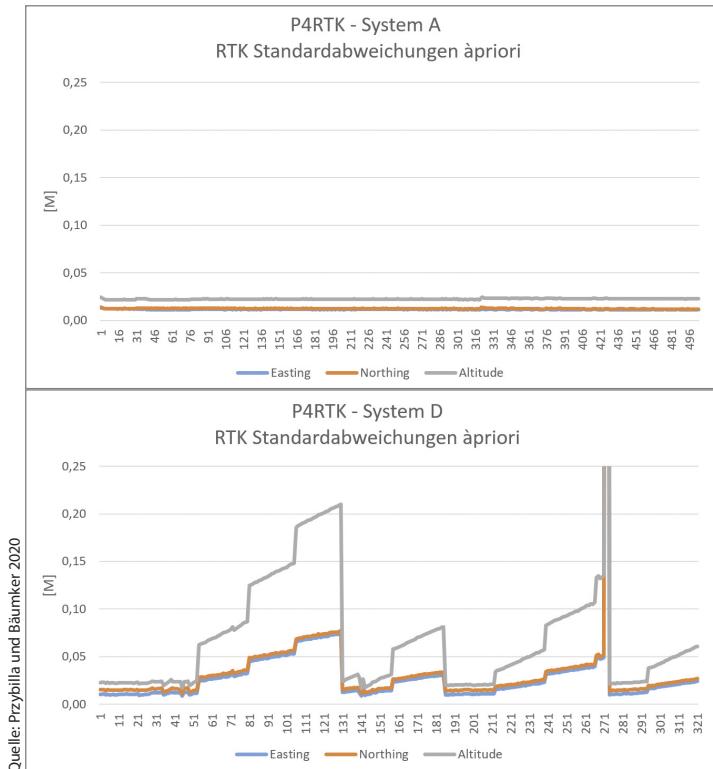


Abb. 3:
Standard-
abweichun-
gen (a priori)
der mittels
RTK ge-
messenen
Bildpositio-
nen.
Oben: Phan-
tom 4 RTK
System A.
Unten: Sys-
tem D (ab-
weichende
Skalierung)

schlechter Mobilfunknetze) können die Qualität der Positionsbestimmung deutlich beeinflussen (Przybilla und Bäumker 2020). Die in Abb. 3 dargestellten Genauigkeiten der Bildpositionen (Äußere Orientierungen) zweier mit RTK ausgestatteten DJI Phantom 4 RTK zeigen für System A durchgängig FIX-Lösungen (Genauigkeit ± 2 bis 3 cm) im zu erwartenden Bereich, während System D hier von deutliche Qualitätsabweichungen aufweist. Eine Ursache hierfür ist in der während des Flugs aufgetretenen signifikanten Verschlechterung der Wetterlage mit starken Böen und Regen zu vermuten. Neben den FIX-Lösungen treten systematisch wiederholende FLOAT-Lösungen (Genauigkeit $> \pm 10$ cm) auf, die für eine direkte Georeferenzierung eines Bildverbands – auf Grund geringer Gewichtung in der Bündelblockausgleichung – nur eingeschränkt geeignet sind.

2.1.6 Fachwissen und Erfahrung (im Projektbetrieb)

Das Sprichwort „Übung macht den Meister“ zielt darauf ab, dass „man“ (m/w/d) sich nur durch viel Übung verbessern kann. In der Praxis bedeutet dies, dass

aufbauend auf dem (vorhandenen) Fachwissen das Bearbeiten unterschiedlich gelagerter Projekte die Erfahrung im Umgang mit dem Messsystem steigert und letztlich in einer Verbesserung der Qualität der Ergebnisse resultiert.

Das Resultat einer Befragung auf dem DVW-Seminar „UAV 2020“ zu den „größten Wissensdefiziten“ im Bereich UAV (215 Stimmabgaben) ist in Abb. 4 dargestellt. Auch wenn eine solche Umfrage nur bedingt repräsentativ ist, so

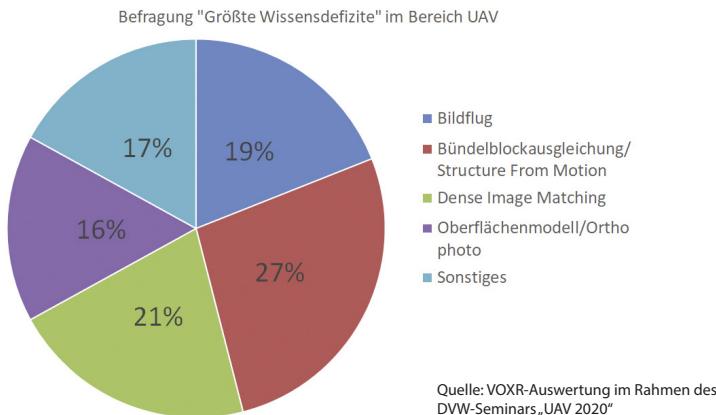


Abb. 4: Befragung zu „Größte Wissensdefiziten“ im Bereich UAV
(Stichprobe aus 215 Stimmabgaben)

lassen sich aufgrund des unter einem Fachpublikum durchgeföhrten „Votings“ Trends erkennen, die einerseits in Richtung des photogrammetrischen Fachwissens (Bündelblockausgleichung, Dense Image Matching) zielen (48 %), aber auch den Themenkomplex „Punktwolke“ betreffen.

Eine zielorientierte Verbesserung des photogrammetrischen Nutzerwissens durch Ausbildung und Weiterbildung bietet voraussichtlich auch zukünftig Potenzial für weitere Qualitätsverbesserungen im Gesamtprozess.

3 Systemuntersuchungen im UAV-Testfeld

Die Nutzung von Testfeldern hat in der Photogrammetrie eine lange Tradition (Ackermann 1975, Ebner et al. 1977, Grün 1986, Grün und Runge 1987). Aktuell sind sie in der manntragenden Luftbild-Photogrammetrie wesentliches Element für die Prüfung und Kalibrierung digitaler Luftbild-Kamerasysteme (Cramer 2010, Müller und Neumann 2016). Strukturell bestehen photogrammetrische Testfelder aus einer Gruppe räumlich verteilter und in der Regel signalisierter Punkte. In ihrer Funktion können diese als Passpunkte (GCP – Ground Control

Points) oder Kontrollpunkte (CP – Check Points) eingesetzt werden. Je nach Aufgabenstellung muss das Testfeld über eine geeignete geometrische Qualität verfügen, die für Untersuchungen von UAV-Systemen im Bereich weniger Millimeter für die 3D-Genauigkeit der Passpunkte innerhalb des geodätischen Netzes liegt.

Eine Erweiterung der in einem Testfeld enthaltenen Prüfbereiche bezüglich linien- und flächenhafter Objekte ist sinnvoll im Hinblick auf z. B. die Untersuchung der Qualität von (bildbasierten) Punktwolken.

Weiterhin bieten im Testfeld angeordnete Farbtafeln und Balkenmuster (z. B. Siemensstern) die Möglichkeit, radiometrische und geometrische Aussagen zum Bild und dessen Qualität abzuleiten (Meißner 2021).

3.1 Das UAV-Testfeld Zeche Zollern

Das UAV-Testfeld auf dem Areal des Industriemuseums Zeche Zollern in Dortmund wurde 2014 durch die Hochschule Bochum eingerichtet und bis einschließlich 2019 bei verschiedenen Kampagnen genutzt (Nex et al. 2015, Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016, Cramer et al. 2017, Przybilla et al. 2017, Kersten et al. 2020).

Die Fläche des Testfeldes umfasst nahezu das komplette Areal der Zeche. Seine Ausdehnung beträgt 320 m × 220 m (ca. 7 ha). Die höchste vertikale Ausdehnung ist über zwei ca. 40 m hohe Fördergerüste gegeben. Es besteht aus bis zu 49 rasterförmig angeordneten signalisierten Punkten (Abb. 5). Eine ausführliche Dokumentation zum geodätischen Netz (hinsichtlich Konfiguration, Messelemente, Genauigkeit und Zuverlässigkeit) gibt Bäumker (2020).

Über die Notwendigkeit zur Prüfung von UAV-Systemen auf der Grundlage von Testfeldern – sowie des Aufbaus derartiger Prüfmöglichkeiten – berichten zwischenzeitlich verschiedene Autoren (Cramer et al. 2020, Kersten und Lindstaedt 2022).

3.2 Das UAV-Testfeld Inselpark in Hamburg-Wilhelmsburg

Im Inselpark im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg, in welchem 2013 die Internationale Gartenschau ausgetragen wurde, hat der Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung (LGV) Hamburg ein aus 45 Passpunkten bestehendes Testfeld für UAV-Systeme auf einer Fläche von 150 m × 300 m eingerichtet. Im Vergleich zum Testfeld auf der Zeche Zollern weist es eine eher flache Topografie (ohne Hochpunkte) auf. Vom LGV wird für die Passpunkte eine Koordinaten-Genauigkeit von ±5 mm angegeben. Abb. 6 zeigt die gleichmäßige Verteilung der



Abb. 5: UAV-Testfeld Zeche Zollern – Punktübersicht



Abb. 6: Passpunktverteilung im UAV-Testfeld Inselpark Hamburg-Wilhelmsburg (links) und Passpunktsignale auf verschiedenen Untergrund (rechts) – Rasen, Asphalt, Sand und Stein

Passpunkte über den ca. 4,5 ha großen Bereich des Inselparks. Vor der jeweiligen Befliegung werden alle Passpunkte mittels Zieltafeln aus wasserfestem Kunststoff (50 cm × 50 cm) signalisiert (Abb. 6 rechts). Das Testfeld wurde bereits in einigen Kampagnen des LGV und in Zusammenarbeit mit der HCU Hamburg genutzt (Kersten und Lindstaedt 2022, Kersten et al. 2022).

3.3 Anmerkungen zum photogrammetrischen Prozess

Der photogrammetrische Prozess in der UAV-Anwendung steht in engem Kontext mit den Begriffen/Verfahren Structure from Motion (SfM), Bildtriangulation (Bündelblockausgleichung, BBA) und Dense Image Matching (DIM). Entsprechende Funktionalitäten werden über Softwarepakete wie Agisoft Metashape, Pix4Dmapper und andere zur Verfügung gestellt. Mit den angebotenen Workflows können scheinbar Projekte bearbeitet werden, ohne als Nutzer über vertieftes photogrammetrisches Fachwissen zu verfügen. Dabei ist das Zusammenwirken der verschiedenen Elemente im photogrammetrischen Abbildungsprozess der Zentralperspektive durchaus komplex. Die Umsetzung der Kollinearitätsbedingung (Objektpunkt, Projektionszentrum und Bildpunkt liegen auf einer Geraden) erfolgt numerisch im Rahmen der Bündelblockausgleichung mit Informationen zur Kamera (Innere Orientierung – IORI) und deren Positionen im Raum (Äußere Orientierung – ÄORI), sowie der Definition eines geodätischen Datums mittels Passpunkten, mit dem Ziel der Bestimmung weiterer 3D-Neupunkte (Punktwolken).

Im Sinne der Qualitätssicherung soll das Ergebnis über eine (projektabhängig) notwendige Genauigkeit und Zuverlässigkeit (Kontrolliertheit) verfügen.

3.4 Untersuchungsziele

Die nachfolgenden exemplarischen Untersuchungen in UAV-Testfeldern fokussieren sich auf mögliche Einflüsse des Kamerasensors, der Messung der Bildpositionen mittels RTK/PPK (vgl. Abb. 3) sowie der Nutzung von Passpunkten zur Blocklagerung und zeigen zudem deren Abhängigkeiten.

3.4.1 Phantom 4 RTK (mit Zenmuse X4S)

Die Resultate der im Testfeld Zeche Zollern durchgeführten Untersuchungen von zwei baugleichen Phantom 4 RTK mit der integrierten Zenmuse X4S (20 MPixel) sind in den Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt. Die Bildorientierungen erfolgen mit typischen Lagerungskonfigurationen, die sich aus einer Kombina-

tion von Passpunkten und mittels RTK gemessener Äußerer Orientierung zusammensetzen (integrierte Sensororientierung). Für alle Konfigurationen wurde eine einheitliche Innere Orientierung (UNIFIED) für die zwei Teilstufen einer Kreuzbefliegung eingeführt. Eine weitere Berechnung erfolgte mit zwei separaten Inneren Orientierungen (SEPARATE) für die Blocklagerung mit beobachteter ÄORI und 4 GCP in den Blockecken. Ziel dieser Variante ist einen eventuellen Einfluss veränderlicher Fokussierung der Kamera zu erkennen.

Die Überprüfung der Blockgeometrie, hier insbesondere auch von Blockdeformationen, erfolgt über die Restabweichungen (RMSE) an den Kontrollpunkten (Checkpoints – CP, Abb. 7). Der Einfluss der Lagerungsart auf den jeweiligen Block wird sehr deutlich. Es können folgende Effekte abgeleitet werden:

- **Direkte Lagerung auf die gemessene ÄORI**

Die Abweichungen an den CP liegen, bezogen auf die Lagekoordinaten, in der Größe der RTK-Genauigkeit (10 bis 20 mm), jedoch zeigen sich z. T. signifikant große Abweichungen in der Höhe. Eine zuverlässige Lagerung für diese Variante (ohne Bodenpasspunkte) ist nicht erkennbar.

- **Indirekte Lagerung mit maximaler Passpunkt-Besetzung**

Da in dieser Variante alle GCP zur Lagerung genutzt werden, ist eine Kontrolle mittels unabhängiger CP nicht möglich. Die hier betrachtete Lagerungsvariante ist mit einem sehr hohen terrestrischen Aufwand verbunden.

- **Indirekte Lagerung mit minimaler Passpunkt-Besetzung**

Aus der Lagerung über 4 GCP in den Blockecken ist deutlich erkennbar, dass keine hinreichende Stabilität in den Bildverbänden erreicht werden kann. Während die Lageabweichungen der CP noch im Bereich der GSD liegen, übersteigen die Höhenabweichungen diese um den Faktor 15 bis 30. Eine Ursache für dieses Resultat ist in der Metrik der Kamera bzw. den offensichtlich unzureichenden Möglichkeiten zur simultanen Kalibrierung zu sehen.

- **Integrierte Lagerung auf die gemessene ÄORI und vier Passpunkte**

Die vorliegenden Resultate zeigen die Wirksamkeit der integrierten Lagerung auf Basis der RTK-Messungen in Verbindung mit einer Passpunktbesetzung in den Blockecken. Die Abweichungen an den CP liegen im Bereich der GSD, in Teilen auch darunter.

- **Integrierte Lagerung auf die gemessene ÄORI und einem Passpunkt**

Während die direkte Georeferenzierung mittels gemessener Äußerer Orientierung in den vorliegenden Datensätzen durch signifikante Höhenabweichungen gekennzeichnet ist, sind die positiven Auswirkungen eines zusätzlichen Passpunktes (in der Blockmitte) deutlich erkennbar. Die systematischen Höhenabweichungen an den CP reduzieren sich auf ca. 15 bis 30 mm und liegen damit auf dem Genauigkeitsniveau der RTK-Messungen. Die Qualität der hier erzielten Genauigkeiten bei der Bildorientierung ist für topografische Anwendungen ausreichend.

Voraussetzung für die in-situ-Kalibrierung der Kamera in der BBA ist neben einer geeigneten Aufnahmekonfiguration (hier: Kreuzverband) das Vorliegen entsprechender Lagerungsinformationen (Passpunkte, gemessene Elemente der ÄORI). Abb. 8 zeigt Änderungen der Parameter Kamerakonstante (Δc) und Hauptpunktlage (x_H , y_H) in Abhängigkeit von der Blocklagerung. Es liegen geringe Änderungen in der Hauptpunktlage vor (< 1 Pixel), ein Resultat, das für die hohe Stabilität der jeweiligen Kamera spricht.

Der Einfluss der Blocklagerung auf den Parameter „Kamerakonstante“ wird sehr deutlich. Bei der Nutzung von ausschließlich vier Passpunkten in den Blöckecken ist eine zuverlässige Bestimmung dieses Parameters nicht möglich. Die Abweichungen gegenüber allen anderen Varianten betragen zwischen 20 bis

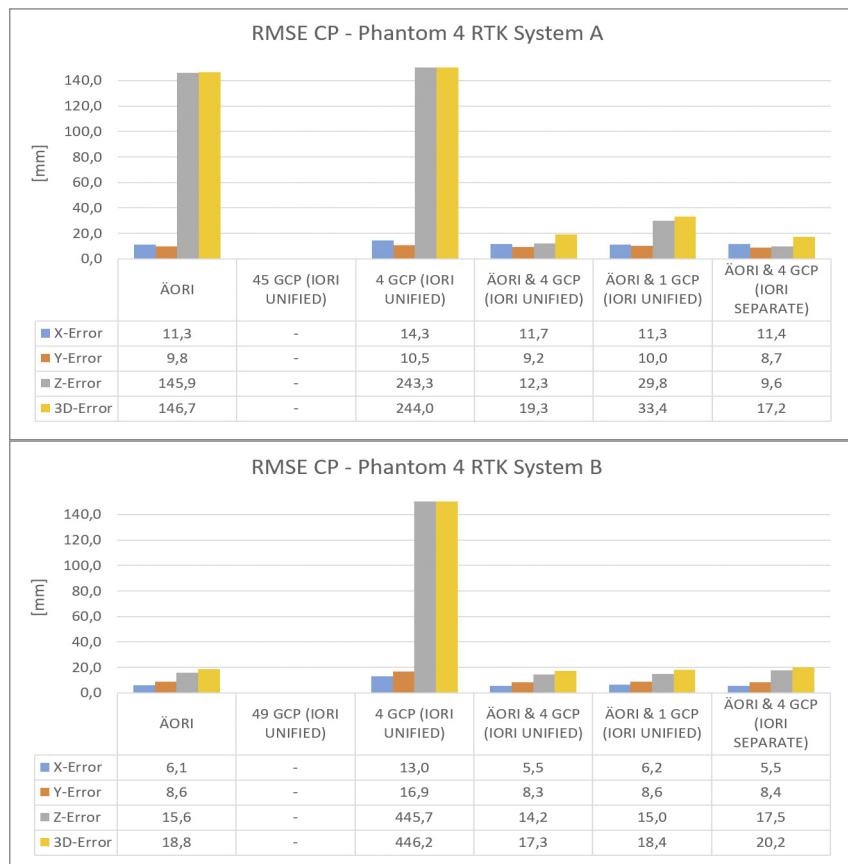


Abb. 7: RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart (direkt: ÄORI – indirekt: GCP – integriert: ÄORI+GCP) (Systeme A und B)

80 Pixel. Die entsprechenden (negativen) Folgen zeigt Abb. 7, hier insbesondere bei den dargestellten Höhenabweichungen an den Kontrollpunkten.

Die verwendeten Ansätze einer gemeinsamen (UNIFIED) bzw. separaten (SEPARATE) Parametrisierung der Inneren Orientierung für die jeweiligen Teilstöße zeigt nahezu identische Resultate, sowohl für die RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (Abb. 7) als auch für die Variation der Kamerakonstante (Abb. 8). Hieraus ist ableitbar, dass von einer Stabilität der untersuchten Parameter im Verlauf der zwei Teilstöße des Kreuzverbands ausgegangen werden kann.

Weiterführende Informationen zu den hier gezeigten Untersuchungen finden sich in Przybilla und Bäumker (2020).

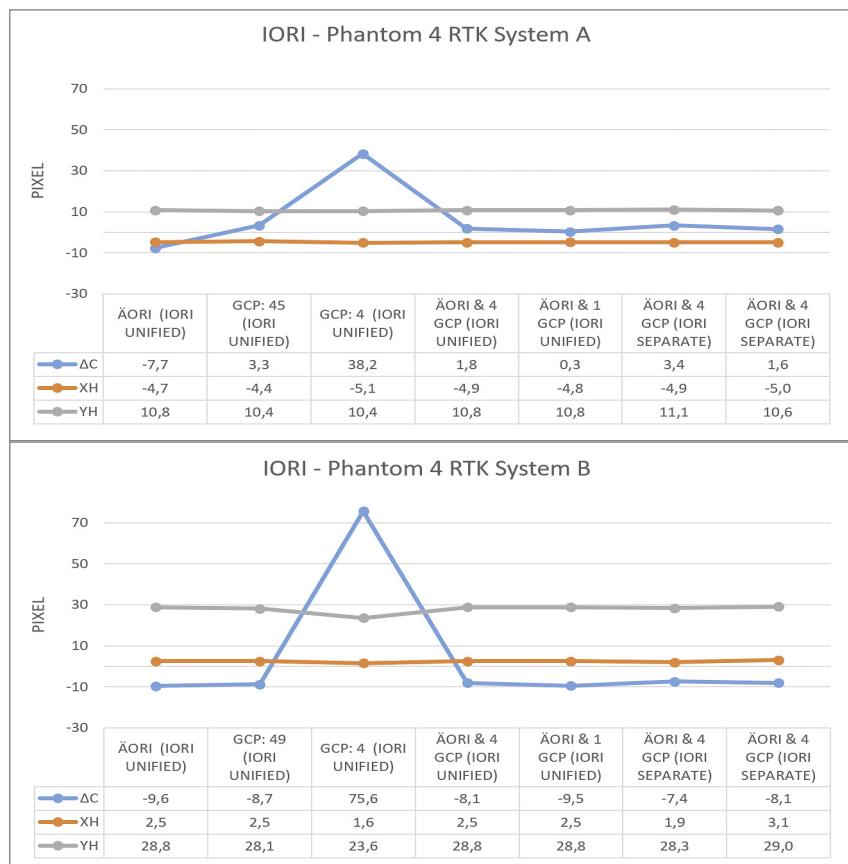


Abb. 8: Änderungen der Parameter der Inneren Orientierung (ΔC , x_H , y_H) in Abhängigkeit von der Blocklagerung sowie gemeinsamer bzw. separater Parameter für die Teilstöße (Systeme A und B). (Hinweis: die Abweichungen ΔC beziehen sich auf einen einheitlichen Startwert.)

3.4.2 Matrice 300 RTK mit Zenmuse P1

Die Matrice 300 RTK ist das aktuelle UAV der Firma DJI, das auch auf die Zielgruppe geodätisch-photogrammetrischer Anwender hin konzipiert ist. Mit der Zenmuse P1 steht zudem eine Digitalkamera im Vollformat zur Verfügung, die wahlweise mit drei verschiedenen Wechselobjektiven (24 mm, 35 mm, 50 mm) eingesetzt werden kann. Die Flexibilität der Objektivwahl wird jedoch durch mögliche mechanische Instabilitäten (mechanisches Spiel zwischen Kamerakörper und Optik) erkauft, und steht damit im Gegensatz zur stabilen Metrik, die bei einer photogrammetrisch genutzten Kamera gewünscht ist.

Die folgenden Untersuchungen basieren auf einem Bildflug mit der Zenmuse P1 (35 mm-Objektiv) im Hamburger Testfeld, bei dem der von DJI als „Smart Oblique Capture“ (SOC) bezeichnete Erfassungsmodus genutzt wurde. Neben Nadiraufnahmen werden, abhängig von der Position des UAV im Bildverband, bis zu vier weitere Schrägaufnahmen pro Aufnahmestandort erstellt. Für die Blockgeometrie bedeutet dies eine deutliche Erhöhung der Strahlenschnitte, bei gleichzeitiger Verbesserung der Strahlenschnittgeometrie. Ein derartig erfasster Bildverband (Flughöhe über Grund: 70 m, Längs- und Querüberdeckung: 80 %, Anzahl der Bilder: 2215, davon 441 Nadiraufnahmen, GSD Nadir: 8,8 mm, GSD Oblique: 10,2 mm) sollte ein hohes Genauigkeitsniveau aufweisen, insbesondere auch bezüglich der zu erwartenden Höhengenauigkeit.

Abb. 9 zeigt die Resultate (RMSE-Werte) der verschiedenen Berechnungsvarianten. Die Blocklagerung erfolgt dabei grundsätzlich über die mittels RTK gemessenen Bildpositionen (ÄORI) in Verbindung mit variierenden Passpunkt-konfigurationen. Auffällig ist die schlechte Höhengenauigkeit des hochredundanten Bildverbandes, die selbst bei maximaler Anzahl der GCP (44) den ca. doppelten Wert der GSD annimmt. Varianten mit geringerer Anzahl von Passpunkten verschlechtern die Höhengenauigkeit deutlich (Faktor 4 der GSD). Dies betrifft auch den Block der ausschließlich auf Basis der RTK-Beobachtungen gelagert wird (Abb. 9 rechte Spalte).

Eine Lagerung des Bildverbandes mittels direkter Georeferenzierung scheint im vorliegenden Fall nicht empfehlenswert, allerdings ist auch die integrierte Lagerung (hier: 5 GCP + RTK) im Gegensatz zu den Resultaten aus der Untersuchung der Phantom 4 RTK (4 GCP + RTK, siehe Kap. 3.4.1) erkennbar schlechter.

Zu vermuten sind systematische Effekte, die in der Konfiguration zwischen RTK-System (Antennenzentrum) und dem Projektionszentrum der Kamera auftreten. Dieser sogenannte „Hebelarm“ wird positionsabhängig berechnet und als Korrekturgröße an der jeweils gemessen RTK-Position angebracht. Grundsätzlich denkbar wären auch Synchronisationsfehler zwischen dem Zeitpunkt der Kameraverschlussauslösung und der Registrierung der Bildposition durch das GNSS-System.

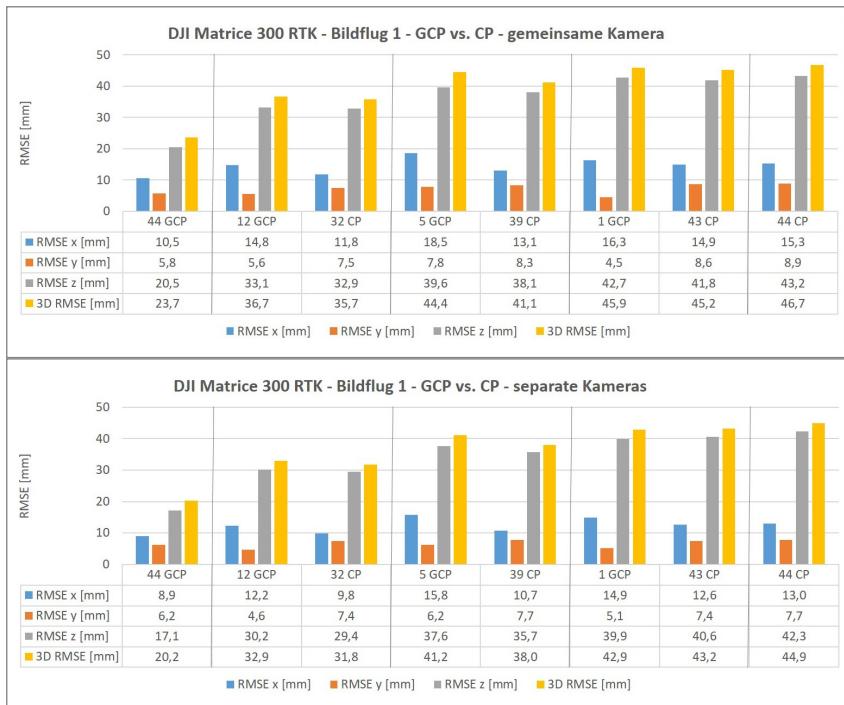


Abb. 9: RMSE-Werte an den Pass- (GCP) und Kontrollpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart für den „Smart Oblique Capture“-Bildflug der Matrice 300 RTK. Oben: 1 IORI für alle Bilder des Flugs; unten: 3 verschiedene IORIs, separiert nach Nadir- und Schrägaufnahmen

Eine erste Untersuchung der genannten Effekte basiert auf einer indirekten Lagerung des Blocks mit maximaler Passpunkt-Besetzung, bei gleichzeitiger „Abschaltung“ der RTK-Beobachtungen. **Abb. 10** zeigt deutlich systematische Korrekturen der RTK-Positionen (ÄORI), sowohl in der Ausrichtung bzw. Form der Fehler-Ellipsen (Lage) als auch in der Höhe (Fehler in Z durch Farbe der Ellipsen dargestellt). Die geschätzten Kamerapositionen sind mit einem schwarzen Punkt markiert. Gleichzeitig verringern sich die RMSE-Werte an den Passpunkten deutlich (**Abb. 11**) auf ein grundsätzlich zu erwartendes Genauigkeitsniveau. Die oben genannten möglichen Ursachen für vorliegende Problematik sind durch weitere, zukünftige Untersuchungen zu verifizieren!

Einen wichtigen Aspekt für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit photogrammetrischer Punktbestimmung durch UAV-Bildflugdaten stellt die Kamera-Kalibrierung dar, da der Nutzer nicht davon ausgehen kann, dass eine stabile Innere Orientierung der Kamera vorliegt. Welche Aufnahmekonfiguration bietet

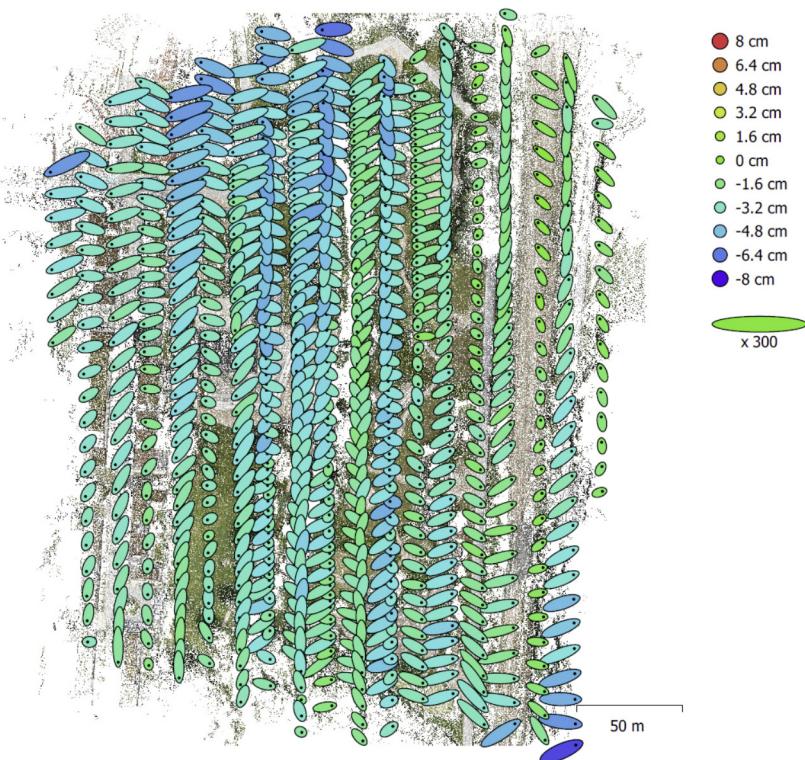


Abb. 10: Kamerapositionen und Verbesserungen (ERROR) für den „Smart Oblique Capture“-Bildflug der Matrice 300 RTK aus Agisoft Metashape

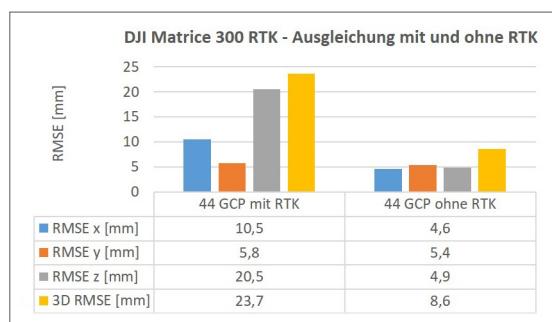


Abb. 11:
RMSE-Werte bei Lagerung
auf 44 Passpunkte mit
RTK (links) und ohne RTK
(rechts) für den „Smart
Oblique Capture“-Bildflug
der Matrice 300 RTK

nun die beste Voraussetzung für eine signifikante Schätzung der Kameraparameter?

Przybilla (2020) und Kersten et al. (2020) zeigen in ihren Untersuchungen, dass eine Kreuzbefliegung mit um 20 % unterschiedlichen Flughöhen gute Bedingungen für eine signifikante Kamerakalibrierung garantieren, insbesondere wenn das Testfeld bzw. der Objektraum nur geringe Höhenunterschiede aufweist. Bei den Untersuchungen der Matrice 300 RTK im Hamburger Testfeld konnte nachgewiesen werden, dass ein „Smart Oblique Capture“ Bildflug als Kombination von Nadir- und Schrägaufnahmen eine deutlich bessere Grundlage für eine Kamerakalibrierung bildet als ein reiner Nadirbildflug.

In Abb. 12 ist ein Vergleich der geschätzten Kameraparameter (oben) und deren Standardabweichungen (unten) für den „Smart Oblique Capture“ Bildflug und den Nadirbildflug zusammengestellt. Aufgrund der hohen Redundanz variiert die Kamerakonstante (Δc) nur um 0,3 Pixel für den SOC-Bildflug, während Δc sich beim Nadirflug bereits um 2,5 Pixel zwischen den Passpunktvarianten verändert. Der Bildhauptpunkt (x_H , y_H) bleibt jedoch bis auf eine Ausnahme bei beiden Bildverbänden sehr stabil. Die drei Kameraparameter sind beim SOC-Bildflug mit einer deutlich geringeren Standardabweichung bestimmt

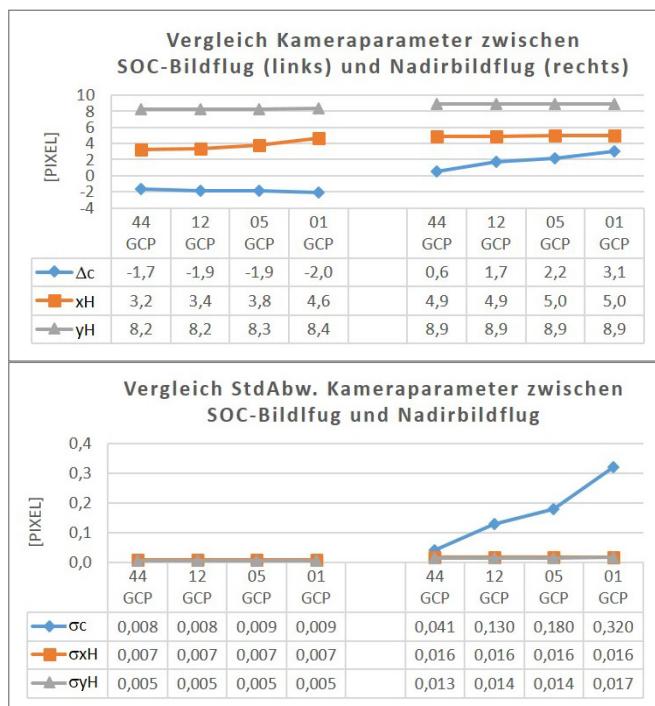


Abb. 12:
Vergleich der Kameraparameter (links) und deren Standardabweichungen (rechts) für den „Smart Oblique Capture“-Bildflug und den Nadirbildflug der Matrice 300 RTK. (Hinweis: Die Abweichungen Δc beziehen sich auf einen Mittelwert.)

worden (Abb. 12 unten) als beim Nadirbildflug, was auf eine signifikant stabilere Kamerakalibrierung schließen lässt. Im Nadirbildflug ist die Standardabweichung für die Kamerakonstante bis um den Faktor 36 höher, was u. a. auch auf das sehr flache Testfeld zurückzuführen ist.

4 Fazit

Der vorliegende Beitrag nennt die Komponenten für ein Vermessungsprojekt mittels UAV und analysiert deren Einfluss auf die Qualität der Resultate. Im Fokus der Betrachtungen stehen aus geodätisch-photogrammetrischer Sicht die messenden Sensoren (Kamera, Scanner, GNSS) sowie die hieraus resultierenden Messdaten und deren Verarbeitung mittels entsprechender Softwarelösungen (u. a. durch Verfahren wie Structure from Motion, Bündelblockausgleichung, Dense Image Matching).

Für die Prüfung (und ggf. Kalibrierung) der genannten Systeme bzw. Sensoren sind räumliche Testfelder mit einer entsprechend großen Anzahl von signalisierten Passpunkten in der Photogrammetrie ein probates Mittel. Sie ermöglichen eine Bewertung der Prozesse sowie der beteiligten Komponenten (Sensoren). Aktuell sind bildgebende Sensoren (Kameras) bei Messungen mit UAV das bevorzugte Messmittel, aber zunehmend kommen auch Laserscanner zum Einsatz (Studnicka et al. 2020, Kersten et al. 2022, Mandlburger 2022).

Am Beispiel zweier in der geodätischen Praxis besonders häufig eingesetzter UAV-Systeme konnte deren Leistungsfähigkeit durch entsprechende Testfeldbefliegungen geprüft werden, insbesondere auch im Zusammenspiel mit der Prozesskomponente „RTK-GNSS“.

Für das DJI UAV-System, bestehend aus der Plattform Matrice 300 RTK und der Kamera Zenmuse P1, wurden im Rahmen der Prüfung „Auffälligkeiten“ detektiert, die möglicherweise aus der herstellerseitigen Beschreibung der Geometrie zwischen Antennenzentrum und dem Projektionszentrum der Kamera (Hebelarm) resultieren. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Kombination von präzisen (± 2 bis 3 cm) und zuverlässigen RTK-GNSS-Messungen und hochgenauen, signalisierten Passpunkten (± 5 mm) innerhalb eines räumlichen Testfeldes, ermöglicht eine signifikante Bestimmung der Inneren und Äußeren Orientierungsparameter sowie eine Stabilisierung des Luftbildverbandes durch Bündelblockausgleichung. Die Erfassung im Rahmen einer Kreuzbefliegung in unterschiedlichen Flughöhen steigert dabei die Blockgenauigkeit, verbunden mit dem Effekt einer verbesserten Kalibrierung der Kamerakonstante.

Eine UAV-Befliegung sollte zudem nicht vollständig ohne Passpunkte durchgeführt werden. Mit Blick auf die Ausschöpfung des Genauigkeitspotenzials des

eingesetzten UAV-Systems und unter Berücksichtigung geodätischer Grundprinzipien, z. B. die Zuverlässigkeit einer Messung zu gewährleisten, kann nicht auf sie verzichtet werden. Für topografische Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsspezifikationen könnte unter Umständen ein Passpunkt in der Mitte des Objektraumes ausreichen, wenn die RTK-GNSS-Messungen mit einer Standardabweichung von ± 2 bis 3 cm zuverlässig vorliegen. Allerdings empfiehlt es sich, zur Kontrolle der UAV-Befliegung mindestens fünf Passpunkte im Objektraum zu verteilen.

Literatur

- Ackermann, F. (1975): Results of Recent Tests in Aerial Triangulation. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 41(1), 91–99.
- Baltrusch, S., Reulke, R. (2017): DIN-Normungsarbeit in der Photogrammetrie und Fernerkundung – Stand und Perspektiven. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation eV, Band 26, 280–287. www.dgpf.de/src/tagung/jt2017/proceedings/proceedings/papers/27_DGPF2017_Baltrusch_Reulke.pdf.
- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagennetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 103–120.
- Beckmann, R. (2019): Einsatz von UAV in der Ingenieurvermessung – Praxisanwendungen aus dem Tiefbau. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum. DVW-Schriftenreihe, Band 94, Wißner-Verlag, Augsburg, 123–132.
- Cramer, M. (2010): The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (2), 73–82. DOI: [10.1127/1432-8364/2010/0041](https://doi.org/10.1127/1432-8364/2010/0041).
- Cramer, M., Koelle, M., Haala, N., Havel, P. (2020): Flächenhaftes UAV-Monitoring: das Hessigheim-Projekt. Allgemeine Vermessungsnachrichten (avn) 03/2020, 107–117.
- Cramer, M., Przybilla, H.-J., Meißner, H., Stebner, K. (2017): Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, 67–84.
- DIN (2022a): DIN-Taschenbuch 111 „Geodäsie“: Umfassende Normen-Sammlung zu Geodäsie. www.beuth.de/de/publikation/din-taschenbuch-111/278952505, letzter Zugriff 28.02.2022.
- DIN (2022b): Ausschuss NA 005-03-02 AA „Photogrammetrie und Fernerkundung – Normen im Bereich der photogrammetrischen Produkte (DIN 18740) und deren Begrifflichkeiten (DIN 18716). www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nabau/nationale-gremien/72366/wdc-grem:uin21:54749652!search-grem-details?masking=true
- DJI (2022): Zenmuse P1. www.dji.com/de/zenmuse-p1, letzter Zugriff 20.01.2022.
- DMFV (2022): Informationen des Deutschen Modellfliegerverbands zum Betrieb von Drohnen. www.dmfv.aero/drohnen/, letzter Zugriff 07.03.2022.

- Drohnen.de (2022): Neue EU Drohnenverordnung 2021/2022. www.drohnen.de/20336/drohnen-gesetze-eu/, letzter Zugriff 09.03.2022.
- Dronedj (2022): Marktanteile kommerzieller Drohnen-Anbieter. <https://dronedj.com/2021/09/14/droneanalyst-dji-market-share-2021/>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- DVW (2022): DVW-Merkblätter. dvw.de/component/search/?searchword=merkblatt&searchphrase=all&Itemid=9999, letzter Zugriff 28.02.2022.
- Ebner, H., Krack, K., Schubert, E. (1977): Genauigkeitsmodelle für die Blindelblocktriangulation. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 5, 141–148.
- EU (2022a): DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/947 DER KOMMISSION vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0947>, letzter Zugriff 07.03.2022.
- EU (2022b): DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2019/945 DER KOMMISSION vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme. <https://lexparency.de/eu/32019R0945/>, letzter Zugriff 07.03.2022.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Grün, A. (1986): Projekt „Uster“ – ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtchnik, Heft 4, 136–142.
- Grün, A., Runge, A. (1987): Projekt „Heinzenberg“ – Präzisionsphotogrammetrie im Gebirge. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik, Heft 7, 271–276.
- Kersten, T., Lindstaedt, M. (2022): UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS – brauchen wir da noch Passpunkte? In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2022 – Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, Band 100, Wißner-Verlag, Augsburg, 39–58.
- Kersten, T., Schlömer, F., Przybilla, H.-J. (2020): Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 121–140.
- Kersten, T., Wolf, J., Lindstaedt, M. (2022): Genauigkeitsuntersuchungen des UAV-Systems DJI Matrice 300 RTK mit den Sensoren P1 und L1 im Hamburger Testfeld. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2022, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 298–313.
- LBA (2022): Informationen des Luftfahrtbundesamts zum Betrieb von Drohnen. www.lba.de/DE/Drohnen/Drohnen_node.html, letzter Zugriff 07.03.2022.
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Wißner-Verlag, Augsburg, 81–101.

- Mandlburger, G. (2022): UAV-basiertes Laserscanning für Topographie und Bathymetrie – State-of-the-Art und Trends. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2022 – Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, Band 100, Wißner-Verlag, Augsburg, 89–100.
- Meißner, H. (2021): Determination and Improvement of Spatial Resolution obtained by Optical Remote Sensing Systems. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin. DOI: [10.18452/22348](https://doi.org/10.18452/22348).
- Müller, C., Neumann, K. (2016): LEICA DMC III Calibration and Geometric Sensor Accuracy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(3/W4), 1–9. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-1-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-1-2016).
- Neumann, I., Alkhattib, H. (2019): Normen, Richtlinien und Merkblätter für die Qualitätssicherung in der Geodäsie. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. DVW-Schriftenreihe, Band 95, Wißner-Verlag, Augsburg, 31–38.
- Nex, F., Gerke, M., Remondino, F., Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Zurhorst, A. (2015): ISPRS benchmark for multi-platform photogrammetry. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-3/W4: 135–142. DOI: [10.5194/isprsaannals-II-3-W4-135-2015](https://doi.org/10.5194/isprsaannals-II-3-W4-135-2015).
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, 51–66.
- Przybilla, H.-J. (2020): UAV-Befliegung – Alles klar? Über den Einfluss der Aufnahmekonfiguration. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 61–76.
- Przybilla, H.-J. (2022): Wer wird denn gleich in die Luft gehen? APPs zur Bildflugplanung für UAV. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 17–38.
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M. (2020): RTK and PPK: GNSS-Technologies for Direct Georeferencing of UAV Image Flights. FIG Proceedings Working Week 2020. https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2020/papers/ts01b/TS01B_przybilla_manfred_10801.pdf.
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 24, 45–54.
- Rembold, M. (2022): Neuberechnung des Katasterzahlenwerks mit Anschluss an UAS-bestimmte Gebäudepunkte. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2022, 97–103. DOI: [10.12902/zfv-0382-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0382-2021).
- Rose, A. (2016): Einsatz von UAV bei Katastervermessungen – ein Update. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, 191–201.
- Schwieger, V., Zhang, L. (2019): Qualität in der Ingenieurgeodäsie – Begriff und Modellierung. In: DVW e. V. (Hrsg.): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2019. DVW-Schriftenreihe, Band 95, Wißner-Verlag, 9–30.
- Studnicka, N., Amon, P., Fürst, C. (2020): Luftgestütztes Laserscanning aus niedriger Höhe mit UAVs. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 15–30.

UAV DACH (2022): Verband für unbemannte Luftfahrt. www.uavdach.org, letzter Zugriff 02.03.2022.

Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C. (2016): Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 3(3), 139–146. DOI: [10.5194/isprsannals-III-3-139-2016](https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-3-139-2016).

Wikipedia (2022): CE-Kennzeichnung. <https://de.wikipedia.org/wiki/CE-Kennzeichnung>, letzter Zugriff 31.03.2022.

Kontakt

Heinz-Jürgen Przybilla
(Ehemals Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie)
Essener Straße 117, 45529 Hattingen
heinz-juergen@przybilla.biz

Thomas P. Kersten
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie und Laserscanning
Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg
thomas.kersten@hcu-hamburg.de

Session 3:

Interdisziplinäre Anwendungen und Auswertestrategien

Qualitätssicherung im Rahmen des Exzellenzclusters IntCDC

Laura Balangé | Li Zhang | Volker Schwieger

1 Einleitung

Schon lange ist die Qualitätssicherung im Bau von enormer Bedeutung. Hierbei kommt es nicht selten zu einem Interessenkonflikt zwischen der möglichst zügigen und damit möglichst günstigsten und der technisch besten Ausführung. Um die entsprechende Balance zu finden, ist ein vorab definiertes Qualitätskonzept erforderlich, damit die Interessen aller Beteiligten transparent berücksichtigt werden können. Des Weiteren wird der rasante Anstieg am Bedarf an Wohnraum zu einer globalen Herausforderung unserer Zeit. Das Exzellenzcluster der Universität Stuttgart „Integrative Computational Design and Construction for Architecture“ (IntCDC, deutsch: Integriertes computerbasiertes Bauen und Entwerfen für die Architektur) hat sich zur Aufgabe gesetzt dieses Problem anzugehen. Hierfür soll das Potenzial digitaler Technologien genutzt werden, um in einem integrativen und interdisziplinären Umfeld die Möglichkeiten des Designs und Bauens neu zu denken (Menges 2019). Im folgenden Artikel werden zum einen die allgemeinen Qualitätsbegriffe und der prinzipielle Aufbau eines Qualitätsmodells behandelt. Zum anderen werden im Speziellen das im Projekt entwickelte holistische Qualitätsmodell, welches soziale, ökologische und technische Aspekte berücksichtigt, sowie zwei verschiedene Anwendungsfälle der technischen Qualitätsbewertung im Projekt betrachtet.

2 Holistisches Qualitätssicherungskonzept im Rahmen von IntCDC

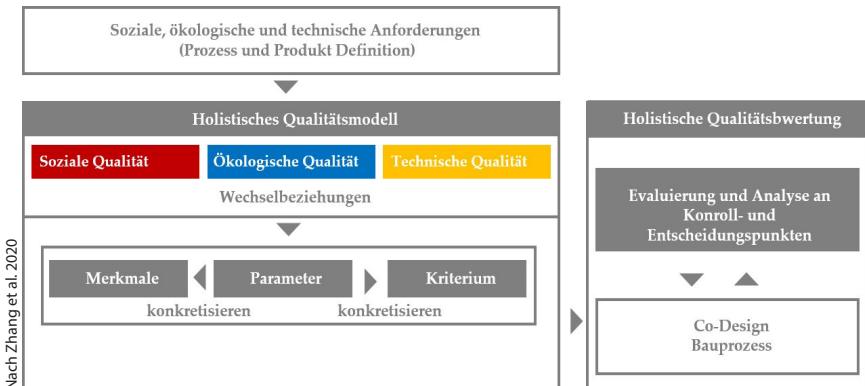
Für die Erstellung eines Qualitätsmodells mit dazugehörigem Qualitätssicherungskonzeptes, stellt sich zunächst einmal die Frage, wie die Qualität genau definiert wird. Nach DIN EN ISO 9000:2005 versteht man Qualität als „Grad in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“. Hierbei versteht man unter einem Qualitätsmerkmal ein „inhärentes Merkmal eines Produktes, Prozesses oder Systems, das sich auf eine Anforderung bezieht“ (DIN EN ISO 9000 2005). Die Betrachtung dieser beiden Definitionen zeigt, dass für die Erstellung eines Qualitätssicherungskonzeptes also die Anforderungen gegeben

sein müssen, welche von den Parametern erfüllt werden sollen. Aus diesen Anforderungen leiten sich dann die Qualitätsmerkmale ab. Jedem Merkmal ist nun ein oder mehrere Qualitätsparameter zugeordnet. Bei diesen handelt es sich um eine messbare Größe (Schweizer und Schwieger 2011). Zusätzlich wird noch ein Qualitätskriterium benötigt, welches das Optimierungsziel vorgibt beziehungsweise die Anforderungen erfüllt. Beispielsweise wäre das Qualitätsmerkmal die Genauigkeit mit dem zugehörigen, messbaren, Parameter Standardabweichung. Das Qualitätskriterium wäre in diesem Fall das Ziel, die Standardabweichung zu minimieren (Zhang et al. 2020). Die Qualität wäre in diesem Fall gut, wenn die Standardabweichung unterhalb eines gegebenen Grenzwertes liegt. Im Rahmen der Qualitätssicherung wird das Ergebnis dieses Vergleichs nun anhand der Qualitätskriterien bewertet und so eine Entscheidung darüber getroffen, ob die Qualität erfüllt ist, oder ob entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen werden müssen bzw. können um die geforderte Qualität zu erreichen.

Neben den einzelnen Elementen des Qualitätssicherungskonzeptes ist auch der Zeitpunkt der Qualitätssicherung von Bedeutung. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen Prozess- und Produkt bezogenen Qualitätsmerkmalen. Zu den prozessbezogenen Merkmalen gehört hier beispielsweise die Zeiteinhaltung. Zu den produktbezogenen Merkmalen zählen die Korrektheit oder auch die Genauigkeit. Ein Qualitätsmerkmal kann allerdings auch sowohl Produkt als auch Prozess bezogen sein (Schweizer und Schwieger 2011).

Mit der DGNB gibt es in Deutschland ein Zertifizierungssystem, welches eine holistische Qualitätsbewertung nach der Fertigstellung ermöglicht (DGNB 2022). Dies ist auf einen linearen Planungs- und Bauprozess ausgelegt. Um den aber Entscheidungen im Rahmen des integrativen Bauprozesses mittels einer Qualitätsbewertung unterstützen zu können, muss auch diese im ganzen Lebenszyklus eines Gebäudes vorhanden sein. Ein solches Holistisches Qualitätsmodell wurde im Rahmen des Exzellenzclusters entwickelt, welches zum einen die technischen, ökologischen und sozialen Qualitätsteilaspekte der unterschiedlichen Disziplinen, sowie auch deren Abhängigkeiten voneinander berücksichtigt. Zusätzlich ist es ein Ziel des Holistischen Qualitätsmodells (HQM) bereits im Planungsprozess eine Qualitätsbewertung durchführen zu können, umso den linearen Planungs- und Bauprozess durch Feedback-Schleifen aufzubrechen und damit eine effizientere Planung und Realisierung von Bauprojekten zu ermöglichen.

Das HQM integriert nun die sozialen, ökologischen und technischen Anforderungen an einen Bauprozess oder ein Bauteil. Im Projekt wird die technische Qualität vom Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS) übernommen. Die anderen beiden Säulen des Modells werden vom Institut für Sozialwissenschaften (SOWI) und dem Institut für Akustik und Bauphysik (IABP), alle Universität Stuttgart übernommen. Der Aufbau des Holistischen Qualitätsmodells und

**Abb. 1:** Holistisches Qualitätsmodell und Bewertung

Qualitätssicherungskonzeptes ist in Abb. 1 dargestellt. Eine besondere Herausforderung war es die Abstraktionsebenen der drei Aspekte zunächst zu vereinheitlichen und eine gemeinsame Grundlage für die weitere Entwicklung zu schaffen (Zhang et al. 2020).

Einige Beispielhafte Qualitätsmerkmale, -parameter und -kriterien aller drei Qualitätsaspekte werden in Tab. 1 dargestellt. Hierbei zeigt sich auch, dass die messbaren Größen der einzelnen Parameter stark unterschiedlich sind. Es zeigt sich vor allem, dass die sozialen Qualitätsparameter nur schwer numerisch messbar sind, was bei der Integration berücksichtigt werden muss.

Tab. 1: Beispielhafte Qualitätsmerkmale

	Qualitätsmerkmal	Qualitätsparameter	Qualitätskriterium
technisch	Genauigkeit	Standard-abweichung	Soll minimiert werden
	Korrektheit	Toleranz	Toleranz eingehalten
ökologisch	Treibhauspotenzial	kg CO ₂ Äquivalent	Soll minimiert werden
	Gesamtmaterial	Masse	Soll minimiert werden
sozial	Erreichbarkeit	Barrierefreier Zugang	Soll gegeben sein
	Kontrollfähigkeit	Möglichkeit, einen eigenen Arbeitsplatz einzurichten	Soll maximiert werden

Anschließend wurde das das Qualitätssicherungskonzept auf das interdisziplinäre Umfeld und seine Prozesse angewendet. Da im Rahmen des Projektes das Co-Design im Zentrum steht und der lineare Bauprozess in einen zirkulären Prozess überführt werden soll, ist es hier von enormer Bedeutung eine möglichst frühzeitige, auch prädiktive, Aussage bezüglich der Qualität eines Prozesses oder Produktes treffen zu können. Hierfür wurden Kontroll- und Entscheidungspunkte in das Modell integriert. Bei einem Kontrollpunkt handelt es sich

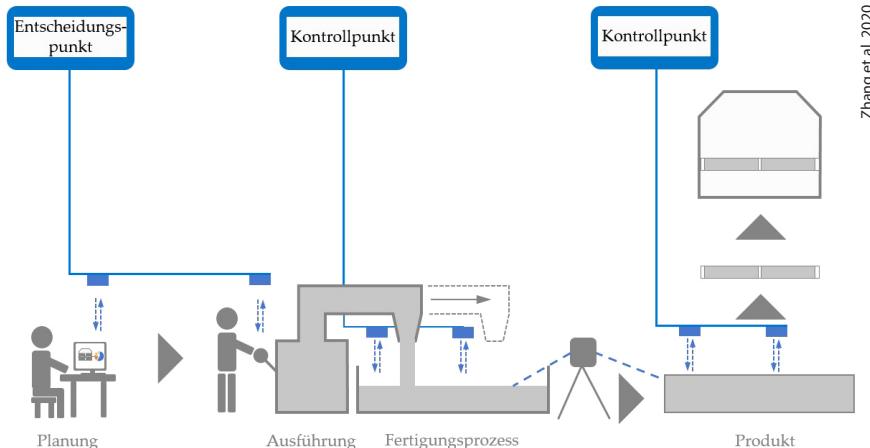


Abb. 2: Darstellung der Kontroll- und Entscheidungspunkte am Beispiel der Herstellung einer Betonplatte

hierbei um einen Zeitpunkt im Bauprozess, bei der ein bestimmter Prozess oder ein Produkt mittels festgelegter Merkmale und messbarer Parameter bewertet werden kann. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei einem Entscheidungspunkt um eine Situation im Bauprozess, an der Entscheidungen getroffen werden, die die Qualität des Endproduktes maßgeblich beeinflussen. An diesen kann nun die voraussichtliche Qualität des Endproduktes prädiziert werden und so die Wahl verschiedener Produktions- und Fertigungsmethoden ermöglicht werden. Eine beispielhafte zeitliche Verteilung von Kontroll- und Entscheidungspunkten ist in Abb. 2 dargestellt. Hier wird zum einen der Entscheidungspunkt in der Planung dargestellt. An diesem werden alle relevanten Entscheidungen bezüglich Design und Produktion getroffen. Des Weiteren gibt es je einen Kontrollpunkt für die Fertigung und das Produkt am Ende. Diese können im Rahmen des Fertigungsprozesses auch mehrmals durchlaufen werden.

Ein weiterer Fokus des HQMs liegt auch auf der Identifikation und Analyse der Wechselbeziehungen zwischen den Aspekten. Während die Abhängigkeit innerhalb der Aspekte bekannt ist, wie beispielsweise, dass die korrekte Erstel-

lung eines Bauteils einen direkten Einfluss auf die Tragfähigkeit hat, wurden die interdisziplinären Abhängigkeiten bislang nicht berücksichtigt.

Beispielsweise beeinflusst eine transparente Mensch-Maschine Interaktion (sozial) die Zuverlässigkeit (technisch) des Prozesses. Ein anderes Beispiel wäre die Adaptierbarkeit eines Gebäudes (sozial), die sich so ergebenden Umnutzungsmöglichkeiten beeinflussen den Lebenszyklus eines Gebäudes und somit die ökologische Qualität. Auch kann die Menge des verwendeten Materials einen positiven Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Bauteils haben (technisch), allerdings ist ein höherer Materialverbrauch weniger gut im Sinne der Nachhaltigkeit. Die Schwierigkeit besteht allerdings darin, diese Wechselbeziehungen modellhaft abzubilden umso auch einen numerischen Zusammenhang modellieren zu können.

Bei der holistischen Qualitätsbewertung gilt es demnach immer die Gesamtanforderungen und Optimierungsziele im Blick zu behalten umso eine ganzheitliche Bewertung zu realisieren.

3 Anwendungsbeispiele der Qualitätssicherung im Rahmen von IntCDC

In diesem Kapitel wird nun die im Rahmen dieses Beitrags untersuchte technischen Qualität auf zwei im Cluster entwickelte Bausysteme angewandt. Als Anwendungsbeispiele dienen hierbei die prototypischen Produktionsprozesse zum einen für Gradientenbeton und zum andern für Faserverbundsysteme. Im Folgenden wird nun die technische Qualität an Kontrollpunkten im Prozess evaluiert. Zusätzlich zu diesen Kontrollpunkten gibt es auch in diesen Prozessen die im vorhergehenden Kapitel eingeführten Entscheidungspunkte. Die technische Qualität wird allerdings zumeist an Kontrollpunkten bewerten, so dass im Weiteren nur diese näher betrachtet werden.

3.1 Gradientenbeton

Mit dem Ziel natürliche Ressourcen einsparen zu wollen, findet auch ein Umdenken im Bausektor statt, da dieser einer der größten Verbraucher bei der Verwendung dieser Ressourcen ist (Amato 2013). Dies gilt insbesondere für den Betonbau. Das Ziel des Gradientenbeton ist es nun die Masse der Bauteile zu verringern und dadurch Material einsparen zu können. Im Rahmen des Exzellenzclusters werden hierzu Forschungen durch das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruktion (ILEK) der Universität Stuttgart durchgeführt (Blandini und Sobek 2020). Hierfür werden in das Bauteil Hohlkörper, im vorliegenden

Beispiel Hohlkugeln, eingegossen (vgl. Abb. 3). Je nach Anwendungsfall variiert dabei die Größe der einzelnen Kugeln, sowie die Anzahl und Verteilung der Kugeln im Bauteil. Auch können innerhalb eines Bauteils verschiedene große Hohlkugeln verwendet werden um eine optimale Ausnutzung zu erreichen. Für die Bauphysikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise die Tragfähigkeit ist hierbei die Kugelposition von enormer Bedeutung (Kovaleva et al. 2019).

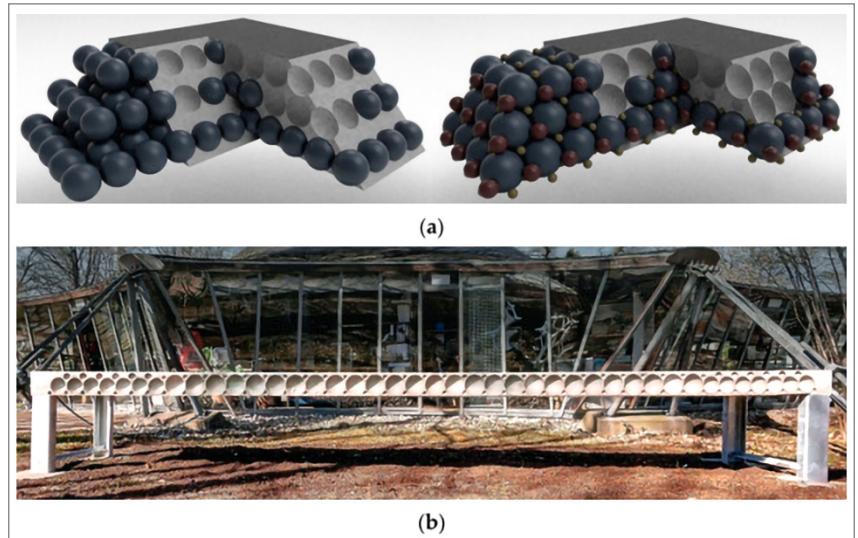


Abb. 3: Die Technologie des Gradientenbetons: a) verschiedene Ansätze zur Verteilung von Hohlkugeln in einem Bauteil, b) ein Beispielbauteil aus Gradientenbeton

Im Rahmen der Kooperation wurde ein Messkonzept entwickelt, welches sowohl die Kugelpositionen während der Fertigung überwacht, als auch die Betonhöhe und Verteilung nach jedem Fertigungsschritt überprüft. Ein großes Problem des Gradientenbeton ist es, dass es während des Füllprozesses zu einem Aufschwimmen der Kugeln kommen kann. Dies passiert vor allem dann, wenn der Beton nicht gleichmäßig in der Form verteilt wird. Für das hier entwickelte Qualitätssicherungskonzept wurden Terrestrische Laserscanner (TLS)-Messungen durchgeführt. Diese wurden zuerst nach dem Einsetzen der Hohlkugeln in die Schalung durchgeführt und später nach jedem Betonierschritt wiederholt. Der Abstand zwischen zwei Betonierschritten beträgt ca. 10 Minuten, so dass eine Auswertung innerhalb dieser Zeit erfolgen sollte. Abb. 4 zeigt den Messaufbau sowie die verschiedenen Produktionsschritte der einzelnen Betonschichten.

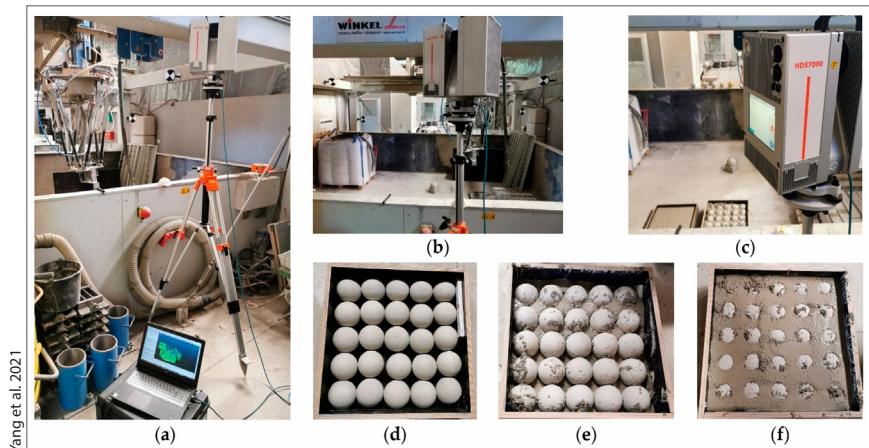


Abb. 4: Messaufbau und Produktionsablauf des Testobjektes: a–c) Messaufbau, d–f) drei Produktionsschritte in der Fertigung

Hierbei zeigt sich auch deutlich, dass die Sichtbarkeit der Kugeln im Laufe der Fertigung immer eingeschränkter und damit eine Schätzung von Mittelpunkt und Radius immer unsicherer wird.

Jeder Betonierschritt entspricht demnach einem Kontrollpunkt des Qualitätssicherungskonzepts. An diesem wird das Merkmal der Korrektheit durch die Parameter-Toleranz des Radius der Kugel oder der Kugelposition überprüft. Das zugehörige Kriterium wäre in diesem Fall die Einhaltung der Toleranz. Des Weiteren wird die Genauigkeit der Kugelerkennung bewertet. In diesem Fall ist der messbare Parameter die Standardabweichung des geschätzten Kugelmittelpunkts und das Kriterium die Minimierung dieser. Zuletzt wird noch die Vollständigkeit der Kugelerkennung bewertet, also die Übereinstimmung der erkannten Kugeln mit der Gesamtzahl der Kugeln. Der letzte Kontrollpunkt ist dann nach der Fertigstellung. Hier ist die Überprüfung der Korrektheit, also die Einhaltung der Toleranzen der Bauteilabmessungen, das zentrale Qualitätsmerkmal.

Der Auswertealgorismus führt nun nach der ersten Messepoche eine erste Schätzung der Kugelpositionen durch. Hierfür findet zunächst eine Vorverarbeitung der Punktwolke statt, in der diese gefiltert wird. Anschließend werden mittels Region Growing die einzelnen Hohlkugeln segmentiert und danach über eine RANSAC basierte Schätzung die Kugelparameter bestimmt. Hierbei wird neben den Koordinaten des Kugelmittelpunktes auch der Radius der Kugeln geschätzt. Zur Bestimmung der Deformation werden die Koordinatenunterschiede der Kugelmittelpunkte in X, Y und Z separat betrachtet um Informationen über die möglichen Kugelbewegungen zu erhalten und um ein mögliches

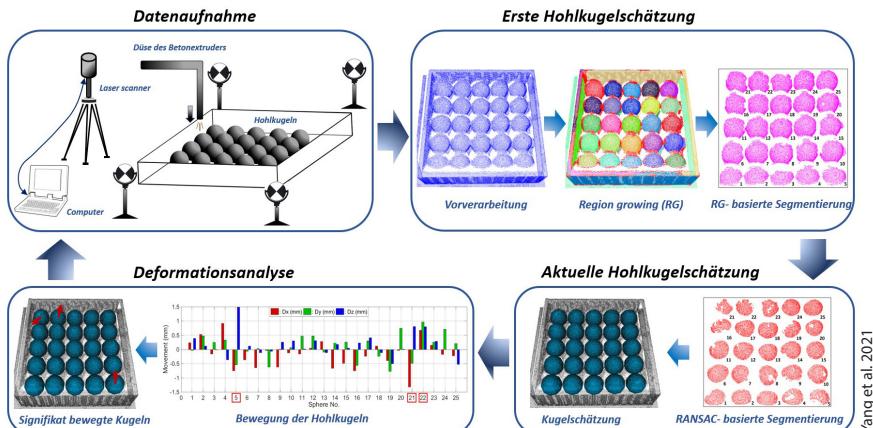


Abb. 5: Mess- und Auswertealgorithmus zur Qualitätssicherung im Fertigungsprozess des Gradientenbetons

Aufschwimmen der Kugeln detektieren zu können (Yang et al. 2021). Der Ablauf der Messungen, sowie des Auswerteprozesses ist in Abb. 5 dargestellt.

Neben der Schätzung der Hohlkugelpositionen wurde auch die Betonoberfläche nach jedem Füllschritt geschätzt. Dies ist wichtig, um eine eventuelle Ungleichverteilung des Betons innerhalb des Bauteils frühzeitig zu erkennen und im nächsten Füllschritt die Füllmenge des Extruders entsprechend anzupassen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen zeigte sich, dass sowohl die Positionen der Hohlkugeln, als auch die Oberfläche des Algorithmus sich gut schätzen lassen. Auch lässt sich die Auswertung innerhalb der vorgegebenen Zeit durchführen. Für die erste Kugelschätzung werden circa 10 s benötigt, für jede weitere in etwa 2,5 s. Die Schätzung der Oberfläche fällt mit einigen Millisekunden nicht ins Gewicht. In einem nächsten Schritt sollen diese Informationen in die Simulation der Planung mit eingehen, um direkt im Produktionsprozess beispielsweise die Änderung einer Kugelposition zu bewerten und zu entscheiden, ob die Produktion fortgeführt werden kann, angepasst werden muss oder das Bau teil komplett neu gefertigt werden muss. Je früher diese Entscheidung getroffen werden kann, desto effizienter und Ressourcen schonender ist die Fertigung und somit auch das fertige Bauteil, da der Produktionsprozess und das Produkt nicht trennbar sind.

3.2 Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen

Die Verwendung von Faserverbundsystemen ist in der Luftfahrt oder auch in der Automobilindustrie schon lange geläufig. Einige Gründe hierfür sind die positiven Materialeigenschaften, wie eine geringe Wärmeausdehnung, die Korrosionsbeständigkeit oder auch das Verhältnis von Festigkeit zum Gewicht der Kohlenstoff-Faserverbundwerkstoffen (Fitzer 1985). An der Universität Stuttgart wurde in den letzten Jahren die Fertigungstechnik des kernlosen Faserwickelprozesses weiterentwickelt und in einigen Demonstratorprojekten die Möglichkeiten dieser Werkstoffe im Bau aufgezeigt (Menges und Knippers 2015).

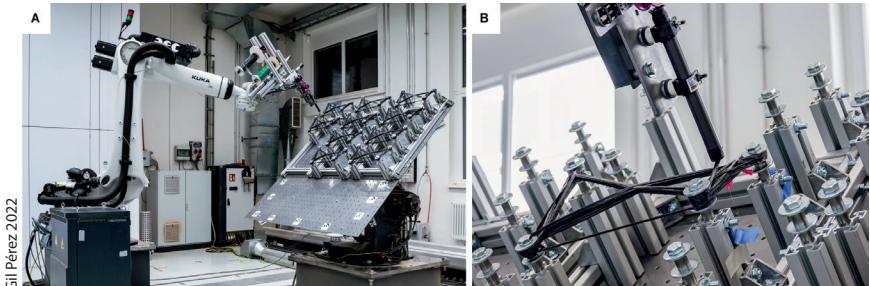


Abb. 6: a) Produktionsaufbau mit KUKA-Roboter, b) Herstellung eines einzelnen Elementes

In den im folgenden verwendeten Versuchen wurden mit Epoxidharz vorimprägnierte Kohlerfaserbündel verwendet. Das Verhältnis von Fasern zu Harz betrug hierbei 50:50. Nach der Herstellung wurden die imprägnierten Kohlefaserbündel auf Spulen gewickelt und gefroren bis zur Verwendung aufbewahrt. Am Tag der Fertigung wurden diese 40 Minuten vor Produktionsbeginn zum Auftauen aus dem Tiefkühler genommen. Die Fertigung selbst wurde mittels eines KUKA-Roboter mit einem sechsachsigen robotischen Arm durchgeführt. Die Elemente selbst waren auf einem Fabrikationstisch montiert, welcher sich in zwei Achsen bewegen ließ (vgl. Abb. 6).

Die Erstellung eines Qualitätssicherungskonzepts für Faserverbundsysteme bringt einige Herausforderungen mit sich. Die größte hierbei ist zur Zeit, die Verfügbarkeit der Soll-Geometrie. Während bei den klassischen Evaluierungsprozessen der Vergleich mit der Soll-Geometrie die Standardmethode zur Bewertung der Qualität ist, ist diese für die Evaluierung der Faserverbundsysteme bisher nicht möglich. Die gegebene Geometrie ist hierbei ein Linienmodell, welches die Stärke der einzelnen Fasern nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden die Ankerpunkte der Wicklung als punktförmige Objekte angenommen, was zu größeren Abweichungen in der realen Geometrie führt. Zur Bestimmung der realen Geometrie wurden TLS-Messungen mittels des Trimble X7 durchgeführt.

Eine besondere Herausforderung bei den Messungen waren hier zum einen die Verdeckungen durch den Roboter, die sich stellenweise nicht vermeiden ließen, sowie die allgemein eingeschränkten Möglichkeiten bei der Erstellung einer geeigneten Messkonfiguration. Zusätzlich musste, aufgrund des tropfenden Harzes, noch auf die Sicherheit der Messausrüstung geachtet werden.

Für die Auswertung der Messdaten sowohl bei den Messungen während der Produktion, als auch bei denen des finalen Produktes, ist die Liniensegmentierung und Netzgenerierung von großer Bedeutung um eine Vergleichbarkeit der

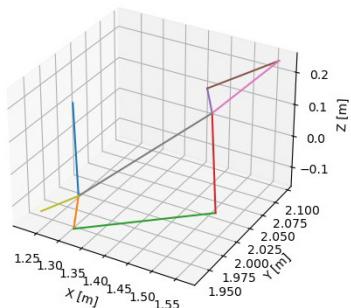


Abb. 7:

Generierte Netztopologie für einen Beispieldatensatz mit einer Länge der Liniensegmente von 5 bis 40 cm und einem Fadendurchmesser von circa 5 mm

Daten zu ermöglichen. Die Segmentierung kann sowohl manuell, als auch automatisiert mit Methoden wie beispielsweise der Hough-Transformation erfolgen (Dalitz et al. 2017). Bei beiden Auswerteverfahren müssen nach der Segmentierung die Linienparameter geschätzt werden. Aus den so erhaltenen Linien können dann Schnittpunkte berechnet werden und die Netztopologie des realen Objektes hergestellt werden. Ein Beispiel für eine so erstellte Netztopologie findet sich in Abb. 7. Bei dieser Darstellung wird jedes Liniensegment in einer eigenen Farbe dargestellt.

Im Folgenden werden zwei verschiedene Qualitätssicherungskonzepte betrachtet, welche sich zum einen auf die Änderung der Geometrie im Produktionsprozess und zum anderen auf die Bestimmung der finalen Geometrie des Bauteils konzentrieren

3.2.1 Prozessqualität

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Institut für Computerbasiertes Entwerfen (ICD) der Universität Stuttgart wurde anhand verschiedener Elemente untersucht, wie die Interaktion einzelner Fasern im Produktionsprozess die Gesamtgeometrie beeinflusst. Ein besonderes Augenmerk galt hierbei den Schnittpunkten der Fasern, sowie deren Veränderung während des Fertigungsprozesses. Im Gesamten wurden hier 30 Elemente in jeweils zwei bis sieben Epochen

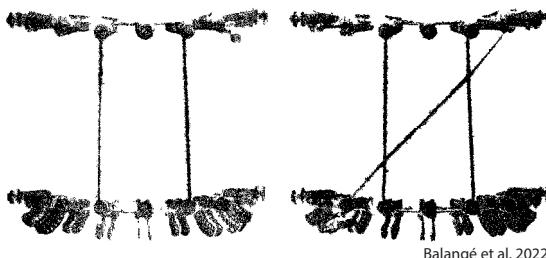


Abb. 8:
Beispielhafter Wickelprozess für Faserverbundbauteile, Darstellung der ersten beiden Epochen

erfasst. Die TLS-Messungen wurden nach jeder Epoche durchgeführt, wobei eine Epoche hierbei definiert wird als der Zustand des Elements sobald ein neuer Faden angebracht wird, durch den einer oder mehrere Schnittpunkte entstehen. Beispiellohaft sind die ersten beiden Epochen der Fertigung in Abb. 8 dargestellt.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erläutert, sind die Liniensegmentierung, Netzgenerierung und Berechnung der Schnittpunkte die ersten Schritte der Auswertung nach den Standardschritten, wie Registrierung und Filterung.

Sind alle Schnittpunkte einer Epoche bestimmt, müssen diese zwischen den Epochen zugeordnet werden und anschließend die Verschiebungen der Schnittpunkte berechnet werden. Da es in jeder Epoche neue Schnittpunkte gibt, handelt es sich um ein ungeordnetes Zuordnungsproblem. Für die Zuordnung wird zunächst eine Kostenmatrix erstellt und anschließend die optimale Zuordnung bestimmt (Kuhn 1955). Einen Sonderfall stellen bei der Berechnung der Verschiebungen die neu entstandenen Schnittpunkte dar. Da auch diese die Gesamtgeometrie maßgeblich beeinflussen, wird für diese Schnittpunkte die Linie in der vorherigen Epoche gesucht, auf welcher der neue Schnittpunkt liegt. Auf dieser Linie wird dann der entsprechende Lotfußpunkt berechnet. Für die beiden Beispieleepochen in Abb. 8 ergibt sich hierfür eine Deformation von 1,2 cm bzw. 1,0 cm. Diese Abweichungen sind in Abb. 9 dargestellt.

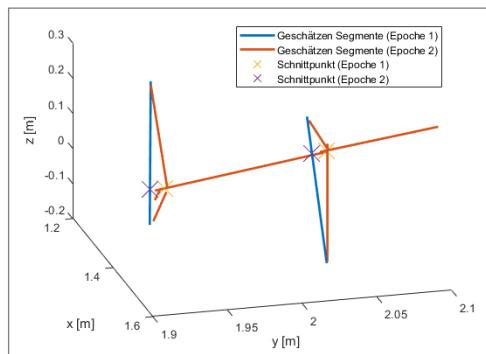


Abb. 9:
Segmentierte Linien und berechnete Schnittpunkte bzw. Lotfußpunkte
(In Anlehnung an Balangé et al. 2022)

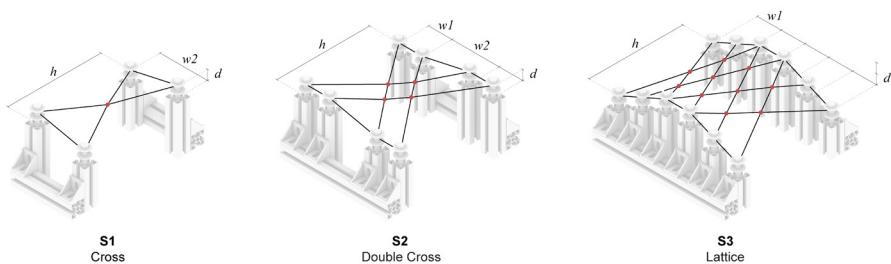
Im Rahmen des Qualitätsmodells sind auch wieder die Merkmale Korrektheit, mit dem Parameter der Linienparameter, die Genauigkeit mit den Standardabweichungen der Linienschätzung und Schnittpunktberechnung, sowie die Vollständigkeit der gemessenen Punktwolke von Bedeutung. Die Definition der Kriterien ist in diesem Anwendungsfällen bislang noch schwierig, da der Produktionsprozess selbst noch in der Entwicklung ist und Zielgrößen noch nicht definiert werden können.

Bei der Auswertung zeigt sich, dass die finale Fasergeometrie deutlich von einer konstanten Spannung des Fadens während des Fertigungsprozesses abhängig ist. Des Weiteren ist die Gesamtdauer des Produktionsprozesses ausschlaggebend, da mit einer längeren Dauer der Trocknungsprozess des Fadens beginnt, und dieser sich beginnen aufzuspalten. Ein trockenerer Faden haftet außerdem weniger stark an der bereits bestehenden Faserkonstruktion, so dass es im weiteren Verlauf zu mehr Verschiebungen kommt. Eine große Herausforderung sind die sehr dünnen Elemente, die zudem noch messtechnisch stark verrauscht sind. Zusätzlich dazu kommt es aufgrund der räumlichen Gegebenheiten in der Fabrikationshalle immer wieder zu Verdeckungen des Objektes, beispielweise durch den Roboter. Dies alles führt dazu, dass die Daten stellenweise Lücken aufweisen, und die Geometrie mit den vorhandenen Daten geschätzt werden muss und somit an diesen Stellen eine größere Unsicherheit aufweist.

3.2.2 Produktqualität

Neben der Qualitätssicherung im Prozess, ist auch die Überprüfung der finalen Geometrie von großer Bedeutung. Hierbei spielen neben den Positionen der einzelnen Fasern auch deren Form eine wichtige Rolle. Für die Berechnung der Tragfähigkeit der Bauteile ist der Faserquerschnitt, bzw. die sich daraus berechnbaren Flächenträgheitsmomente, entlang eines Segmentes von großer Bedeutung. Aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung des Harzes entlang des Fadens kommt es hier zu größeren Änderungen. Da aktuell noch keine Standards für den Bau von Faserverbundbauteilen etabliert sind, handelt es sich bei prototypischen Gebäuden immer um eine Zulassung im Einzelfall (Gil Pérez 2020). Hierbei müssen erheblich höhere Sicherheitsfaktoren eingehalten werden, als eigentlich nötig wären. Das Ziel besteht nun darin genauere Informationen über die reale Geometrie des Bauteils zu erhalten, umso eine realistischere Simulation durchführen zu können und Material und damit Ressourcen einsparen zu können. Die hier verwendeten Beispielkomponenten unterscheiden sich von denen im Prozess vor allem dadurch, dass der Faden nun getrocknet ist. Zusätzlich besteht ein Segment einer Komponente hier aus sechs Wicklungen, was zu einem größeren Faserquerschnitt führt als bei den Elementen die im Prozess gemessen wurden.

Um die verschiedenen Einflüsse auf das Gesamtbauteil zu untersuchen, wurde ein interdisziplinärer Versuch durchgeführt (Gil Pérez et al. 2022). Hierbei wurden alle relevanten und verfügbaren Daten aus der Produktion, wie beispielsweise die genauen Roboterpositionen, die Spannung des Fadens oder auch die Temperatur während der Fertigung dokumentiert. Insgesamt wurden hier drei verschiedene Elemente gefertigt, welche im Verlauf des Versuchs größer und komplexer werden (vgl. Abb. 10). Hierbei unterscheiden sich nicht nur die Anzahl der Schnittpunkte und damit die möglichen Stellen der Faserinteraktion, sondern auch die räumliche Ausdehnung der Objekte.



Gil Pérez et al. 2022

Abb. 10: Gefertigte Elemente mit den Abmessungen $h = 315$ mm, $w_1 = 80$ mm, $w_2 = 160$ mm, $d = 32,5$ mm

Zur Überprüfung der Wiederholbarkeit und auch um einen eventuellen Einfluss der Roboterposition auf die Fertigungsgenauigkeit feststellen zu können, wurde jedes dieser Elemente zehnmal gefertigt. Die Aufgabe des IIGS war es, ein gemeinsames Koordinatensystem zu definieren und die benötigten Transformationen bereitzustellen. Hierfür wurden die Fertigungsrahmen der Elemente vor Beginn der Produktion eingemessen und ein Rahmenkoordinatensystem definiert. Dieses wurde dann zusätzlich zur Fertigungsplattform eingemessen. Außerdem sollte die Gesamtgeometrie der Elemente bestimmt werden. Hierfür wurden die einzelnen Elemente nach der Fertigung mittels TLS aufgenommen. Anschließend wurde sowohl die Geometrie der zehn Elemente des gleichen Typs miteinander verglichen, als auch die Form der einzelnen Elemente ermittelt. Der Fokus lag auf der Berechnung der Faserquerschnittsflächen. Die einzelnen Segmente wurden in 1 cm lange Abschnitte unterteilt. Anschließend wurde eine Ebene durch dieses Segment gelegt, welche den Richtungsvektor der zugehörigen Linie als Normalenvektor der Ebene verwendet. Nun wurde ein Zylinder um das Segment gelegt und alle Punkte bestimmt, welche innerhalb des Zylinders liegen und somit zur Berechnung der Querschnittsfläche verwendet werden sollen. Die so gefundenen Punkte werden nun auf die Ebene projiziert. Für die Berechnung wird nun einen Konvexe Hülle um die projizierten Punkte

gelegt. Diese entspricht der kleinsten konvexen Menge, die die Ausgangsmenge enthält (vgl. Abb. 11). Aus den Punkten, die die konvexe Hülle definieren, kann nun die Fläche dieser berechnet werden. Hierfür wird der QuickHull-Algorithmus verwendet (Green und Silvermann 1979). Mit der Information über die Querschnittsflächen können nun auch die Flächenträgheitsmomente der einzelnen Segmente berechnet werden. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung wurde auch der B-Spline-Ansatz zur Flächenschätzung untersucht (Balangé et al. 2022). Hierbei zeigte sich, dass beide Ansätze ein vergleichbares Muster der Flächenverteilung entlang eines Segmentes aufweisen und es von der jeweiligen verfügbaren Datengrundlage abhängig ist, welcher Algorithmus das bessere Ergebnis liefert.

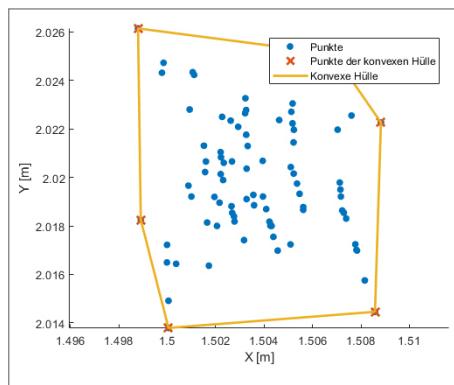


Abb. 11:
Beispielhaftes Ergebnis einer Querschnittsflächenberechnung

Bei der Analyse der Ergebnisse zeigt sich, dass die berechneten Flächen tendenziell zu klein geschätzt werden. Dies lässt darauf schließen, dass der Laserstrahl in das Material eindringt. Aus diesem Grund sind weiter Forschungen hinsichtlich des Materialeinflusses auf die Messungen geplant.

Im Sinne des Qualitätsmodells werden auch hier wieder die Merkmale der Korrektheit mit den Liniensparametern der Segmente, sowie zusätzlich den Faserquerschnitten betrachtet. Wie auch in der Produktion werden des Weiteren die Merkmale der Genauigkeit mit den Standardabweichungen von Linienschätzung, Schnittpunktberechnung und Berechnung der Querschnitte betrachtet. Auch ist wieder die Vollständigkeit der gemessenen Punktwolke von Bedeutung. Wie auch im Prozess ist die Definition der Kriterien hier bislang nicht direkt möglich.

4 Fazit

Im Rahmen der Arbeit im Exzellenzcluster zeigt sich, dass die Qualitäts sicherung im interdisziplinären Umfeld von enormer Bedeutung ist, um eine reibungslose Kooperation zwischen allen Disziplinen zu gewährleisten. Im besonderen Fokus steht dabei der Co-Design Produktionsprozess der mit seinen Feedback Loops die Möglichkeit eröffnet, bereits in einem frühen Planungsschritt die Auswirkungen auf die Gesamtqualität von Produkt und Prozess liefern zu können. Um dies in einem Qualitätssicherungskonzept realisieren zu können sind die Anforderungen aller beteiligten Parteien für die Erstellung des Qualitätsmodells die Grundlage für die Bewertung.

Auch erfordert die Entwicklung von neuen Bauprozessen die Überprüfung der erreichten Qualität an festgelegten Kontrollpunkten im Prozess und eine abschließende Qualitätskontrolle des fertigen Produktes. Neben den technischen Herausforderungen im Bau ergeben sich auch neue messtechnische Herausforderungen welche gelöst werden müssen. Auch ist die Definition der Qualitätskriterien für viele Anwendungen noch eine offene Fragestellung, die im Rahmen der weiteren Kooperationen innerhalb des Clusters untersucht werden soll.

Danksagung

Die Forschungen im Rahmen dieses Artikels werden gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2120/1 – 390831618. Die Autoren sprechen der fördernden Organisation ihren Dank aus.

Literatur

- Amato, I. (2013): Concrete solutions: Cement manufacturing is a major source of greenhouse gases. But cutting emissions means mastering one of the most complex materials known. *Nature*. Heft 494, 300–302.
- Balangé, L., Harmening, C., Duque Estrada, R., Menges, A., Schwieger, V. (2022): Monitoring the production process of lightweight fibrous structures using terrestrial laser scanning. *JISDM Valencia*, Spanien. (Abstract angenommen).
- Blandini, L., Sobek, W. (2020): Das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK: Über 100 Jahre Forschung im Stahlbetonbau. *Beton Stahlbetonbau*, Heft 115, 626–631.
- Dalitz, C., Schramke, T., Jeltsch, M. (2017): Iterative Hough Transform for Line Detection in 3D Point Clouds. *Image Processing On Line* 7. 184–196. DOI: [10.5201/ipol.2017.208](https://doi.org/10.5201/ipol.2017.208).
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2022): DGNB System (Online). www.dgnb-system.de/de, letzter Zugriff 03/2022.

- DIN EN ISO 9000 (2005): Quality management systems – Fundamentals and vocabulary, Trilingual version. Normenausschuss Qualitätsmanagement, Statistik und Zertifizierungsgrundlagen (NQSZ) im DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Fitzer, E. (1985): Technical Status and Future Prospects of Carbon Fibres and their Application in Composites with Polymer Matrix (CFRPs). *Carbon Fibres and Their Composites*, 3–45. DOI: [10.1007/978-3-642-70725-4_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-70725-4_1).
- Gil Pérez, M., Rongen, B., Koslowski, V., Knippers, J. (2020): Structural Design, Optimization and Detailing of the BUGA Fibre Pavilion. *Int. J. Space Struct.* Heft 35, 147–159.
- Gil Pérez, M., Zechmeister, C., Kannenberg, F., Mindermann, P., Balangé, L., Guo, Y., Hügle, S., Gienger, A., Forster, A., Bischoff, M., Tarín, C., Middendorf, P., Schwieger, V., Gresser, G. T., Menges, A., Knippers, J. (2022): Computational co-design framework for coreless wound fibre-polymer composite structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, Band 9, Heft 2, April 2022, 310–329. DOI: [10.1093/jcde/qwab081](https://doi.org/10.1093/jcde/qwab081).
- Green, P. J., Silvermann, B. W. (1979): Constructing the convex hull of a set of points in the plane. *The Computer Journal*, Band 22, Heft 3, 262–266.
- Kovaleva, D., Gericke, O., Kappes, J., Tomovic, I., Sobek, W. (2019): Rosenstein Pavilion: Design and structural analysis of a functionally graded concrete shell. *Structures*. Heft 18, 91–101. DOI: [10.1016/j.istruc.2018.11.007](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.007).
- Kuhn, H. W. (1955): The Hungarian Method for the assignment problem. *Naval Research Logistics Quarterly*, Band 2, Heft 1, 83–97. DOI: [10.1002/nav.3800020109](https://doi.org/10.1002/nav.3800020109).
- Menges, A. (2019): Cluster of Excellence Integrative Computational Design and Construction for Architecture (Online). www.intcdc.uni-stuttgart.de/cluster/#id-91c8f6f8, letzter Zugriff 03/2022.
- Menges, A., Knippers, J. (2015): Fibrous Tectonics. *Architectural Design*, Band 85, Heft 5, Wiley, London, 40–47. ISBN 978-11118878378. DOI: [10.1002/ad.1952](https://doi.org/10.1002/ad.1952).
- Schweitzer, J., Schwieger, V. (2011): Modeling of Quality for Engineering Geodesy Process in Building Construction Processes. *Journal of Applied Geodesy*, Walter de Gruyter, Band 5, Heft 1.
- Yang, Y., Balangé, L., Gericke, O., Schmeer, D., Zhang, L., Sobek, W., Schwieger, V. (2021): Monitoring of the Production Process of Graded Concrete Component Using Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*, Band 13, Heft 9. DOI: [10.3390/rs13091622](https://doi.org/10.3390/rs13091622).
- Zhang, L., Balangé, L., Braun K., Di Bari, R., Horn, R., Hos, D., Kropp, C., Leistner, P., Schwieger, V. (2020): Quality as Driver for Sustainable Construction – Holistic Quality Model and Assessment. *Sustainability*, Band 12, Heft 19. DOI: [10.3390/su12197847](https://doi.org/10.3390/su12197847).

Kontakt

Laura Balangé | Li Zhang | Volker Schwieger
Institut für Ingenieurgeodäsie der Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
laura.balange@iigs.uni-stuttgart.de
li.zhang@iigs.uni-stuttgart.de
volker.schwieger@iigs.uni-stuttgart.de

Koordinatenmesstechnik im Maschinenbau – Aspekte der Kalibrierung und Unsicherheit

Christoph Herrmann

1 Einleitung

Im Maschinenbau hat sich die Koordinatenmesstechnik zu einem integralen Bestandteil im Produktionsprozess etabliert. Es kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Messgeräte und Messsysteme zum Einsatz. Sie finden produktionsbegleitend oder auch die Produktion abschließend Verwendung und haben qualitätssichernde Funktionen. Dabei kann u.a. die Qualität des tatsächlichen Produkts im Fokus stehen, aber z.B. auch die Stabilität und Fähigkeit eines Produktions- oder Messprozesses. Die Bandbreite der eingesetzten Messmittel erstreckt sich vom einfachen Messschieber bis hin zu vollständig in die automatisierte Produktion integrierten (Koordinaten-)Messgeräten. Neben den aufgabenspezifischen Anforderungen an das jeweilige Messsystem, stellt dessen Rückführbarkeit ein zentrales Kriterium für die Applikation dar. Die Forderung nach einer anerkannten Kalibrierung und damit Rückführung, entsteht sowohl durch den Einsatz von zunehmend genaueren Mess- und Prüfmitteln als auch durch die erhöhte Verpflichtung, konform zu verschiedenen Normen (z.B. ISO 9001, IATF 16949, ISO 17025) zu agieren. Im Bereich der Koordinatenmesstechnik stellt die Normenreihe ISO 10360 Blatt 1 bis Blatt 12 mittlerweile ein etabliertes Standardwerk für Methoden zur Kalibrierung verschiedener Messsysteme und Sensoren dar. Im Umfeld dieser Normenreihe sollen sich Messgerätehersteller und Anwender auch mit dem Thema der Messunsicherheit auseinandersetzen, da die Messunsicherheit für die Bewertung von Annahme- und Bestätigungsprüfungen bzw. für die Aussage zur Konformität ein wichtiges Kriterium ist. Die Messunsicherheit findet so auch über internationale Standards den Weg in die industrielle messtechnische Praxis.

Im Vorliegenden Beitrag wird die Kalibrierung von stationären Koordinatenmessgeräten (KMG) auf Basis der Normenreihe ISO 10360 näher betrachtet. Es gibt Einblicke in die Kalibriermethodik sowie die Berechnung der Unsicherheit und die Bewertung der Kalibrierergebnisse.

2 Kalibrierung von stationären KMG

2.1 Stationäre KMG

Stationäre KMG bestehen im Prinzip aus drei verfahrbaren Achsen, entsprechenden Wegaufnehmern und einem Tastsystem zur Erfassung von geometrischen Merkmalen an einem Werkstück. Es gibt taktile wie auch optische Tastsysteme (optische Abstandssensoren und bildgebende Sensoren) deren Messergebnis i. d. R. Punkte in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem sind. Diese Punkte werden in der Folge für die Auswertung von Geometrieelementen (z. B. Ebenen, Kreise, Zylinder, Kugeln etc.) herangezogen, um die tatsächliche Ist-Geometrie des Werkstücks mit der z. B. aus einem CAD-Modell geforderten Soll-Geometrie zu vergleichen. Abhängig von der Messaufgabe bzw. der Toleranzen der Merkmale am Werkstück, gibt es eine große Auswahl von KMG unterschiedlicher Hersteller und Spezifikationen. Die „Genauigkeit“ wird in den Datenblättern der KMG i. d. R. auf Basis der Normenreihe ISO 10360 mit einem Maximum Permissible Error (MPE) angegeben. Die Größenordnung für ein MPE für eine Längenmessabweichung E_0 (das ist die Differenz zwischen einer gemessenen Länge und einer kalibrierten Länge einer Maßverkörperung) entsprechend ISO 10360-2 kann im Bereich von 1,3 µm auf 1000 mm Messlänge mit einem taktilen Tastsystem liegen (vgl. Hexagon 2021).

2.2 Kalibrierung von KMG

Für die Kenntnis über die Güte eines Messergebnisses bzw. des Vertrauens in ein Messgerät ist die Kalibrierung des Messgerätes ein nützliches Werkzeug. Darüber hinaus werden Kalibrierungen eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit eines Messgerätes bzw. die Konformität zu den im Datenblatt angegebenen Spezifikationen nachzuweisen. Zu diesem Zweck wurden von den Anwendern der KMG i. d. R. Werkskalibrierungen von den Messgeräteherstellern oder auch Drittanbietern beauftragt. Im Zuge allgemein steigender Anforderungen an die Qualität und Transparenz von Prozessen wurde mit der IATF 16949 im Jahr 2016 im Bereich der Automobilindustrie eine Norm veröffentlicht, die die Anforderungen insbesondere für Automobilzulieferer verschärft hat. Im Abschnitt 7.1.5.3.2 der IATF 16949:2016 heißt es sinngemäß, dass ein von einem Automobilzulieferer zur Kalibrierung von Messmitteln beauftragtes Kalibrierlabor nach ISO 17025 akkreditiert sein muss. Damit soll mit der Akkreditierung durch eine unabhängige Stelle (in Deutschland die DAkkS) gewährleistet werden, dass die Kalibrierungen einheitlichen Qualitätsstandards genügen und die eingesetzten Kalibriermethoden dem Stand der Technik bzw. anerkannten und standardisierten Verfahren entsprechen.

Die Rückführung und damit der Anschluss an das System der SI-Einheiten wird mit einer fortgeführten Kette von Kalibrierungen hergestellt. Als oberste (lokale) Instanz gelten dabei die nationalen Metrologie-Institute, wie die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) in Deutschland, das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) in der Schweiz oder das National Physical Laboratory (NPL) in Großbritannien. In der für die Praxis üblichen Kette der Kalibrierungen stellen sie die hochwertigste Kalibrierung und damit die kleinste Unsicherheit bereit. Über nach ISO 17025 akkreditierte Kalibrierlabore wird die Kette fortgesetzt und kann z.B. bei einem Gebrauchsnormal in der Produktion enden – von „Kettenglied“ zu Kettenglied nimmt dabei die Unsicherheit zu. Dabei stellt bei der Kalibrierung von KMG die Unsicherheit des Kalibrierverfahrens bzw. die Kalibrierunsicherheit der eingesetzten Normale einen wichtigen Faktor dar, der die Bewertung der Konformität beeinflusst. Unabhängig von der Spezifikation des Messgeräts, ist die Größenordnung der Unsicherheit des Kalibrierverfahrens im Verhältnis zur Spezifikation zu beachten, da diese abhängig von der Entscheidungsregel zur Bewertung der Konformität erhebliche Auswirkungen haben kann (siehe 3.2).

2.2.1 Methodik

Als Standardwerk für die Kalibrierung von KMG ist die Normenreihe ISO 10360 Blatt 1 bis Blatt 12 anzusehen. Blatt 1 definiert zentrale Begriffe und beschreibt unter anderem unterschiedliche Bauarten von KMG und definiert Begrifflichkeiten bezüglich unterschiedlicher Sensorsysteme, Prüfkörper und Messmethoden. Alle weiteren Blätter der Reihe beschreiben konkrete Messmethoden für die Kalibrierung der einzelnen Kenngrößen der Typen von Koordinatenmessgeräten (stationäre Koordinatenmessgeräte mit taktilen, optischen und bildgebenden Sensoren sowie portable KMG wie Gelenkarm-KMG oder Laser Tracker). Bezuglich der stationären KMG kann man dabei von folgender Systematik der Blätter der ISO 10360 sprechen.

Die ISO 10360-2 beschreibt Methoden zur Überprüfung der Geometrie des KMG. Mit den in der Norm beschriebenen Messungen und Auswertungen kann abgeleitet werden, inwieweit die drei Achsen des KMG jeweils rechtwinklig aufeinander stehen, ob die einzelnen Achsen gerade sind und der Maßstab korrekt eingestellt wurde. Hier werden Messungen im ganzen Messvolumen des KMG ausgeführt, sodass Abweichungen in der Geometrie aufgedeckt werden können.

Die Blätter -3, -5, -7, -8 und -9 beschreiben in der Folge Messmethoden, um die Eigenschaften der an KMG befindlichen Sensoren zu überprüfen. Dies geschieht weitestgehend in einem sehr kleinen Bereich des Messvolumens, um Effekte von Abweichungen in der Geometrie zu minimieren. In der Reihe der

eben genannten Blätter hat die ISO 10360-5 eine Sonderstellung, weil hier eine prinzipielle Herangehensweise zur Überprüfung bzw. Kalibrierung des Tastsystems beschrieben wird, die in weiteren Blättern der Norm (-8, -9, -10 und -12) auch für portable Messsysteme Anwendung findet. Folgend werden die ISO 10360-2 und -5 für einen Einblick in die prinzipielle Herangehensweise kurz beschrieben.

2.2.2 ISO 10360-2 Längenmessabweichung E_0

Die Längenmessabweichung E_0 stellt die Differenz von einer an einem Prüfkörper gemessenen Prüflänge und dem kalibrierten Wert der Prüflänge dar. Der Prüfkörper wird nacheinander in sieben unterschiedlichen Posen (Lage und Orientierung) im Messvolumen platziert (siehe Abb. 1). Diese umfassen vier Raumdiagonalen – jeweils von zwei gegenüberliegenden Ecken des Messvolumens – sowie drei Posen jeweils parallel zu den Achsen des KMG. Der

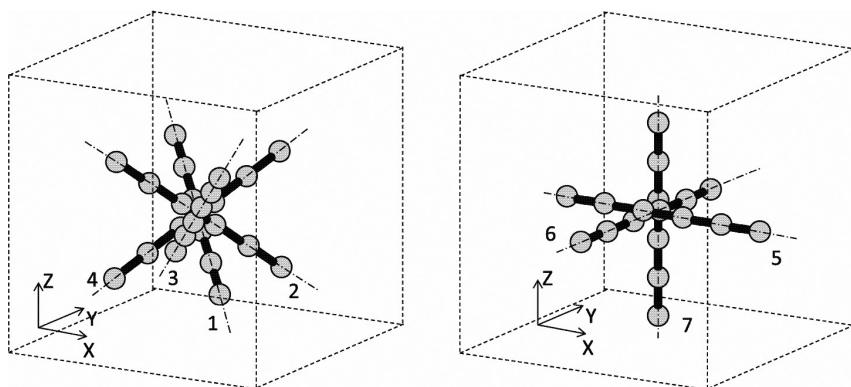


Abb. 1: Schema der Prüfkörperposen im Messvolumen (ISO 10360-8:2014)

Prüfkörper muss über mindestens fünf Prüflängen verfügen. In jeder Pose des Prüfkörpers werden die fünf Prüflängen jeweils drei Mal gemessen, sodass insgesamt 105 Messungen erfolgen. Die drei Wiederholungsmessungen pro Prüflänge sollen direkt nacheinander ausgeführt werden. Repräsentieren A und B jeweils den Anfangs- respektive Endpunkt einer Prüflänge, so sind die Messreihenfolgen AB, AB, AB oder AB, BA, AB zulässig. Die Norm fordert außerdem, dass mindestens 66 % des Messvolumens abgedeckt werden. Daraus folgt, dass in jeder Pose die längste der fünf Prüflängen mindestens 66 % der maximalen Länge in dieser Richtung des Messvolumens betragen muss. Die fünf Prüflängen pro Pose sollen dabei gleichmäßig über das Messvolumen verteilt sein.

Bei KMG mit taktilen Messkopfsystemen sollen die Prüflängen bidirektional erfasst werden. D.h. die gegenüberliegenden Enden der jeweiligen Prüflänge werden aus entgegengesetzten Richtungen angetastet. Einerseits wirken sich so Eigenschaften der Dynamik des KMG sowie etwaige Systematiken des Messkopfsystems (Abhängigkeiten der Antastrichtung, Umkehrspiel o.ä.) aus. Andererseits ist diese Art der Antastung vergleichbar mit dem tatsächlichen Einsatz im Messbetrieb. Bei der Erfassung geometrischer Merkmale von Bauteilen wird das Werkstück aus beliebigen Richtungen angetastet. Abb. 2 zeigt die schematische Darstellung von bidirektionalem Messen an unterschiedlichen Prüfkörpern, wie in ISO 10360-2:2010 angegeben. PD steht dabei für die Antastrichtung (Probing Direction).

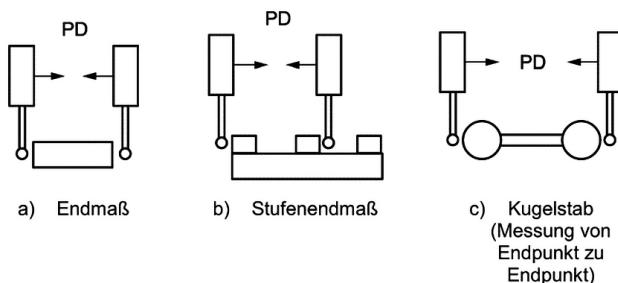
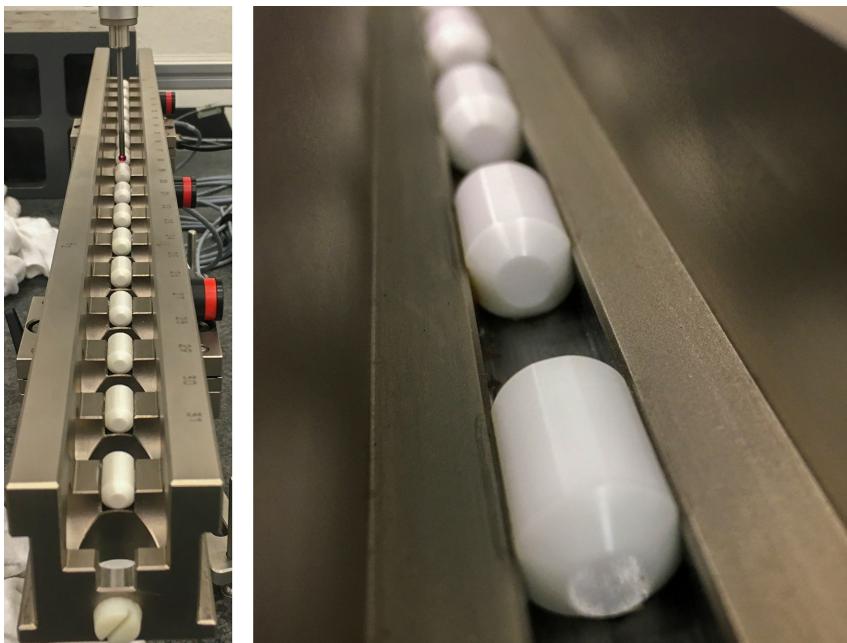


Abb. 2: Bidirektionale Antastung an unterschiedlichen Prüfkörpern (ISO 10360-2:2010)

Abhängig von der Spezifikation des KMG gibt es unterschiedliche Prüfkörper, die für die Ermittlung von E_0 eingesetzt werden können. Die für KMG der in Abschnitt 2.1 genannten Größenordnung der Spezifikation am häufigsten eingesetzten Prüfmittel sind Parallel- und Stufenendmaße. Die Prüflänge wird bei beiden Prüfmitteltypen über den Abstand von parallel zueinander angeordneten Ebenen verkörpert. Bei Parallelendmaßen gibt es pro Endmaß nur eine Länge. Für die Realisierung der fünf Prüflängen werden entsprechend viele Endmaße in einer Vorrichtung eingespannt. Die Vorrichtung wird dann als Ganzes im Messvolumen mehrmals positioniert, um die sieben geforderten Posen zu realisieren. Bei Stufenendmaßen sind mehrere (üblicherweise) Keramikzylinder in einem Träger aus Stahl auf einer Geraden orientiert (siehe Abb. 3). Weitere Prüfmittel wie Kugelstäbe, Kugelplatten oder Laser sind ebenso zulässig (vgl. Abb. 2).

Die Auswertung betrachtet alle 105 so ermittelten Längenmessabweichungen E_0 und stellt diese der Spezifikation $E_{0,MPE}$ des KMG gegenüber. Laut ISO 10360-2:2010 ist die Leistungsfähigkeit des KMG nachgewiesen, wenn alle 105 Messergebnisse unter Berücksichtigung der Unsicherheit kleiner oder gleich $E_{0,MPE}$ sind. Zur Darstellung der Ergebnisse soll ein Diagramm verwendet werden, welches in ISO 10360-1 definiert ist und Abb. 5 zeigt.



Bilder: C. Herrmann

Abb. 3: Links: Stufenendmaß auf einem KMG, rechts: Detailaufnahme der Keramikzylinder mit parallelen Antastflächen

2.2.3 ISO 10360-5 Einzeltaster-Abweichungen

Die ISO 10360-5:2020-11 beschreibt mehrere Kenngrößen und die Methoden zu deren Ermittlung, sowohl für Einzeltaster- als auch Mehrfachtaster-Konfigurationen. Dieser Beitrag beschränkt sich für den Einblick in die Thematik auf die Größen für die Einzeltaster-Konfiguration mit Einzelpunktantastung.

Die beiden zentralen Kenngrößen für die Bewertung eines taktilen Tastsystems sind die Einzeltaster-Formabweichung $P_{Form.Sph.1x25:SS:Tact}$ (abgekürzt: P_{Form}) und die Einzeltaster-Größenmaßabweichung $P_{Size.Sph.1x25:SS:Tact}$ (abgekürzt: P_{Size}). Die Indizes stehen für die Antastung von 25 Punkten an einer Prüfkugel (Sph.1x25) mit einem einzelnen Taster (SS – single stylus) in berührendem (Tact) Modus. Die Ermittlung der Kenngrößen erfolgt über das Messen von 25 Punkten an einer Prüfkugel entsprechend eines vorgegebenen Punktmusters. Aus den 25 Punkten wird mit der Methode der kleinsten Quadrate eine Ausgleichskugel berechnet, deren Ergebnis die Koordinaten des Mittelpunktes sowie der Durchmesser der Kugel sind. Für die Größenmaßabweichung P_{Size} wird der berechnete Durchmesser der Kugel mit dem kalibrierten Durchmesser der Prüfkugel verglichen. Für

die Bestimmung der Formabweichung P_{Form} werden alle Abstände R der gemessenen Punkte zum berechneten Mittelpunkt der Kugel ermittelt. Die Spannweite $R_{max} - R_{min}$ dieser Abstände repräsentiert die Kugelform und damit die Einzeltaster Formabweichung P_{Form} . Die Bewertung der Leistungsfähigkeit des KMG erfolgt analog zur ISO 10360-2 über den Vergleich der ermittelten Kenngrößen P_{Form} und P_{Size} zu den entsprechenden Grenzwerten $P_{Form,MPE}$ bzw. $P_{Size,MPE}$ unter Berücksichtigung der Unsicherheit.

Vorgaben für die einzusetzende Prüfkugel betreffen die Größe (10 mm bis 51 mm im Durchmesser) sowie das Material (z. B. Stahl, Wolframcarbit, Keramik u. a., vgl. ISO 10360-5:2020).

3 Unsicherheit und Konformitätsbewertung

Die Blätter der ISO 10360 Reihe fordern für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Messgerätes den Vergleich der jeweiligen ermittelten Kenngrößen mit den durch Hersteller oder Nutzer definierten Grenzwerten unter Berücksichtigung der Unsicherheit. Im Gegensatz zur Messung von z. B. geometrischen Merkmalen an Bauteilen, wird bei der Kalibrierung den Blättern der ISO 10360 nicht die Messunsicherheit, sondern die sogenannten Testunsicherheit bewertet. Im Prinzip gibt diese Auskunft über die Unsicherheit des Kalibrierverfahrens, unter Einbeziehung der auf das Verfahren wirkenden Einflussfaktoren.

3.1 Testunsicherheit

In der ISO 10360-2:2010 wird für die Ermittlung der Testunsicherheit auf die ISO/TS 23165:2008 verwiesen. Diese beschreibt die Methodik zur Berechnung der Testunsicherheit für verschiedene Kenngrößen der ISO 10360 Reihe und gibt dabei u. a. Hinweise für die in der Unsicherheitsbilanz zu berücksichtigenden Unsicherheitsbeiträge. In der Einleitung der ISO/TS 23165:2008 heißt es: „Insbesondere werden Messabweichungen, welche durch das KMG selbst eingeführt werden, nicht in die Unsicherheitsbilanz mit einbezogen. [...] sie sagen nichts über die Zuverlässigkeit der Überprüfung aus und sind folglich keine Beiträge zur Testunsicherheit.“ Daraus folgt, dass sonst übliche Beiträge wie die Spezifikation des Messgerätes selbst oder dessen Wiederholbarkeit, bei der Berechnung der Testunsicherheit nicht berücksichtigt werden.

Exemplarisch wird hier die Berechnung der Testunsicherheit für die Kenngröße P_{Form} der ISO 10360-5:2020 aufgeführt. Aufbauend auf die ISO/TS 23165:2008 gibt die ISO/TS 17865:2016 eine detaillierte Beschreibung für die Berechnung

der Testunsicherheit der Antastabweichungen nach ISO 10360-5. Bei der Antastabweichung P_{Form} werden Unsicherheitsbeiträge durch

- die Form F_{Sphere} der verwendeten Testkugel
- die Standardunsicherheit $u(F_{Sphere})$ der Kalibrierung der Formabweichung
- die Stabilität der Vorrichtung zur Aufspannung der Testkugeln bzw. Einflüsse $d_{Fixturing}$ durch die Antastkraft des Messkopfsystems

in die Bilanz der Testunsicherheit aufgenommen. Die Standardunsicherheit der Einzeltaster-Formabweichung $u(P_{Form})$ ergibt sich nach ISO/TS 17865:2016 zu

$$u(P_{Form}) = \sqrt{\left(\frac{F_{Sphere}}{2}\right)^2 + u^2(F_{Sphere}) + \left(\frac{d_{Fixturing}}{2}\right)^2}. \quad (1)$$

Die Formel (1) kann insbesondere dann Anwendung finden, wenn die Form F_{Sphere} der Testkugel und deren Unsicherheit $u(F_{Sphere})$ im Vergleich zur Spezifikation $P_{Form,MPE}$ des KMG hinreichend klein sind. Im Gegensatz zu anderen Kalibrierungen, bei der die Abweichung eines gemessenen Wertes zu einem kalibrierten Wert betrachtet wird, findet bei der Messung der Formabweichung lediglich ein Vergleich von ermitteltem Wert P_{Form} zum Grenzwert $P_{Form,MPE}$ statt. Lägen die Werte für F_{Sphere} und $u(F_{Sphere})$ zu nah am Grenzwert des KMG, wäre der Nachweis der Leistungsfähigkeit des KMG in Sachen Formabweichung nicht möglich. Theoretisch bzw. um dem generellen Prinzip einer Kalibrierung zu folgen, müsste die Abweichung von gemessener Formabweichung und kalibriertem Wert der Form der Testkugel miteinander verglichen werden. In der Praxis stellt sich dies jedoch als schwierig dar, weil sowohl bei der Kalibrierung der Testkugel selbst, als auch bei der Kalibrierung des KMG die Pose der Testkugel berücksichtigt werden müsste, was nicht ohne weiteres möglich ist.

Bezüglich des Wertes F_{Sphere} muss für die Berechnung der Testunsicherheit $u(P_{Form})$ nach Gleichung (1) noch die Art und Weise der Kalibrierung der Testkugel berücksichtigt werden. In der Praxis der Kalibrierlabore wird nicht die gesamte Form der Testkugeln, sondern als repräsentative Angabe deren Rundheit kalibriert. Dies geschieht i. d. R. an mehreren Großkreisen. Abhängig von der Anzahl der zur Kalibrierung der Rundheit verwendeten Großkreise, ergibt sich der Wert F_{Sphere} durch das Anbringen eines Faktors auf den größten Wert der kalibrierten Rundheit (vgl. ISO/TS 17865:2016). Wird die Rundheit z. B. für je drei Großkreise auf der Prüfkugel angegeben, so wird der größte der drei Werte mit dem Faktor 1,25 multipliziert, um F_{Sphere} zu erhalten.

Die Ansätze zur Ermittlung der Testunsicherheit für die weiteren Kenngrößen der ISO 10360-5:2020 können der ISO/TS 17865:2016 und für die Kenngröße Längenmessabweichung E_0 der ISO/TS 23165:2008 entnommen werden.

3.2 Konformitätsaussage

Die einzelnen Teile der ISO 10360 Reihe, die die Kalibrierung von Koordinatenmesssystemen thematisieren, beschreiben auch die Bewertung der erzielten Messergebnisse. In diesen Normen ist vom Nachweis der Leistungsfähigkeit des jeweiligen Messsystems die Rede. Dabei geht es um die Überprüfung der Übereinstimmung von den Ergebnissen mit der Spezifikation. Die Entscheidungsregel, ob die Spezifikation erfüllt wird oder nicht, kann zwischen den an der Kalibrierung beteiligten Parteien individuell vereinbart werden. Als Standardfall wird jedoch auf die DIN EN ISO 14253-1 verwiesen. In dieser Norm wird die Herangehensweise für die Bewertung, ob erzielte Kalibrierergebnisse die Spezifikation erfüllen oder nicht, detailliert unter Berücksichtigung von Verteilungsfunktionen und Wahrscheinlichkeitsgrenzen dargestellt. Die in der Norm beschriebene Methodik stellt eine praktikable Bewertung von Kalibrierergebnissen und den abgeschätzten Testunsicherheiten dar. Sie hilft den Anwendern, die Wahrscheinlichkeit für falsch-positive bzw. falsch-negative Konformitätsaussagen zu verringern. Insbesondere soll so die Beurteilung von Kalibrierergebnissen, die nahe der Spezifikationsgrenze liegen, mit einer klar definierten Entscheidungsregel für die Anwender der Norm bzw. für die Auftraggeber einer Kalibrierung, transparent gemacht werden.

Die DIN EN ISO 14253-1:2018 definiert die Standardentscheidungsregel im Falle einer zweiseitigen Spezifikation anhand der unteren (LSL) und oberen (USL) Spezifikationsgrenzen sowie den sog. Schutzabständen. In der Praxis handelt es sich bei diesen Schutzabständen um die ermittelten Unsicherheiten. Diese verringern den sog. Akzeptanzbereich. In diesem Bereich müssen die erzielten Ergebnisse liegen, damit die Konformität nachgewiesen werden kann.

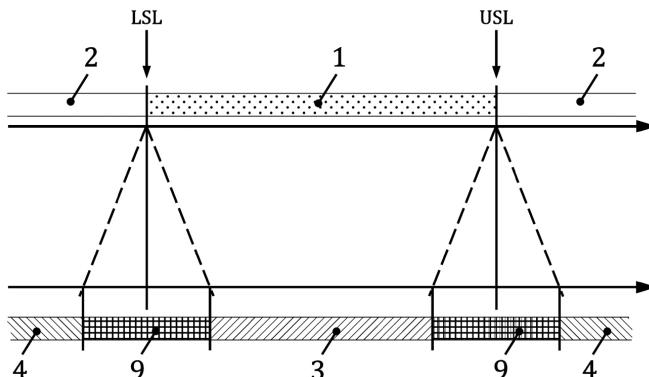


Abb. 4: Schematische Darstellung der Entscheidungsregel zur Konformitätsbewertung nach DIN EN ISO 14253-1:2018

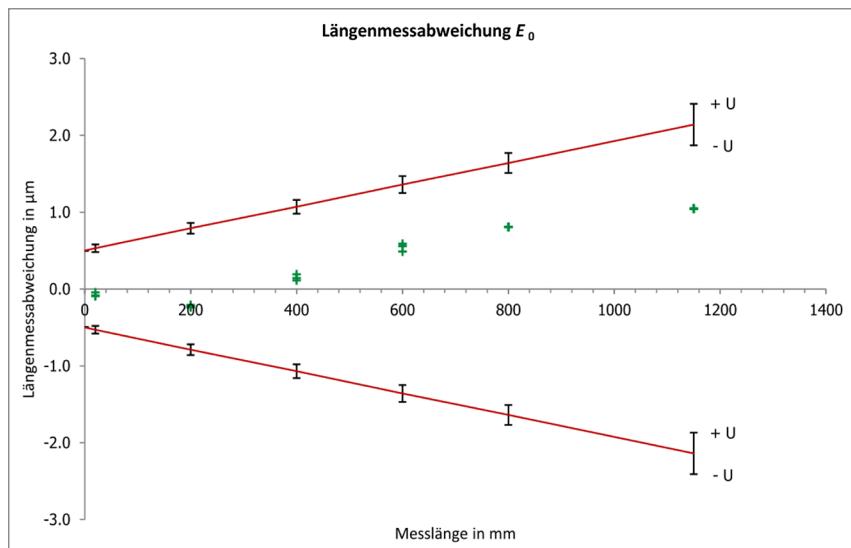


Abb. 5: Darstellung der Längenmessabweichung E_0 mit Spezifikationsgrenzen und Unsicherheiten entsprechend DIN EN ISO 10360-1

Es ist daher schlüssig, dass bei einem Kalibrierverfahren eine möglichst kleine Testunsicherheit angestrebt werden sollte, um einen größtmöglichen Akzeptanzbereich zu realisieren.

Abb. 4 stellt die Verhältnisse dar. 1 ist der Spezifikationsbereich, z. B. aus der Angabe der Spezifikationsgrenzen aus einem Datenblatt und 2 ist der Bereich außerhalb der Spezifikation. 3 ist der durch die Unsicherheitsbereiche 9 resultierende Akzeptanzbereich, bzw. der Bereich, in dem die Konformität nachgewiesen werden kann. 4 stellt den Bereich der Nichtkonformität dar. Abb. 4 macht deutlich, wie eine größer werdende Unsicherheit den Akzeptanzbereich verkleinert, weshalb eine möglichst kleine Testunsicherheit anzustreben ist. Im Sinne dieser Entscheidungsregel kann die Konformität, sobald Messergebnisse der Kalibrierung im Bereich der Unsicherheit liegen, nicht mehr nachgewiesen werden.

Eine Umsetzung dieses Schemas für die Längenmessabweichung E_0 in einem Kalibrierschein zeigt die folgende Abb. 5. Hier sind die Spezifikationsgrenzen als rote Linien gekennzeichnet. Der Unsicherheitsbereich ist durch die schwarzen Balken um die Spezifikationsgrenzen dargestellt. Im in Abb. 5 gezeigten Fall liegen alle Werte der Längenmessabweichung E_0 innerhalb des Akzeptanzbereichs, sodass die Konformität nachgewiesen werden kann.

4 Zusammenfassung

Die Kalibrierung von Messsystemen ist eine zentrale Voraussetzung für deren Einsatz in der messtechnischen Praxis. Die Kalibrierung liefert Informationen, die für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Messsystems und für das Beurteilen der Erfüllung von vereinbarten oder definierten Spezifikationen bzw. Einhaltung von zulässigen Abweichungsgrenzwerten nötig sind. Im Bereich der Koordinatenmesstechnik stellen die verschiedenen Teile der Normenreihe ISO 10360 ein Standardwerk dar. Hersteller von Koordinatenmesssystemen wie Hexagon oder Zeiss geben die Spezifikationen der Messgeräte anhand der in der Normenreihe ISO 10360 angegebenen Kenngrößen an. Die einzelnen Teile der Normenreihe beschreiben praxistaugliche Methoden für die Kalibrierung von stationären Koordinatenmessgeräten mit verschiedenen Sensortypen (taktile, optische Abstandssensoren und bildgebende Sensoren), sowie portablen Messsystemen (u. a. Laser Tracker). Die Normenreihe beschreibt im Detail Art und Umfang der für die Kalibrierung notwendigen Messungen, stellt Auswertemethoden dar und gibt Empfehlungen bzw. definiert für die Verfahren zu nutzende Normale. Hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse verlangt die Normenreihe die Berücksichtigung der Testunsicherheit. Mit den Normen ISO 23165 und ISO 17865 stehen den Messsystemherstellern sowie Anwendern Methoden für die Ermittlung der Testunsicherheiten zu Verfügung. Beide Normen beziehen sich auf den Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen (GUM) und stellen damit anerkannte Verfahren dar. Mit der ISO 14253-1 gibt es schließlich eine standardisierte Beschreibung für die Konformitätsbewertung. Sie kommt der Forderung u. a. der ISO 10360 Normenreihe nach, die Unsicherheit bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Messsystemen anhand der Erfüllung von Spezifikationen zu berücksichtigen. Die in diesem Beitrag angesprochenen Normen stellen Messsystemherstellern und Anwendern „Werkzeuge“ bereit, Kalibrierungen nach standardisierten und akzeptierten Verfahren durchzuführen, auszuwerten und die Ergebnisse auf der Basis wissenschaftlich anerkannter Verfahren zu bewerten.

Literatur

- DIN EN ISO 10360-1:2003-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 1: Begriffe.
- DIN EN ISO 10360-2:2010-06, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: KMG angewendet für Längenmessung.

- DIN EN ISO 10360-3:2000-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 3: KMG mit der Achse eines Drehtisches als vierte Achse.
- DIN EN ISO 10360-5:2020-11, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 5: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit berührendem Messkopfsystem im Einzelpunkt und/oder Scanningmodus.
- DIN EN ISO 10360-7:2011-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 7: KMG mit Bildverarbeitungssystemen.
- DIN EN ISO 10360-8:2014-03, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 8: KMG mit optischen Abstandssensoren.
- DIN EN ISO 10360-9:2014-04, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 9: KMG mit Multisensorik.
- DIN EN ISO 10360-12:2018-02, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 12: Gelenkarm-Koordinatenmessgeräte (KMG).
- DIN EN ISO 14253-1:2018, Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen.
- DIN ISO/TS 23165:2008-08, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Leitfaden zur Ermittlung der Testunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG).
- Hexagon (2021): Leitz PMM Gold; Small volume, sub-mircon accuracy coordinate measuring machine, Data sheet.
- IATF 16949:2016-10, Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie.
- ISO 10360-10:2021, Geometrical product specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) – Part 10: Laser trackers.
- ISO/TS 17865:2016, Geometrical product specifications (GPS) – Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty for CMMs using singles and multiple stylus contacting probing systems.

Kontakt

Dr.-Ing. Christoph Herrmann
Hexagon Metrology GmbH
Siegmund-Hiepe-Straße 2-12, 35578 Wetzlar
christoph.herrmann@hexagon.com

Toleranzprüfung im Hochbau mit geodätischen Messverfahren

Otto Heunecke

1 Einleitung

Die Ursache vieler Streitigkeiten bei der Errichtung von Bauwerken sind unterschiedliche Vorstellungen zur baugeometrischen Qualität und im Regelfall damit verbunden, die Missachtung von zulässigen Toleranzen, wie diese in Normen, im Speziellen der DIN 18202 Toleranzen im Hochbau (2019), vorgegeben sind. Dies betrifft die Übergabe von einem Gewerk A (Vorunternehmer) zu einem Gewerk B (Folgeunternehmer) im Baugeschehen ebenso wie die Übergabe des fertiggestellten Bauwerks vom Bauunternehmen (Auftragnehmer) an den Bauherren (Auftraggeber) und dessen Erwartungshaltung an das von ihm in Auftrag gegebene (Bau)Werk.

Somit stellen Toleranzen geometrische Schnittstellen der Beteiligten im Hochbau dar und beinhalten als solche die besagten Konfliktpotenziale. Inhalt der nachfolgenden Ausführungen ist es, die Inhalte einer Toleranzprüfung nach DIN 18202 (2019) darzulegen und die Eignung geodätischer Messverfahren für derartige Fragen der Qualitätssicherstellung aufzuzeigen. Mit der Einführung des Boxprinzips, welches erfordert, dass alle Punkte einer Bauteiloberfläche innerhalb eines Hüllkörpers liegen, findet sich in der DIN 18202 mittelbar auch ein Übergang zur bauteilstrukturierten Prüfung bei Anwendung des Building Information Modelings (BIM).

2 Baugeometrische Qualität

Die geometrische Gestalt eines Bauwerks und seiner Teile wird durch die Be- messung entsprechend den Konstruktionsunterlagen und den sonstigen (impliziten) Vorgaben, z. B. horizontale Böden und Decken, vertikale Wände, festgelegt. Herstellungsbedingte Abweichungen müssen im Hinblick auf das Erscheinungsbild, die Passgenauigkeit (z. B. den Anbau einer Glasfassade, Einbau der Inneneinrichtung) sowie die Funktions- beziehungsweise Gebrauchsfähigkeit innerhalb gewisser Grenzen liegen, die im Regelfall durch normativ fixierte Toleranzen (lat. Duldsamkeiten) vorgegeben sind. Toleranzangaben sind somit Forderungen zur baugeometrischen Qualität der zu fertigenden Bauteile und

damit des daraus entstehenden Bauwerks. Sie dienen der Begrenzung zulässiger Abweichungen von den Nominalmaßen und -angaben.

Wird eine Baumaßnahme nach der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB) durchgeführt, hat bei fehlerhafter Ausführung einer Vorleistung und daher mutmaßlich erforderlicher Anpass- und Nacharbeiten das nachfolgende Gewerk das Recht, Bedenken nach § 4 (3) VOB/B (2016) anzumelden. Durch die zeitnahe Prüfung geometrischer Größen (siehe VOB/B § 12 Abnahme) ist festzustellen, ob eine diesbezügliche Leistung des Vorgewerks beziehungsweise zum Abschluss des Bauvorhabens die Leistung des beauftragten Bauunternehmens ordnungsgemäß erbracht ist. Innerhalb der Ingenieurvermessungen fallen Toleranzprüfungen in den Bereich einer Aufnahme. DIN 18710-2 (2010) definiert eine Kontroll- bzw. Abnahmevermessung als unabhängige Vermessung zur Kontrolle vorgegebener geometrischer Größen eines Objekts.

Jedes Gewerk hat nach § 4 (2) VOB/B in eigener Verantwortung die anerkannten Regeln der Technik sowie die gesetzlichen und behördlichen Bestimmungen zu beachten. Nichteinhaltung von Toleranzen oder anderweitig getroffener Vereinbarungen zur Baugeometrie begründen einen Mangel und führen vor allem zu:

- Mehrkosten infolge von Zusatzmaßnahmen (Anpass- und Nacharbeiten),
- Qualitätsminderungen, gegebenenfalls sogar Schäden (weil z. B. Wasser nicht ablaufen kann),
- Behinderung des Bauablaufs (ungeplante Stillstandzeiten) und
- Beeinträchtigung des wunschgemäßen Aussehens eines Bauwerks.

3 Der Bayerlein'sche Dreischritt

Während die staatliche Rechtsetzung verbindlich für jedermann ist, haben technische Normen und Richtlinien, die sich nur auf den gesetzesfreien Raum beziehen dürfen und den hoheitlichen Bereich unberührt lassen müssen, lediglich Empfehlungscharakter und werden erst durch vertragliche Vereinbarung bindend. Bayerlein (2008) umschreibt mit seinem Dreischritt, wie aus juristischer Sicht eine geschuldete Leistung im Streitfall zu bewerten ist, um den rechtlichen Stellenwert von Normen und Richtlinien im Bauwesen einordnen zu können. Schritt 1 geht der Frage nach, ob es eine ausdrückliche Beschaffungsvereinbarung gibt, die Vorrang vor jedweden technischen Regeln hat. Hier können anwendungsbezogene Normen wie z. B. DIN 18710 Ingenieurvermessung, Teile 1 bis 4 (2010), helfen, zu solchen einvernehmlichen Vereinbarungen zu kommen. So fordert etwa auch § 7 (1) VOB/A (2019), dass im Rahmen der Ausschreibung die erwartete Leistung eindeutig und erschöpfend zu beschreiben ist. Nach

Werkvertragsrecht, siehe § 633 BGB, ist ein Werk frei von Sachmängeln, wenn es die vereinbarte Beschaffenheit hat.

Schritt 2 besteht in der juristischen Auslegung eines Vertrags, dessen Inhalt von den streitenden Parteien unterschiedlich verstanden wird. Hierbei ist im Regelfall eine Begutachtung erforderlich, wobei an dieser Stelle Terminologienormen beim Verständnis von Begriffen unterstützen können. Bayerlein (2008) schreibt: „Die Tätigkeit des Sachverständigen beschränkt sich im Wesentlichen darauf, dem Richter das für die Beurteilung bedeutsame Fachwissen zu vermitteln.“

Fehlen Vereinbarungen zum vereinbarten Leistungssoll, kommt es in Schritt 3 auf die anerkannten Regeln der Technik an. Hier besteht die Vermutung, dass diese in technischen Normen und Richtlinien wiedergegeben werden und somit den geschuldeten Mindeststandard festlegen. Wird dieser Mindeststandard nicht erreicht, ist das Werk mangelhaft. Diese Vermutung kann widerlegt werden, wobei derjenige beweispflichtig ist, der die Richtigkeit bzw. das Zutreffen der einschlägigen Norm oder Richtlinie anzweifelt. In der Baupraxis häufig anzutreffen ist die Situation ungenauer, aber vertraglich vereinbarter Baubeschreibungen auf der einen Seite und zugleich einer hohen, über den nach Normen zulässigen Maßabweichungen liegenden Erwartungshaltung seitens der Bauherren. In einer solchen Situation bedarf es der frühzeitigen Aufklärungspflicht durch einen Bausachverständigen (Kinzer und Rembke 1999).

4 DIN 18202 Toleranzen im Hochbau

Die DIN 18202 (2019) hat den Zweck, Grundlagen für Toleranzen und für ihre Prüfung im Hochbau festzulegen. DIN 18201 Toleranzen im Bauwesen – Begriffe, Grundsätze, Anwendung, Prüfung – wurde zurückgezogen und ihre Inhalte in DIN 18202 übernommen. Die Ausführungen gelten baustoffunabhängig für Standardleistungen gewöhnlicher Ausführungsart und Abmessungen im Rahmen üblicher Sorgfalt beim Roh- und Ausbau. Expressis verbis wird festgehalten, dass Werte für zeit- und lastabhängige Verformungen, auch bedingt durch Temperatureinfluss, nicht Gegenstand der Norm sind. Bauwerke, die nicht dem allgemeinen Hochbau zuzurechnen sind, fallen nicht in den Anwendungsfall; beispielsweise Brücken und Tunnel. Ebenfalls nicht in den Anwendungsbereich fallen Bestandsbauwerke. Hier ist zu berücksichtigen, ob zum Zeitpunkt von deren Ausführung andere Anforderungen an die Maßhaltigkeit Anwendung gefunden haben. Dennoch aber heißt es z. B. in den baufachlichen Richtlinien für die Gebäudebestandsdokumentation auf den Liegenschaften des Bundes (BFR 2021, Abschnitt 5.6.4): „Soweit nicht anders beauftragt, sind für die Gebäude-

bestandsdokumentation die Genauigkeitsanforderungen der DIN 18202 ... einzuhalten.“

Von ihrer Zielsetzung erstreckt sind die DIN 18202 auf die Herstellung von Bauteilen und Bauwerken. Es besteht also ein unmittelbarer zeitlicher Bezug zur Ausführung. Dies gilt auch für Einzelbau- und Fertigteile, die separat räumlich und zeitlich getrennt von der Baustelle hergestellt werden. Weitere Normen mit Toleranzvorgaben einzelner Gewerke, z. B. im Mauerwerks- und Holzbau, sind nachstehend nicht besprochen. Siehe hierzu z. B. Ertl (2019). Spätestens mit dem Einfügen in das Bauwerk fallen aber auch solche Bauteile grundsätzlich in den Anwendungsbereich der DIN 18202, wobei vorgefertigte Bauteile die Möglichkeit eines Passungsausgleichs vor Ort einschränken. Der praktizierte Grundsatz der Baupraxis „alle Maße sind am Bau zu prüfen“ wird von der DIN 18202 dahingehend eingeschränkt, dass anlassbezogen geprüft wird, „wenn es erforderlich ist“.

Die wichtigsten Begriffe der DIN 18202 geben die Abb. 1 und Abb. 2 wieder. Eine Maßabweichung bezeichnet die Differenz zwischen Ist- und Nennmaß. Bei symmetrischen Verhältnissen wird die Maßtoleranz T als Grenzabweichung mit $\pm T/2$ bezogen auf das Nennmaß angegeben. Das Stichmaß ist ein Hilfsmaß zur Ermittlung der Istabweichungen von der Winkligkeit, der Flucht und der Ebenheit. Somit ist z. B. eine Winkelabweichung, also die Differenz zwischen einem Ist- und einem Nennwinkel, als Stichmaß senkrecht bezogen auf ein Nennmaß und bei der Ebenheitsprüfung senkrecht bezogen auf einen Messpunktabstand anzugeben. Alle Grenzwerte für Stichmaße sind als absolute Werte, also unabhängig von einem Richtungsbezug der Abweichung angegeben; der Zusatz „ \pm “ ist entbehrlich.

In DIN 18202 (2019) werden festgelegt:

- Grenzabweichungen für Maße, z. B. bei Längen, Breiten, Öffnungen,
- Grenzwerte für Winkelabweichungen,
- Grenzwerte für Abweichungen von der Flucht bei Stützen und
- Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen.

Die Grenzabweichungen beziehungsweise Grenzwerte sind für näher spezialisierte Situationen in den Tabellen 1 bis 4 der DIN 18202 zusammengestellt. Die Gültigkeit erstreckt sich bis zu Nennmaßen von max. 60 m. Man findet keine Grenzabweichungen unmittelbar für Koordinaten, Maße lassen sich allerdings als lokale 1D-Koordinaten interpretieren. Um zu verhindern, dass singuläre Maßabweichungen, die nicht charakteristisch für die Maßhaltigkeit sind, das Prüfergebnis beeinflussen, sind die Messpunkte für lichte Maße, Winkel- und Fluchtabweichungen möglichst in einem Abstand von etwa 10 cm von den Ecken und Kanten zu legen. Davon kann abgewichen werden, wenn solche singulären Effekte nicht zu erwarten sind.

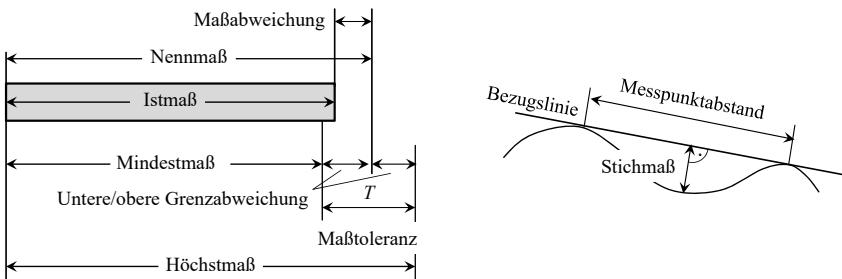


Abb. 1: Maßbegriffe der DIN 18202, Stichmaß und Messpunktabstand

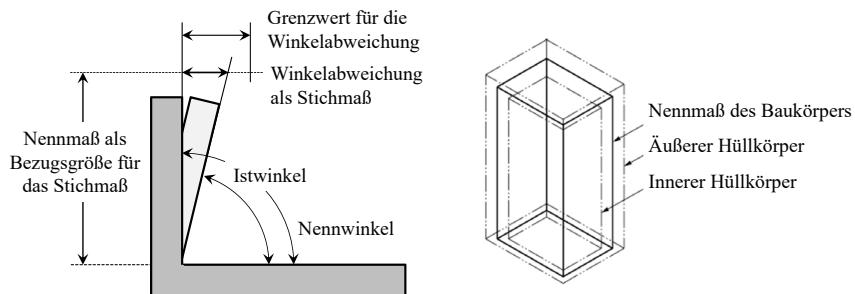
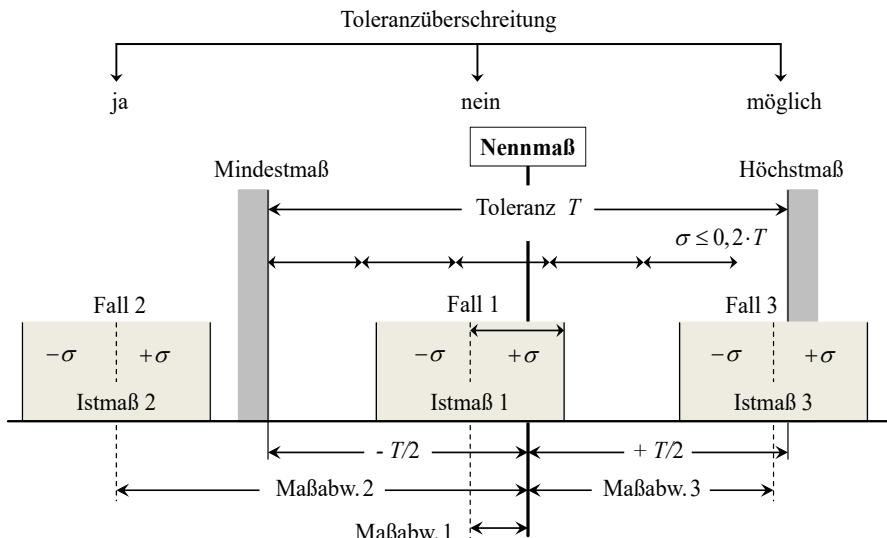


Abb. 2: Begriffe zur Winkelabweichung und Boxprinzip für einen Körper

Die Lage- (Maße, Winkel) und Formmaße (Flucht, Ebenheit) gelten je für sich allein, unabhängig von den anderen unter Berücksichtigung des Boxprinzips. Die DIN 18202 (2019) verlangt, dass jedes Merkmal für sich zu prüfen ist – nicht jedoch, dass dafür getrennte Vermessungen durchzuführen sind. Oft sind mehrere Aspekte zugleich zu betrachten. Beispiel: Ein Fußboden hat eine Ausdehnung (Maße), die Forderung nach Horizontalität („Nullgefalle“) sowie im Regelfall Rechtwinkligkeit des Raumes und die Anforderungen an die Ebenheit zu erfüllen. Durch Ausnutzen der Grenzwerte beziehungsweise Grenzabweichungen des einen Bereichs dürfen die entsprechenden Grenzwerte beziehungsweise Grenzabweichungen eines anderen Bereichs nicht überschritten werden. Es ist also von erheblichem Vorteil, wenn aus einem gewonnenen Datensatz (von z. B. Koordinaten oder einer Punktfolge) Aussagen zu mehreren zu prüfenden Merkmalen abgeleitet werden können.

5 Grundsätze der Toleranzprüfung

Die Toleranz selbst ist im Allgemeinen eine vorgegebene und nicht zu hinterfragende Größe und die Prüfung auf Einhaltung von Toleranzen bedeutet das Feststellen von Istmaßen, deren Vergleich mit den Nominalmaßen sowie einer sich anschließenden Entscheidung. Dabei sind, symmetrische Verhältnisse unterstellt, die in Abb. 3 veranschaulichten Fälle gegeben. Bei der Prüfung bleibt die Wahl des Messinstrumentariums und des -verfahrens dem Prüfenden vorbehalten. Beides ist jedoch zu dokumentieren, zusammen mit der damit verbundenen



Siehe Heunecke 2014

Abb. 3: Prüfung auf Toleranzüberschreitung

Messunsicherheit u anzugeben und, wie es in der DIN 18202 (2019) schlicht heißt, „bei der Beurteilung zu berücksichtigen“. Hier nicht behandelt ist die Qualitätsprüfung geometrischer Eigenschaften im Maschinen- und Anlagenbau, wo im Allgemeinen kleinere Messunsicherheiten als im Bauwesen gefragt und auch andere Vorgaben bei der Toleranzprüfung hinsichtlich Form, Richtung, Ort und Lauf zu beachten sind.

Ebenfalls nicht näher behandelt sind Fragen der Toleranzfortpflanzung, wie sich Einzeltoleranzen zu einer Gesamttoleranz zusammensetzen und begründen. An dieser Stelle reicht es aus, die Toleranz T in die Anteile der Ausführungs-toleranz T_A und der Vermessungstoleranz T_M aufzuteilen. Unter der Annahme

überwiegend zufälliger Abweichungen ist eine quadratische Addition beider Anteile gerechtfertigt (Kuhlmann et al. 2016):

$$T = \sqrt{T_A^2 + T_M^2}. \quad (1)$$

Führt man die Vermessungstoleranz T_M auf eine Standardabweichung σ zurück, ergibt sich – näheres siehe Kuhlmann et al. (2016) – ein in der Praxis etabliertes Verhältnis V einer Standardabweichung σ des zu bestimmenden Istmaßes zu seiner Toleranz T bei der Toleranzprüfung zu (DIN 18710-1, 2010):

$$\frac{\sigma}{T} \leq 0,2 ; \quad V = \frac{\sigma}{T}. \quad (2)$$

Man kann bei $V \leq 0,2$ von einer anerkannten Regel der Technik sprechen, wobei die konkrete Festlegung der Relation V optionaler Teil einer Beschaffenheitsvereinbarung ist. Wie die Abb. 3 zeigt, lassen sich mit $V \leq 0,2$ für die überwiegende Anzahl der Prüfungen klare („trennscharfe“) Entscheidungen treffen, ob eine Toleranzüberschreitung gegeben ist oder nicht. Sollte wie bei den Fall 3 dargestellt keine klare Entscheidung möglich sein, verbleibt als Option eine Wiederholung der Prüfung mit einer höheren Genauigkeit.

Gelingt es im Messprozess, die systematischen Messabweichungen durch Kalibrierung und Messanordnung weitgehend zu tilgen und etwaig verbleibende Anteile als zufällig wirkend aufzufassen, kann eine so abgeschätzte Standardabweichung als Messunsicherheit verstanden werden. Damit gilt $u = \sigma$. Aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs bei Messungen zur Toleranzprüfung wird man im Allgemeinen nicht mit empirisch ermittelten Genauigkeitsaussagen operieren können und stattdessen eine analytische Abschätzung zur zu erwartenden Genauigkeit der Ist-Maß-Bestimmungen vornehmen müssen. Ein Mess- bzw. hier Prüfergebnis gilt nur dann als vollständig, wenn es Angaben zur Messunsicherheit enthält (u. a. DIN 18710-1, 2010).

Als Messunsicherheit u definiert DIN V ENV 13005 (1999) einen „dem Messergebnis zugeordneten Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden kann“. In der nachfolgenden Anmerkung heißt es, dass dieser Parameter beispielsweise eine Standardabweichung ist. Dies setzt allerdings voraus, dass diese aus Wissen und Erfahrungen abgeschätzte Größe σ sowohl die Komponente A (stochastische Anteile) als auch B (aus anderen Quellen abgeleitete Informationen, z. B. Kalibrierprotokolle) nach DIN V ENV 13005 subsumiert. Auswertungen erfolgen im Regelfall in zeitlich oder inhaltlich aufeinanderfolgenden Schritten. Die sich aus einer solchen Auswertestufen ergebenden Standardabweichungen für abgeleitete Zielgrößen, hier den Istmaßen, sind dabei ebenfalls als Angaben zur Messunsicherheit zu interpretieren.

6 Prüfungen mittels Tachymetrie

Neben einer direkten Bestimmung von Istmaßen mittels z. B. Laserentfernungs-messer (Disto) ist eine tachymetrische Messung entsprechend Abb. 4 links möglich, insbesondere an Stellen, wo eine direkte Bestimmung nicht durchführbar ist. Die lokale x -Richtung sei Teilkreisnull des (lotrecht aufgebauten) Tachymeters und die Endpunkte P_1 und P_2 des zu bestimmenden Istmaßes seien in der schematisierten Situation unmittelbar über reflektorlose Distanzmessung zu messen. In den Fällen, wo die Materialoberfläche und/oder ein ungünstiger Auf treffwinkel erwarten lassen müssen, dass die reflektorlose Distanzmessung systematisch verfälscht wird, wäre ein Reflektor mit Adapter zu verwenden.

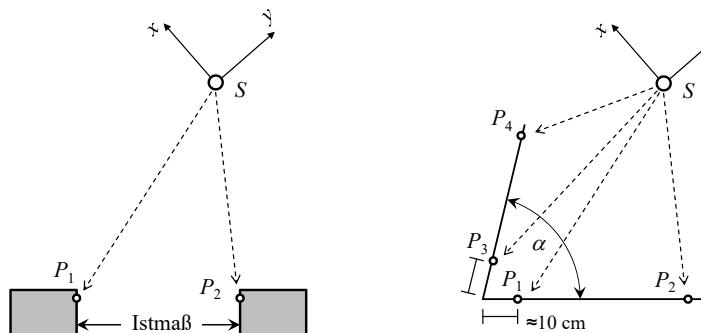


Abb. 4: Tachymetriche Prüfung eines Istmaßes und eines Winkels (schematisch)

Bezüglich der Maße unterscheidet die DIN 18202 (2019) zwischen einem Grenzbezug, einem Achsbezug, einer Mittellage und einer Randlage für die Zuordnung zu einem lokalen Koordinatensystem des Bauvorhabens. Bei der Prüfung ist von dem gleichen Bezug auszugehen wie bei der Planung und Ausführung, so dass gegebenenfalls weitere Punkte tachymetrisch zu bestimmen sind, um diesen gleichen Bezug sicherstellen zu können. Notwendige Bezugspunkte sind vor der Bauausführung festzulegen, so dass es möglich wird, die Ausführung, d.h. damit verbunden die Absteckung, und die Prüfung auf gleiche Vorgaben zu beziehen.

Über polares Anhängen ergeben sich die Koordinaten X aus den Polarmess-werten L des Tachymeters und mittels Kovarianzfortpflanzungsgesetz (KFG) ist die zugeordnete Kovarianzmatrix Σ_{xx} zu berechnen. Mit $X = \varphi(L)$ gilt somit

$$\Sigma_{xx} = F \cdot \Sigma_{LL} \cdot F^T ; \quad F = \frac{\partial \varphi(L)}{\partial L}. \quad (3)$$

Aus dem Vektor X der Koordinaten ist das Istmaß der Abb. 4 links über den Satz des Pythagoras als abgeleitete Größe $Y = \phi(X)$ zu bilden, wobei On-Board-Programme der Tachymeter diese Bestimmung einer Größe Y bequem ermöglichen. Dabei ist davon ausgegangen, dass Raumstrecken durch Anbringen von Korrekturen und Reduktionen im Bezugssystem der Baumaßnahme vorliegen. Die Varianz σ_y^2 für ein Maß im Grundriss ergibt sich mit t_{12} als Richtungswinkel zu

$$\sigma_y^2 = \mathbf{G} \cdot \mathbf{F} \cdot \Sigma_{LL} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{G}^T; \quad \mathbf{G} = \frac{\partial \phi(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} = \begin{bmatrix} -\cos t_{12} & -\sin t_{12} & \cos t_{12} & \sin t_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

und wird bei solchen Programmen standardmäßig zunächst nicht berechnet. Bezeichnet ΔY die Maßabweichung, kann bei Annahme einer normalverteilten Testgröße mit

$$\frac{|\Delta Y|}{\sigma_y} \sim N(0,1) \quad (5)$$

ein Test auf signifikante Abweichung des Istmaßes gegenüber dem Nennmaß durchgeführt werden und gilt statistisch betrachtet als signifikant abweichend, wenn der Betrag von ΔY den etwa dreifachen Betrag seiner Standardabweichung σ_y erreicht. Basierend auf (2) ist für eine Aussage zur Toleranzprüfung hier jedoch gefordert, dass für ein geeignetes Messverfahren die vereinbarte Relation V erfüllt sein muss.

Bei Tachymetern, wie diese zu Bauvermessungen im Allgemeinen benutzt werden, findet man als typische Spezifikationen für die reflektorlose Distanzmessung $\sigma_d \approx 2 - 3 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ und für die Richtungsmessung $\sigma_r \approx 1 - 2 \text{ mgon}$. Wählt man einen Instrumentenstandpunkt S so, dass Zielweiten zu den Punkten P_i in den beim Hochbau üblichen Größenordnungen liegen und geht man von im Sinne einer Messunsicherheit konservativ abgeschätzten Werten $\sigma_s = 3 \text{ mm}$ für die Distanzen (bei unterstellten kurzen Distanzen kommt der entfernungsabhängige Anteil nicht zum Tragen). Mit $\sigma_r = 6 \text{ mgon} (\approx 1 \text{ mm}/10 \text{ m})$ für die Richtungen in solchen Konfigurationen resultiert auch für die höchsten Anforderungen der Tab. 1 „Grenzabweichungen für Maße“ der DIN 18202 (2019) die pauschale Aussage, dass die Tachymetrie bei $V \leq 0,2$ als ein zulässiges Messverfahren für die Prüfung vom Maßen angesehen werden kann. Für praktisch alle Situationen ergibt sich, dass sogar $V \approx 0,1$ eingehalten werden kann.

Aus dem Vektor X , bestehend aus den Koordinaten von mindestens vier Punkten, ist der gesuchte Istwinkel α bei einer Prüfung im Grundriss aus den örtlichen Richtungswinkeln abzuleiten, siehe Abb. 4 rechts. Die Prüfung eines Winkels im Aufriss (z.B. Schiefstellung einer Wand) ist sinngemäß durch Gera-

denschnitt möglich. Mit mehr als zwei Punkten je Schnittfläche wird es für die Prüfung von Winkeln mit Hilfe der Ausgleichungsrechnung möglich, mit einer generierten Geraden aus n Punkten und dem Schnitt mit einer zweiten Linie aus m Punkten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit eines Istwinkels zu steigern. Die Abb. 4 rechts zeigt den Fall einer nicht überbestimmten Lösung mit $n = m = 2$.

Ausgehend von der Kovarianzmatrix Σ_{xx} der Koordinaten und bei einem zu prüfenden Winkel α im Grundriss ist mit den Differentialquotienten für die Richtungswinkel der Geraden (z. B. Niemeier 2008) eine Jacobi-Matrix G aufzustellen und eine Varianz σ_α^2 zu berechnen. Eine Differenz $\Delta\alpha$ (in Radian) ergibt bei einem Nennmaß r die Winkelabweichung als Stichmaß t (siehe Abb. 2 links) mit einer Standardabweichung σ_t zu

$$t = \Delta\alpha \cdot r ; \quad \sigma_t = \sigma_\alpha \cdot r. \quad (6)$$

Anders als die generelle Aussage zur Eignung der Tachymetrie bei der Prüfung von Maßen, sind bei der Prüfung von Winkeln insbesondere die Messpunktstände bei der Ermittlung der Geraden zu berücksichtigen, um den konkreten Nachweis der Eignung zu führen. In der Praxis erfolgt die Prüfung von rechten Winkeln oft durch das Anlegen eines rechtwinkligen Hilfsdreiecks mit ganzzahligen Seitenabmessungen oder unter Verwendung eines Rotationslasers, wobei die Stichmaße mittels Messband bestimmt und manuell protokolliert werden (Ertl 2019).

Die DIN 18202 (2019) behandelt auch die Fluchtabweichung von Zwischenstützen aus einer Verbindungsgeraden zwischen den Endstützen. Lagefehler der beiden Endstützen sind getrennt von der Fluchtabweichung hinsichtlich ihrer Grenzabweichungen zu beurteilen. Eine wie in der Abb. 5 schematisch eingetragene tachymetrische Bestimmung mit freier Standpunktwahl ist insbesondere dann von Vorteil, wenn die Flucht verbaut oder schlecht zugänglich ist (z. B. im Deckenbereich). Gegebenenfalls ist die Punktbestimmung auch auf eine abgesetzte Linie zu beziehen, die Abb. 5 geht von einer Messung unmittelbar an den Stützen aus.

In die durch die Punkte P_1 und P_2 definierte Flucht sind orthogonale Hilfspunkte (Lotfußpunkte) einzurechnen, um die Stichmaße für die Zwischenstützen zu ermitteln, hier exemplarisch der Punkt H bei P_3 . Für das Stichmaß t_3 bildet man den Vektor $\mathbf{Y}^T = [X_3 \quad Y_3 \quad X_H \quad Y_H]^T = \phi(\mathbf{X})^T$ als Zwischengröße und zur Aufstellung der Jacobi-Matrix G geht man bzgl. des Hilfspunkts zweckmäßigerweise zur numerischen Differentiation (Niemeier 2008) über mit der sich ergebenden Kovarianzmatrix

$$\Sigma_{YY} = G \cdot \Sigma_{XX} \cdot G^T ; \quad G = \frac{\Delta\phi(\mathbf{X})}{\Delta\mathbf{X}}, \quad (7)$$

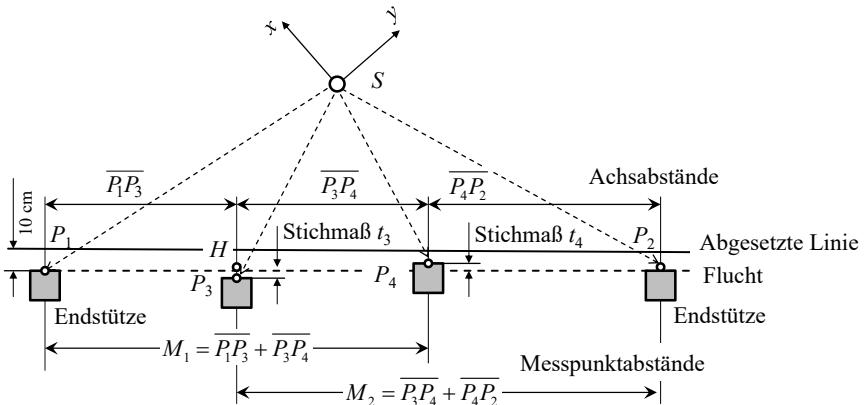


Abb. 5: Prüfung einer Flucht mittels Tachymetrie (schematisch)

so dass die Standardabweichung des Stichmaßes bestimmt werden kann. Es lässt sich für typische Konfigurationen zeigen, dass hier Stichmaße mit $\sigma_t \approx 2 - 3$ mm ermittelt werden können. Damit ist es mittels Tachymetrie möglich, die in Tab. 4 der DIN 18202 (2019) genannten Grenzwerte für Fluchtabweichungen bei Nennmaßen von mehr als 3 m unter Wahrung der Relation (2) zu prüfen. Für kürzere Stützenabstände (zulässige Abweichung 8 mm bis 3 m, siehe Tab. 4) ist das Arbeiten mit einer Richtlatte, die bis 4 m Länge standardmäßig zur Verfügung stehen, eine praktikable Alternative.

7 Prüfung auf Ebenheit

Als Verfahren zur Prüfung auf Ebenheit nennt die DIN 18202 (2019) eine Richtlatte mit Verwendung von Messkeilen sowie, ohne dabei ein Messgerät zu bezeichnen, das Flächennivellement. Die Grenzwerte für die Ebenheitsabweichung sind in der Tab. 3 der DIN 18202 (2019) für unterschiedliche Messpunktabstände angegeben sind (Auszug siehe Tab. 1). Sie müssen für alle Kombinationen jeweils zweier Hochpunkte einer Fläche, die den jeweiligen Messpunktabstand bestimmen, und dem dazwischen gemessenen Stichmaß an der tiefsten Stelle eingehalten sein. Es müssen sowohl die kurzwelligen als auch die langwelligen Anteile einer Unebenheit geprüft werden. Generelle Hinweise zur Prüfung der Ebenheit gibt Ertl (2019).

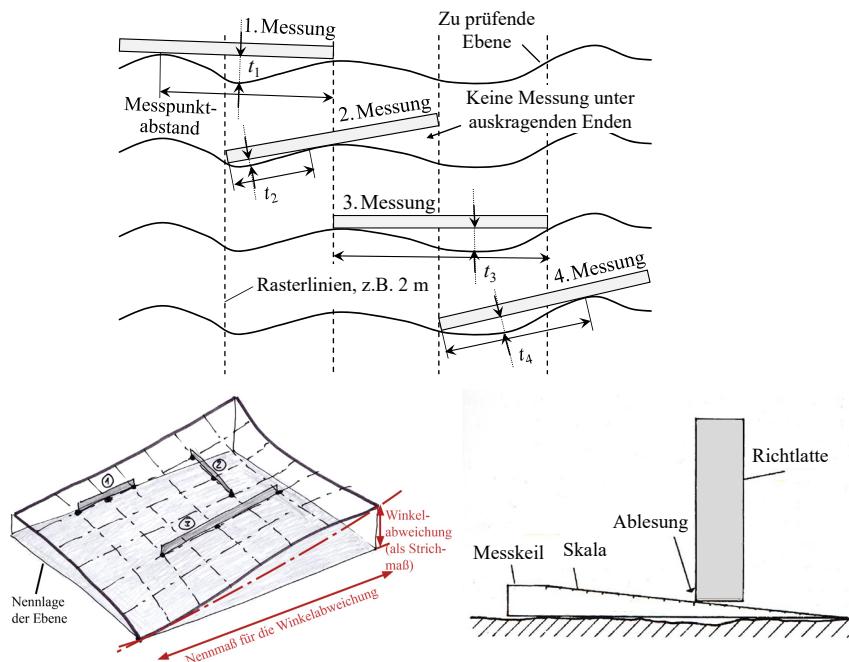
Im Allgemeinen ist die Ebenheitsprüfung nur stichprobenartig zu leisten, jedoch sind die Istabweichungen einer Fläche möglichst treffend zu beschreiben. Entscheidend für eine Bewertung sind die jeweiligen Maximalwerte, bezogen auf die Messpunktabstände in den kritischen Bereichen der zu prüfenden

Tab. 1: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen (Auszug Tab. 3, DIN 18202, 2019)

Bezug	Stichmaß [mm] als Grenzwerte bei Messpunktabständen [m] bis				
	0,1	1	4	10	15
Flächenfertige Böden, z. B. Estriche, Beläge	2	4	10	12	15
Flächenfertige Böden, erhöhte Anforderungen	1	3	9	12	15

Fläche. Das Vorgehen mit einer Richtlatte illustriert die Abb. 6. Messungen unter den auskragenden Enden der Richtlatte sind nicht zulässig. Die Richtlatte wird zur Prüfung weder lot- noch waagerecht ausgerichtet, da dies zu Überlagerungen mit einer etwaigen Winkelabweichung einer Fläche führt. Vor der Prüfung ist auf der Fläche ein Raster zu markieren. Die Betrachtung der Ebenheitsabweichung bezieht sich immer auf den Verlauf einer Fläche innerhalb ihrer Ränder, unabhängig von deren Lage im Bezugssystem der Baumaßnahme.

Bei lotbezogenen Messungen zur Prüfung der Ebenheit einer Fläche müssen rechnerisch Neigungen und Schiefstellungen, die als Winkelabweichungen zu

**Abb. 6:** Prüfung auf Ebenheit mit einer Richtlatte (siehe KOMZET BAU 2012)

bewerten sind, abgespalten werden, bevor eine Aussage zur Ebenheit gemacht werden kann: Das Stichmaß ist hier, außer bei horizontalen Böden und Decken sowie bei vertikalen Wänden, nicht rechtwinklig zum Messpunktabstand. Beim Flächennivellement wird die Höhenlage der zu prüfenden Fläche bezogen auf den Nivellierhorizont in den zuvor gekennzeichneten Rasterpunkten gemessen, siehe Abb. 7 links mit den Rasterpunkten P_1 und P_2 . Für einen beliebigen Abstand eines Punktes P_3 zu seinen nivellierte Nachbarpunkten P_1 und P_2 gilt bei linearer Interpolation für das Stichmaß bezogen auf den Nivellierhorizont

$$t_3 = H_3 - H_1 + (H_1 - H_2) \frac{\overline{P_1 P_3}}{\overline{P_1 P_2}}. \quad (8)$$

Man erhält für die Varianz eines Stichmaßes

$$\sigma_t^2 = \sigma_H^2 \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T \quad \text{mit} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \overline{P_1 P_3} & -\overline{P_1 P_3} & 1 \\ \overline{P_1 P_2} & \overline{P_1 P_2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

wenn σ_H die Standardabweichung eines Seitenblicks bezeichnet. Damit gilt für jedes Stichmaß $\sigma_t \leq \sqrt{2} \cdot \sigma_H$ bzw. bei Mittenlage des Punktes P_3 ergibt sich $\sigma_t = \sqrt{1,5} \cdot \sigma_H$. Justierzustand des Nivelliers beziehungsweise Rotationslasers sowie Aufsetzmöglichkeit der Nivellierlatte auf die Fläche bestimmen maßgeblich, welche Genauigkeit (im Sinne einer Messunsicherheit) für einen Seitenblick erreicht werden kann, realistische Werte bei Präzisionsmessungen sind $\sigma_H \approx 0,2 - 0,3$ mm. Bei einem zulässigen $t = 3$ mm wie in Tab. 1 bei flächenfertigen Böden mit erhöhten Anforderungen und einem Messpunktabstand bis 1 m, bedeutet dies, dass eine Relation $V = 0,09 - 0,14$ eingehalten werden

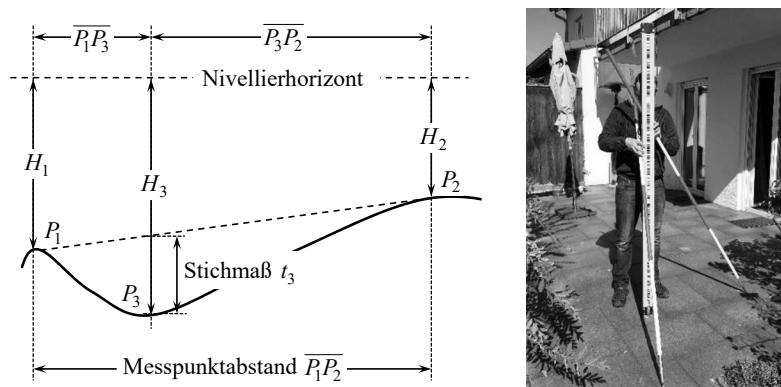


Abb. 7: Bestimmung eines Stichmaßes durch Interpolation beim Nivellement

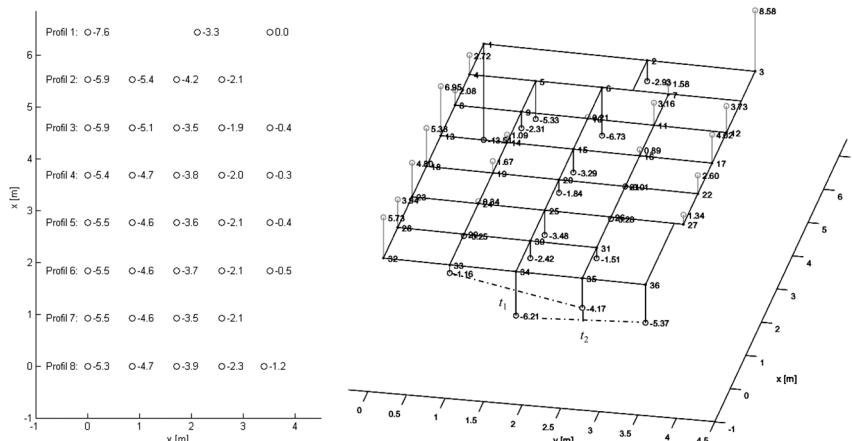
Tab. 2: Ebenheitsanforderungen bei Pflasterdecken und -belägen (Auszug Tab. 5, DIN 18318, 2019)

Nutzungsabgrenzung nach der größten Verkehrsbelastung; hier begehbar	Neigung %	Ebenheitsanforderungen Stichmaß [mm] unter der	
		1 m-Latte 2 m-Latte 4 m-Latte	
Pflasterdecken und -beläge aus Pflastersteinen, Platten aus Beton, ...	$\geq 1,5$	≤ 3	≤ 5
	$< 2,0$		≤ 8

kann, vgl. (2). Bei Messpunktabständen bis 0,1 m wird man gewöhnlich anderweitig prüfen, z. B. mit einer Richtlatte.

Als Beispiel für die Anwendung eines Flächennivellement dient die Bestimmung von Gefälle und Ebenheit einer Terrasse. Kritisch war vor allem die Frage, ob das Mindestgefälle von 1,5 % eingehalten worden ist. Die Tab. 2 zeigt den Auszug aus der hier anzuwendenden DIN 18318 (2019) mit ihren Kriterien bezüglich Neigung und Ebenheit. Die Anordnung der Messpunkte erfolgte in einem Raster $0,9 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$ orientiert an den Fugen der Platten (Abb. 8 links). Aus einer Auswertung einzelner Profile ergibt sich eine konkave Krümmung der Fläche.

Die Trennung von Ebenheits- und Winkelabweichungen ist zu leisten, wenn man mit einer Regressionsebene (Niemeier 2008) die zu prüfende Fläche approximiert und dies von den Stichmaßen aus dem Flächennivellement abspaltet. Mit den Residuen u_i ergeben sich unmittelbar die Größen zur Beschreibung der Abweichungen von der Ebene (siehe hier Abb. 8 rechts) und die ermittelten

**Abb. 8:** Flächennivellement (links) und Regressionsebene (rechts) einer Terrasse

Regressionsparameter b_1 und b_2 beinhalten Aussagen zu den Neigungen und damit den gesuchten Winkelabweichungen gegenüber der Horizontalen. Der Regressionsansatz für n nivellierte Punkte P_i lautet:

$$\begin{aligned} \text{Funkt. Modell: } H_i &= b_0 + Y_i \cdot b_1 + X_i \cdot b_2 + u_i \quad ; \quad i = 1, \dots, n \\ \text{Stoch. Modell: } \Sigma_{HH} &= \sigma_H^2 \cdot \mathbf{I} \end{aligned} \quad (10)$$

mit dem Minimierungsziel $\sum_{i=1}^n u_i^2 \Rightarrow \min$. Für das Beispiel ergibt sich:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,3899 \text{ m} \\ -0,0153 \\ 0,0006 \end{bmatrix} \stackrel{\Delta}{=} \begin{array}{l} -1,53 \% \text{ in } y\text{-Richtung} \\ +0,06 \% \text{ in } x\text{-Richtung} \end{array} \quad \begin{bmatrix} s_{b0} \\ s_{b1} \\ s_{b2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5 \text{ mm} \\ 0,06 \% \\ 0,04 \% \end{bmatrix} \quad (11)$$

Für das Gesamtgefälle in y -Richtung mit $1,53 \%$ und $s_{b1} = 0,06 \%$ resultiert kein signifikanter Hinweis, dass das geforderte Mindestgefälle nicht eingehalten worden ist (siehe Fall 3, Abb. 3). Beschränkt man sich auf eine Betrachtung von der Mitte der Terrasse ausgehend, ist jedoch das Mindestgefälle aufgrund der konkaven Krümmung nicht eingehalten. Anhand der Verteilung der Residuen in Abb. 8 rechts ist ohnehin zu erkennen, dass diese Krümmung die Ebenenausgleichung stark beeinflusst. Exemplarisch sind zwei Stichmaße t_1 und t_2 bezüglich der Regressionsebene eingetragen sowie in (12) daneben auch für einen Messpunktabstand von 3,6 m das Stichmaß bezogen auf die Punkte 32-34-36 berechnet. Hier zeigt sich, dass die Anforderungen an die Ebenheit nach DIN 18318 eingehalten worden sind.

$$\begin{aligned} t_1 \quad (\text{Punkte 33-34-35}): \quad 6,21 - 2,66 \text{ mm} &= +3,55 \text{ mm} \\ t_2 \quad (\text{Punkte 34-35-36}): \quad 4,17 - 5,79 \text{ mm} &= -1,62 \text{ mm} \\ (\text{Punkte 32-34-36}): \quad 6,21 + 0,36 \text{ mm} &= +6,57 \text{ mm} \end{aligned} \quad (12)$$

Bei einer Auswertung eines Flächennivellements unter Verwendung einer Regressionsebene ist zu beachten:

- einfacher Ansatz, um Horizontalität und Ebenheit einer Fläche zu trennen und einzeln zu bewerten,
- nur bei kleinen Neigungen ein zulässiger Ansatz, da die Residuen u_i in H -Richtung bestimmt werden und daher nicht orthogonal zu einer geneigten Ebene sind,
- das Raster braucht nicht gleichmäßig zu sein, für eine systematische Prüfung der Stichmaße ist dies aber von Vorteil,

- die Koordinaten Y_i und X_i der Punkte P_i gehen als fehlerfrei in die Berechnung ein,
- die Ermittlung von Stichmaßen in sämtlichen Kombinationen des Rasters ist rechnerisch gegeben.

Ist z. B. die Ebenheit einer Rampe zu untersuchen, tritt eine Auswertung mit einer Regressionsebene an Grenzen, da die lotrechten Residuen von den Stichmaßen rechtwinklig zur geneigten Fläche abweichen. Hier bietet eine Ebenenausgleichung im Gauß-Helmert-Modell, bei der auch die stochastische Information der Lagekoordinaten berücksichtigt werden kann, die Möglichkeit, die Stichmaße korrekt zu ermitteln.

8 Nutzung des terrestrischen Laserscanings

Die grundsätzliche Eignung des terrestrischen Laserscanings (TLS) für baugeometrische Kontrollen steht außer Frage. Von Vorteil ist insbesondere die flächenhafte Erfassung auch unzugänglicher Bereiche, sofern die Sichtmöglichkeiten gegeben sind. Bei der Toleranzprüfung von Maßen, Winkeln und Abweichungen aus der Flucht wird man im Regelfall Schnitte durch eine Punktwolke legen und in diesen die konstruktiven Bauteile, z. B. die Stützen, anhand geometrischer Primitive modellieren. Unsagbarer Vorteil des TLS sind die vielfältigen Möglichkeiten der Visualisierung der aufgenommenen Baugeometrie, wie sie auch für die Dokumentation einer Toleranzprüfung herangezogen werden können. Exemplarisch für solche Möglichkeiten zeigt die Abb. 9 die Bestimmung von Schiefstellungen von Säulen und Außenwänden bei einem Bestandsbauwerk in einem Aufriss.

Für die Toleranzprüfung von Abweichungen von der Ebenheit gerät das TLS, was die erreichbare Messgenauigkeit belangt, an seine Grenzen. Jedoch ist es sehr bequem möglich, in einem beliebig zu legenden Raster durch eine aufgenommene Fläche mit einer „virtuellen Richtlatte“ frei wählbarer Länge die orthogonalen Abstände, d. h. die Stichmaße zur jeweiligen Bezugslinie, zu bestimmen. Somit ist das nachvollziehbare Auffinden von Maximalwerten in den verschiedenen Kombinationen von Messpunktabständen, siehe Tab. 1, am Auswerterechner gegeben.

Der erforderliche Stichprobenumfang der Prüfung, um die Istabweichungen einer Fläche möglichst treffend zu beschreiben, ergibt sich im Angesicht der gelegten Schnitte durch die Fläche und den so identifizierbaren kritischen Bereichen während der Auswertung. Die Approximation einer Fläche als ausgeglückene Ebene, um Ebenheits- und Winkelabweichungen differenzieren zu können, gehört beim TLS zu den verfügbaren Standardgeometrien der Aus-

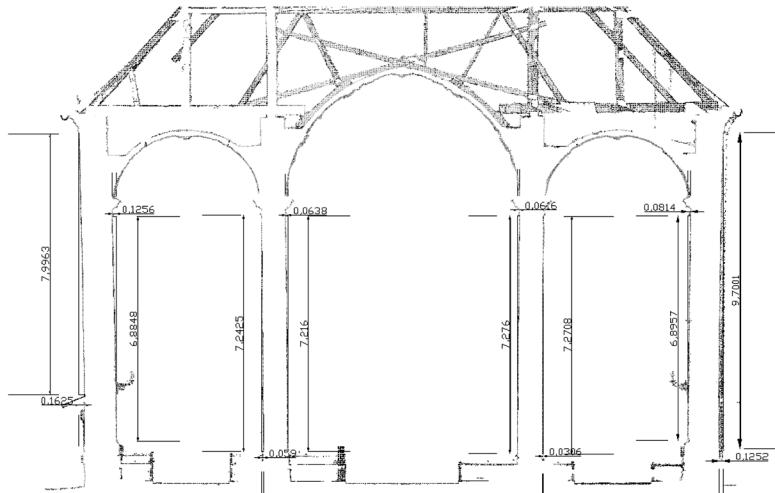


Abb. 9: Schiefstellung von Wänden und Säulen bei einem Bestandsbauwerk

wertesoftware. Die Protokollierung der erreichten Genauigkeit gestaltet sich bei dem komplexen Messsystem TLS schwieriger als bei der Tachymetrie und dem Nivellement, so dass hier pauschalierte Betrachtungen heranzuziehen sind. Im Allgemeinen geben die gängigen TLS-Programme keine Genauigkeitsaussagen zu den gescannten Punkten und zu abgeleiteten Größen wie Spannmaßen oder Winkeln. An dieser Stelle ist es für den Prüfenden wichtig, die Güte und Repräsentativität der gescannten Punkte, die zur Bestimmung der Istmaße und damit den Maßabweichungen herangezogen werden, aus Wissen und Erfahrung einzuschätzen; zumal er ja letztlich auch für seine Entscheidung entsprechend der Abb. 3 haftet.

9 Toleranzprüfung vs. BIM LOD 500 und LOA

Der Level of Development (LOD) bei einem BIM-unterstützten Bauvorhaben setzt sich aus dem Level of Geometry (LOG) und dem Level of Information (LOI), den semantischen Informationen eines Bauteils zusammen. Als Stufe LOD 500 wird die As-built-Kontrolle eines Bauteils verstanden: Das Modellelement wurde auf der Baustelle hinsichtlich Größe, Abmessungen, Form, Position und Orientierung überprüft (Borrmann et al. 2015). Durch die Einführung des Boxprinzips bei der letztmaligen Fortführung der DIN 18202 ergeben sich hier die Bezüge, auch 3D-Körper in die Toleranzvorgaben und -prüfungen einzubeziehen.

Mit dem Level of Accuracy (LOA 10 bis LOA 50) des Specification Guide des U.S. Institute of Building Documentation (2016) – der explizit Bezug nimmt auf die DIN 18710 (2010), u. a. bezüglich der Relation V (2) – existiert eine Metrik, die Genauigkeitsvorgaben für die Messung (via Laserscanning) und das daraus abgeleitete Bauwerksmodell beinhaltet (Clemen 2019). Vergleicht man jedoch diese Spezifikationen bzw. Anforderungen mit denen durch DIN 18202 (2019) in der Baupraxis etablierten Kriterien für die herzustellende baugeometrische Qualität, sind Unterschiede unverkennbar, zumal der genannte Guide keine konkreten Merkmale wie Winkligkeit oder Ebenheit unterscheidet, wie dies in den Tabellen der DIN 18202 stringent vorgegeben wird. Letztlich bedeutet dies, dass einer zu treffenden Beschaffenheitsvereinbarung (etwa in Form des BIM Abwicklungsplanes BAP), die auch die Nennung vereinbarter Normen und Richtlinien einbezieht, noch mehr Bedeutung zukommen wird, um etwaige Streitigkeiten über den geschuldeten Standard einer Baugeometrie zu vermeiden.

Ein wesentliches Ziel der BIM-Methodik ist es, Medienbrüche zu vermeiden – planerisch, terminlich und eben auch geometrisch. Die laufende Baufortschrittskontrolle ist Bestandteil dieser Methodik. Was die Prüfung hergestellter Bauteile betrifft, wird damit ein Vorgehen ex ante praktiziert. Das bisher bei der Toleranzprüfung übliche Vorgehen ist ex post, findet also erst bei Einforderung durch eine Partei nach erbrachter Leistung eines anderen statt.

10 Zusammenfassung

Die in DIN 18202 (2019) angegebenen Toleranzen sind im Bereich Hochbau anzuwenden, soweit nicht andere Genauigkeiten zur Bauausführung vertraglich vereinbart werden. Sie geben einen Rahmen für die handwerkliche Sorgfalt der Ausführung an, ohne aber alle Anwendungsfälle vollständig abdecken zu können. Die Eignung eines Messverfahrens zur Toleranzprüfung ist wesentlich von der erreichbaren Genauigkeit der zu bestimmenden Istmaße abhängig. Es kann gezeigt werden, dass die mittels Tachymetrie, Nivellement und Laserscanning zu gewährleistenden Genauigkeiten im Allgemeinen ausreichend sind, um Prüfungen nach den Vorgaben der DIN 18202 durchzuführen. Dabei ist es wichtig, die Aussagen so bereitzustellen, wie es der Systematik der Toleranzarten dieser Norm entspricht.

Vorteile des Einsatzes geodätischer Messverfahren bei der Toleranzprüfung bezüglich Attraktivität und Akzeptanz sind:

- Alternative für händische Verfahren, sobald die Nennmaße Beträge haben, die ein Arbeiten z. B. mit einer Richtlatte unzweckmäßig machen,
- baustellengeeignete, robuste Messgeräte,

- Flexibilität bei der Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten,
- kurze Messzeiträume und geringe logistische Voraussetzungen, um das sonstige Baugeschehen wenig zu behindern,
- zeitnahe Vorhalten der Ergebnisse, gegebenenfalls noch auf der Baustelle,
- digitaler Datenfluss und nachvollziehbare Dokumentation von (Ver)-Messung und Auswertung sowie
- das Liefern von Aussagen, wie diese nach den Vorgaben insbesondere der DIN 18202 verlangt werden, sowie die effiziente Möglichkeit zur Prozessintegration in das Baugeschehen: „Maßkontrollen sollten als fortlaufende vollständige Dokumentation während des Bauablaufs aufgezeichnet werden“ (Ertl 2019).

Berührungslose Messverfahren, wie durch die reflektorlose Distanzmessung bei der Tachymetrie und dem Laserscanning gegeben, erlauben die Erfassung von Objektbereichen, wo eine Maßkontrolle mit konventionellem Vorgehen Gerüstbau oder Hubwagen verlangen würde, z. B. bei Fassaden und Decken. Dennoch werden gegenwärtig in der Baupraxis die Potenziale geodätischer Messverfahren bei der Prüfung von Toleranzen noch nicht so genutzt, wie es sich nach deren Eignung aufdrängt. Bei Toleranzprüfungen im kleinräumigen Bereich bis ca. 3 m wird man für gewöhnlich auch zukünftig andere, konventionelle Messmittel in der Baupraxis verwenden.

Unter Beachtung einer etablierten Relation V gemäß (2), wie sie z. B. auch in DIN 18710-1 (2010) zu finden ist, sind die mittels Tachymetrie, Nivellement und TLS zu gewährleistenden Genauigkeiten bei der Bestimmung der jeweiligen Istmaße für die Toleranzprüfung im Allgemeinen ausreichend, zumindest teilweise wird sogar eine Relation $V \approx 0,1$ erreicht. Diese Aussage gilt allerdings nur, wenn verfälschende systematische Effekte bei den Messungen vermieden und die Messpunkte repräsentativ im Hinblick auf die Bestimmung der Istmaße gewählt werden. Unübersehbare Vorteile gegenüber händischen Verfahren sind in jedem Falle zu konstatieren.

Ein digitaler Datenfluss erlaubt es bei den genannten Messverfahren, die vollständigen Messergebnisse so bereitzustellen, wie es die Systematik der Toleranzarten der DIN 18202 verlangt, die Dokumentation der Vermessung unmittelbar sicherzustellen und die Auswertung jederzeit nachvollziehbar zu machen. Zu erstellende On-Board-Programme, die die Kovarianzfortpflanzung beziehungsweise auch weitergehende Möglichkeiten durch die Ausgleichungsrechnung integrieren, erlauben die unmittelbare Protokollierung in der jeweiligen Messkonfiguration und der erzielten Ergebnisse noch auf der Baustelle.

Literatur

- Bayerlein, W. (2008): Zur Bedeutung von technischen Normen. Der Sachverständige, Beck Online, Heft 3.
- BFR (Hrsg.: BMI) (2021): Baufachliche Richtlinien Gebäudebestandsdokumentation. Vorgaben für die Gebäudebestandsdokumentation auf den Liegenschaften des Bundes.
- Borrmann, A., et al. (2015): Building Information Modeling – Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Springer Vieweg, ISBN 978-658-05605-6.
- Clemen, C. (2019): Standards für die Qualitätssicherung mit der BIM-Methode. In: DVW e. V. (Hrsg.): In: Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren. DVW-Schriftenreihe, Band 95, Wißner-Verlag, Augsburg, 47–60.
- DIN 18202 (2019): Toleranzen im Hochbau. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18318 (2019): VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen, Pflasterdecken und Plattenbeläge, Einfassungen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18710-1 (2010): Ingenieurvermessung – Allgemeine Anforderungen. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 18710-2 (2010): Ingenieurvermessung – Aufnahme. Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN V ENV 13005 (1999): Leitfaden zur Bestimmung der Unsicherheit beim Messen. Beuth Verlag, Berlin.
- Ertl, R. (2019): Toleranzen im Hochbau. Kommentar zur DIN 18202. Zulässige Maßabweichungen im Roh- und Ausbau. Verlag R. Müller, 4. Auflage, ISBN 978-3-481-03701-7.
- Heunecke, O. (2014): Eignung geodätischer Messverfahren zur Maßkontrolle im Hochbau. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2014, 241–251. DOI: [10.12902/zfv-0021-2014](https://doi.org/10.12902/zfv-0021-2014).
- Kinzer, C., Remke, J. (1999): Maßtoleranzen – Normen und Praxis. In: Beratende Ingenieure, Nov./Dez. '99, 43–46, Springer-VDI-Verlag.
- KOMZET BAU (Hrsg.) (2012): Maßtoleranzen nach DIN 18202 und DIN 18203-3. Kompetenzzentrum der Bauwirtschaft Bühl. www.komzetbau-buehl.de.
- Kuhlmann, H., Hesse, C., Holst, C. (2017): DVW-Merkblatt 12-2017, Standardabweichung vs. Toleranz. DVW (Hrsg.). [dvw.de/veroeffentlichungen/merkblaetter](http://www.dvw.de/veroeffentlichungen/merkblaetter).
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichungsrechnung. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Walter de Gruyter, Berlin New York. ISBN 978-3-11-019055-7.
- VOB/A: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen, Fassung 2019. Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen. <http://dejure.org/gesetze/VOB-A>, letzter Zugriff 02/2022.
- VOB/B: Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen, Fassung 2016. Deutscher Vergabe- und Vertragsausschuss für Bauleistungen. <http://dejure.org/gesetze/VOB-B>, letzter Zugriff 02/2022.

Kontakt

Otto Heunecke

Institut für Geodäsie, Universität der Bundeswehr München

Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

otto.heunecke@unibw.de

Session 4: QS Projekte und Ausblick

Brückeninspektion: Datenerfassung, -prozessierung und -analyse – Ein moderner Ansatz in der Qualitätssicherung

Gerald Fuxjäger

Zusammenfassung

Brückeninspektionen haben nach österreichischen normativen Vorgaben spätestens alle sechs Jahre zu erfolgen. Bei Brückeninspektionen steht nach wie vor die subjektive Bewertung des Sachverständigen (SV) im Vordergrund.

Durch sensorbasierte Datenaufnahmen, terrestrisch- oder drohnengestützt, einhergehende Anwendung navigationsspezifischer und photogrammetrischer Methoden, weitgehend automatisierter Triangulation und darauf basierter Anfertigung eines Digital Twin sowie Schadensdetektion mittels künstlicher Intelligenz (KI) und automatisiertem Reporting als Cloud Service soll der Sachverständige (SV) entsprechend unterstützt und die Inspektionsbefundung objektiviert werden. Nachvollziehbare Ergebnisse der maschinellen Zustandsbewertung können somit in das Asset Management der Infrastrukturbetreiber einfließen. Besondere Herausforderungen stellen die Navigation, die erforderliche Bildqualität und die Zuverlässigkeit der KI-Ergebnisse dar.

1 Modernisierungsbedarf

1.1 Instandhaltungsvorgaben

Gemäß den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS), festgehalten in der RVS-Reihe 13.03.xx, sind Brücken und andere Ingenieurbauten (FSV 2012) alle vier Monate zu überwachen, alle zwei Jahre zu kontrollieren und spätestens alle sechs Jahre zu prüfen (FSV 2011). Ziel der regelmäßigen bau-technischen Begutachtung ist die laufende Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Verkehrssicherheit entsprechender Konstruktionen. Durch periodische Erhebung, Dokumentation und Bewertung des Erhaltungszustands von Brücken und ähnlichen Ingenieurbauwerken sind Mängel und allfällig eingetretene Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu beheben, bevor ein größerer wirtschaftlicher Schaden eintritt bzw. die Zuverlässigkeit und/oder die Verkehrssicherheit

beeinträchtigt wird. Im Rahmen der Prüfung von Brücken und artverwandten Kunstbauten sind von einem sachkundigen Ingenieur mit einschlägiger Erfahrung Mängel und Schäden, die Einfluss auf die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks haben, festzustellen, zu dokumentieren und zu beurteilen. Zu den dabei qualitativ als auch quantitativ festzuhalrenden Mängeln und Schäden zählen dabei unter anderem Hohlstellen, Verschmutzungen, Bemoosungen, auffällige Verformungen, Risse, Roststellen, Korrosion der Bewehrung, freiliegende Bewehrung und Abplatzungen.

1.2 Traditionelle Inspektionspraktiken

In der Regel wird der Erhaltungszustand bzw. die Funktionstüchtigkeit einer Brücke durch zwangsläufige im Freien stattfindende Sicht- und gegebenenfalls Klopfprüfungen unter Verwendung besonderer Rüstungen und Geräte festgestellt.



Abb. 1: Brückeninspektionsgerät

Hierfür begeben sich sachkundige Inspektoren nach Bewerkstelligung erforderlicher Verkehrsabsicherungen meist auf temporäre Baugerüste oder – um die Sicherheit des entsprechend geschulten und erfahrenen Fachpersonals zu erhöhen – auf fahrbare Brückenuntersichtgeräte (d.s. auf einem LKW montierte, vertikal ausfahrbare und horizontal schwenkbare Plattformen) und untersuchen die Brückenoberfläche auf kurzen Entfernung visuell unter Zuhilfenahme einfacher Mittel wie Zollstock, Risslupe oder

Rissmaßstab und Hammer (Seim 2018). Zu Dokumentationszwecken werden die Schäden abfotografiert, deren Verortung skizzenhaft und deren Ausdehnungen quantitativ festgehalten, bevor sie schließlich einer Bewertung seitens des SV unterzogen werden. Damit sind herkömmliche Zugangstechniken und handnahe Inspektionspraktiken durch eine komplexe Logistik charakterisiert, mit einem hohen Risiko für Prüfer und Verkehrsteilnehmer verbunden und arbeits-, zeit- und kostenintensiv. Zudem erfolgt die Dokumentation, bedingt durch die ausschließliche Fokussierung auf Schäden, vorwiegend punktuell. Darüber hinaus ist die Zustandsbewertung zwangsläufig subjektiv und kaum nachvollziehbar sowie bei hohen Brückenbauwerken aufgrund der begrenzten Reichweite des Brückenuntersichtgerätes praktisch kaum vollständig durchführbar.

1.3 Schwerpunktverlagerung: Digitalisierung

Um den immensen Aufwand aus personeller, organisatorischer und finanzieller Sicht zu minimieren und gleichzeitig die mit den Inspektionsarbeiten verbundenen Sicherheitsrisiken von Prüfer und Verkehrsteilnehmer zu reduzieren, liegt es nahe, bereits bestehende digitale Lösungen, die in einem interdisziplinären Zusammenspiel an der Umsetzung der Optimierungsvorhaben beteiligt sind, geeignet miteinander zu verknüpfen und der Reihe nach einzusetzen. Im Folgenden wird eine bereits erfolgreich umgesetzte und in der Praxis abgedeckte Prozesskette der digitalisierten Bauwerksinspektion präsentiert. Sie erlaubt, den gesteigerten Einsatz von Brückenuntersichtgeräten zu reduzieren. Dadurch können ggf. notwendige Brückenbetriebseinschränkungen deutlich verkürzt, Dokumentationen unter Einbeziehung eines flächendeckenden Abbildes des gesamten Bauwerks ausgeweitet, Zustandsbeurteilungen objektiviert und für eine zuverlässige Zustandsvergleichbarkeit homogenisiert werden.

2 Brückeninspektion 4.0

Das Konzept der digitalisierten Brückeninspektion ist in drei aufeinanderfolgende Arbeitspakete gegliedert (vgl. Abb. 2). Diese umfassen (1) die vorwiegend luftgestützte Datenerfassung mittels eigens entwickeltem und auf die Brückeninspektionsbedürfnisse angepasstem Flugroboter, (2) die als Cloud Service verpackte dreiteilige Datenprozessierung samt softwareunabhängiger visueller Aufbereitung und tabellarischer Auflistung eruielter Zustandsdaten in einem web-basierten geografischen Informationssystem (WebGIS), sowie (3) die Bereitstellung vorklassifizierter bzw. vorkalkulierter Ergebnisse (automatisiertes reporting), zur kontrollierten Vervollständigung und Integration in bestehende Berichte seitens des SV.

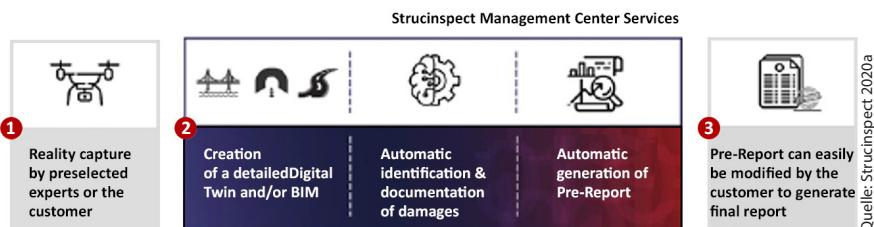


Abb. 2: Prozesskette digitalisierte Brückeninspektion – von der vollständigen Erfassung und Digitalisierung des Bauwerks bis hin zur objektivierten Bauwerksanalyse und Zustandsbeurteilung

2.1 Datenerfassung mittels maßgeschneiderter UAV

Die Herausforderungen zum konsequenten Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen, auch als UAV (engl. Unmanned Aerial Vehicle) bezeichnet, werfen diverse rechtliche, organisatorische und technische Fragen auf, wobei hier nur auf letztgenannten und da aktuell nur auf die RGB-Datenerfassung mit Kameras für die optische Prüfung eingegangen wird. Für eine effiziente Datenauswertung (siehe unten) müssen die Bildaufnahmen, die mittels Dronenbefliegung erzeugt werden, geometrische Kriterien erfüllen. So kann ein Digital Twin berechnen werden, der eine Schadensdetektion mittels KI ermöglicht. Dabei

müssen Kriterien der Bildqualität und radiometrische Größen beachtet werden. Die wesentlichen zugehörigen Vorgaben dazu sind eine GSD (Bildauflösung am Objekt) mit 0,5 mm/Pixel, eine ausreichende Überlappung der Bilder zueinander, eine sehr hohe Bildschärfe, geringstmögliches Bildrauschen und eine möglichst homogene Ausleuchtung. Die wichtigsten – meist behindernden – Randbedingungen sind die sichere Zugänglichkeit, die Vegetation in der unmittelbaren Umgebung, die Größe und Form des Objekts (der Brücke), die



Abb. 3: Maßgeschneiderte UAV für die Datenerfassung: „Scorpion L“

Verkehrsbehinderungen, die Lichtverhältnisse und die GNSS-Abschattungen. Daraus abgeleitet ergibt sich folgende Anforderung an die Dronenauswahl: möglichst großer Bildsensor auf möglichst kleiner Drohne, Aufnahmeabstand ca. 2 bis 5 m und eine sichere und effiziente Steuerungsmöglichkeit sowie eine adäquate Beleuchtung.

Die „Scorpion L“ (Abb. 3) ist ein unbemanntes Luftfahrzeug, ausgestattet mit einer Vollformatkamera und einer Beleuchtung mit einer Flugzeit von mehr als 10 Minuten. Mit einer Abmessung von unter 800 mm und einem Aufnahmeabstand von 2 bis 5 m ist das UAV perfekt für Aufnahmen unter Brücken und zwischen Baustrukturen geeignet. Das maximale Abfluggewicht beträgt unter 3,9 kg.

Zur Einhaltung der notwendigen GSD bekommt der UAV-Pilot durch eine LED-Beleuchtung die Information über den momentanen Aufnahmeabstand zum Objekt. Dank der Third-Person-Perspektive (siehe Abb. 4 und 5) kann der



← Abb. 4:

Die zum Flug notwendige FPV-Kamera sitzt am Ende der Drohne, um dem UAV-Piloten eine Third-Person-Perspektive zu erlauben.

↓ Abb. 5:

Third-Person-Perspektive aus der Sicht des steuernden UAV-Piloten



UAV-Pilot durch Sicht auf die Ausleger der Drohne Abstände einschätzen, um gefahrlos an Hindernissen vorbei zu manövrieren.

2.2 Photogrammetrische Datenverarbeitung

Die digitale Photogrammetrie ist als Überbegriff all jener berührungslosen Messmethoden und robusten Auswerteverfahren zu verstehen, mit denen die Lage, Form und optische Beschaffenheit von in digitalen Messbildern dargestellten Objekten rekonstruiert wird (Kraus 1994). Das Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung kann dabei die Form eines digitalen, photorealistischen Geometriemodells einnehmen, das in Informationssysteme einfießt – ein so genannter Digital Twin.

Ausgangspunkt zur weitgehend automatisierten, photogrammetrischen Erstellung eines digitalen Bauwerkszwilings stellt der Bildverband dar, bei dem es

sich um eine Vielzahl von sich bis zu 90 % überlappenden Bildern handelt, die von verschiedenen Standorten aus aufgenommene Objektpunkte der zu rekonstruierenden Bauwerksoberfläche in mindestens zwei Aufnahmen abbilden. Voraussetzung für die photogrammetrische Mehrbildauswertung ist die Bildorientierung, bei der die Aufnahmesituationen mathematisch rekonstruiert, d. h. die Positionen und Drehungen der Kamera bzw. der Bilder zu den Aufnahmezeitpunkten bestimmt werden. Die eigentliche Auswertung beruht auf dem Prinzip der Triangulation, bei der räumlich zu bestimmende Objektoberflächenpunkte zunächst individuell in mindestens zwei Bildern lokalisiert werden. In Verbindung mit den zugehörigen Orientierungsdaten der betroffenen Bilder können daraus in weiterer Folge korrespondierender Sehstrahlen rekonstruiert und für jeden der vielen Objektpunkte einzeln zum Schnitt gebracht werden. Das Ergebnis ist eine räumlich strukturierte, wenn auch unorganisierte und mit unscharfen Grenzen gekennzeichnete Menge von Punkten (Otepka et al. 2013), die als Diskreditierung der einzelnen Oberflächen der Bauwerkskomponenten zu verstehen ist. Die Punkte selbst sind dabei durch ihre dreidimensionalen, kartesischen Koordinaten in einem gemeinsamen Projektkoordinatensystem definiert. Die Einbindung des digitalen Zwillings in das übergeordnete Koordinatensystem geschieht für gewöhnlich über Passpunkte, die im Landeskoordinatensystem geodätisch eingemessen wurden, bzw. über RTK oder PPK der Aufnahmestandpunkte. Die georeferenzierte 3D-Punktwolke kann anschließend mathematisch durch geometrische Formen (beispielsweise durch eine Dreiecksvermaschung) approximiert bzw. interpoliert werden. Die so entstehenden mehrdimensionalen Bauwerksmodelle bzw. -hüllen können in einem abschließenden Schritt mit den Texturen der zugehörigen Bilder versehen werden, um ein detailreiches digitales Abbild der Realität darzustellen.

2.3 KI-unterstützte Musterkennung

Durch Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) werden Brückenschäden qualitativ (Schadenstyp) und quantitativ (Schadensintensität) klassifiziert (vgl. Abb. 6). Ein künstliches neuronales Netz (KNN) mit zahlreichen Schichten zwischen Ein- und Ausgabeschicht (mittels Deep Learning trainiert) sorgt dabei für eine automationsgestützte, schablonisierte Untersuchung. Dabei werden in den aufgenommenen Brückebildern optisch Schäden detektiert und klassifiziert. Einflussgrößen wie Verschmutzungen, vegetativer Befall, auffällige Verformungen, Risse, Roststellen, Korrosion der Bewehrung, freiliegende Bewehrung und Abplatzungen müssen entsprechend beachtet werden. Für das Trainieren der einzelnen Schadenstypen sind a) ausreichend Bilder – dies können tausende sein, die sowohl die allgemeinen, sich wiederholenden, als auch die konkreten

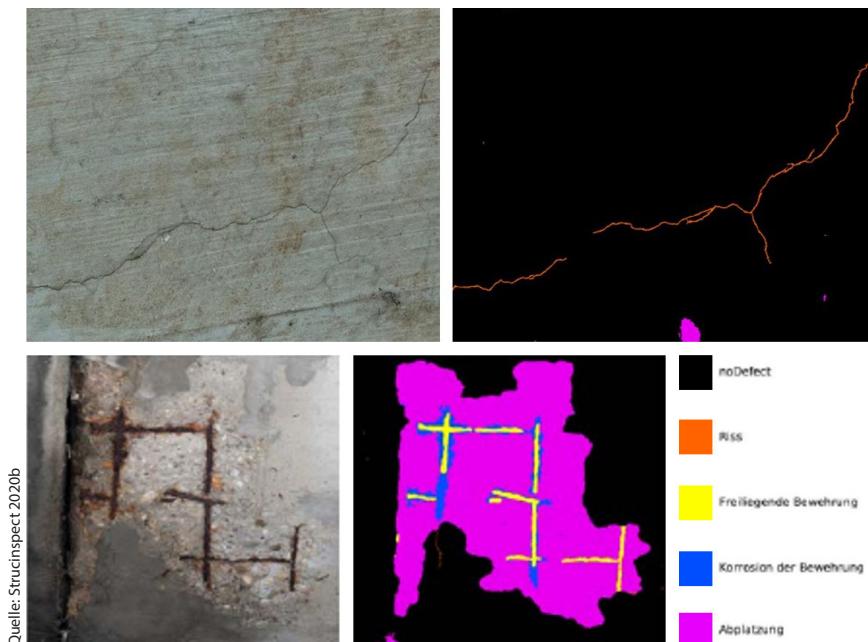


Abb. 6: KI-basierte Schadensdetektion und -extraktion: Darstellung unterschiedlicher Schadenstypen im Originalbild (links) und KI-gestützte, klassifizierte Segmentierung (rechts)

projektspezifischen Muster und Aufnahme- und Lichtverhältnisse repräsentieren sollen, und b) Experten, die die Schadensmuster fachlich korrekt manuell erfassen, notwendig. Nur dadurch kann die angestrebte False-Negative-Rate $\leq 0,5\%$ und False-Positive-Rate $\leq 10\%$ erreicht werden, zudem die in nachfolgenden Schritten notwendige Zusammenführung der detektierten Schäden aus mehreren Einzelbildern in jeweils einen eindeutigen zuordnenbaren Schaden.

2.4 Datenvisualisierung und -management

Die softwareunabhängige Verfügbarmachung der dynamischen Visualisierung des digitalen Zwillinges sowie der qualitativen als auch quantifizierten Schadensdokumentation erfolgt in einem web-basierten geografischen Informationssystem (WebGIS) via Einbettung eines Viewers zur dreidimensionalen Modellbetrachtung sowie einer datenbankgestützten tabellarischen Auflistung exakt verorteter Schäden mit Klassifizierungsdetails. Dadurch wird dem erfahrenen Bauingenieur die Möglichkeit einer ortsunabhängigen, augenscheinlichen

Bewertung geboten. Darüber hinaus sind dem Experten, der für die an die Vorklassifizierung anschließende Zuweisung von Zustandsnoten zuständig ist, strukturierte Archivierungs- und positionsbezogene Abfragemöglichkeiten hinsichtlich Brückenbestands- und -zustandsdaten gegeben. Zur Unterstützung des Bearbeiters bei der Berichterstellung verfügt das WebGIS zudem über einen Report Generator (siehe Abb. 7 und 8).



Abb. 7: Dreidimensionales Modell einer Brücke im WebGIS



Abb. 8: Georeferenzierte, durchnummerierte Bauwerksschäden dargestellt im WebGIS und auswählbar per Mausklick zur Weiterleitung zu korrespondierenden Klassifizierungsdetails

3 Zusammenfassung und Ausblick

Brücken und artverwandte Ingenieurbauten haben Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit sowie Verkehrssicherheit zu erfüllen. Sie sind daher in möglichst gleichmäßigen Zeitabständen, spätestens alle sechs Jahre, einer Inspektion zu unterziehen. Normative Regelwerke beschreiben diese insbesondere in Österreich und Deutschland seit Jahrzehnten und werden nicht zuletzt aufgrund der neuen digitalen Möglichkeiten in den nächsten Jahren überarbeitet. Traditionelle Brückenprüfungen mit dem Einsatz von Untersichtgeräten führen darüber hinaus zu massiven Verkehrseinschränkungen und Sicherheitsrisiken. Zudem sind sie subjektiv, kostenintensiv und schwer nachvollziehbar, womit nur schwierig verlässliche Aussagen zu Veränderungen der Bauwerkssicherheit und zur Kostenabschätzung von Sanierungen abgeleitet werden können. Vor diesem Hintergrund sind zur Ermöglichung vorbeugender Instandsetzungsmaßnahmen und die damit einhergehende laufende Gewährleistung zur sicheren Nutzbarkeit innovative Ansätze für Brückeninspektionen unter Einbeziehung von Technologien der Industrie 4.0 erforderlich. Durch nahtlose Kombination neuartiger Prozesse zur Datenerfassung (mittels maßgeschneiderter Drohnen als zentrale Sensorplattformen), zur Datenprozessierung (durch die Verwendung künstlicher Intelligenz zur automatisierten Detektion und Vorklassifizierung von Bauwerksschäden) sowie zur Datenanalyse (mithilfe der Visualisierung des photogrammetrisch erstellten digitalen Zwilling und die übersichtliche Darstellung in einem web-basierten geographischen Informationssystems) werden objektivierte und flächendeckende Zustandsinformationen erzeugt, Kosten für Verkehrssperren, Brückeninspektionsgeräte und Einrüstungen vermieden, sowie die Sicherheit und Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur und der damit verbundenen Versorgungssicherheit als auch die Minimierung der Verkehrsstörung bei Inspektionen sichergestellt. Aus technischer Sicht wird sich die Weiterentwicklung insbesondere auf den Bereich besserer automatisierbarer Datenerfassung konzentrieren, es werden weitere v.a. chemisch-physikalische Sensoren zur Erfassung z.B. der Chloridierung oder Karbonatisierungstiefe adaptiert werden, im Bereich der Datenverarbeitung werden auch künstliche Intelligenz und die notwendige Anbindung an Asset-, bzw. Infrastrukturmanagement an Bedeutung zunehmen.

Literatur

FSV (2011): RVS 13.03.11 Qualitätssicherung bauliche Erhaltung; Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten; Straßenbrücken. Ausgearbeitet von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr.

- FSV (2012): RVS/Mkbl 13.03.01 Qualitätssicherung bauliche Erhaltung; Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten; Monitoring von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Ausgearbeitet von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr.
- Kraus, K. (1994): Photogrammetrie, Band 1, Grundlagen und Standardverfahren. 5., durchgesehene und erweiterte Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- Otepka, J., Sajid, G., Waldhauser, C., Hochreiter, R., Pfeifer, N. (2013): Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. In: ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 2, no. 4, 1038–1065.
- Seim, W. (2018): Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- Strucinspect (2020a): Aivolution of Structural Inspection. <https://strucinspect.com/wp-0adb9-content/uploads/2019/09/Strucinspect-Folder-DE.pdf> (11.11.2020).
- Strucinspect (2020b): Information provided by strucinspect. Vienna.

Kontakt

DI Gerald Fuxjäger
ADP Rinner ZT GmbH
Münzgrabenstraße 4/1, 8010 Graz, Österreich
gerald.fuxjaeger@adp-rinner.at

Unsicherheiten beim TLS – Aspekte der Modellierung

Jens Hartmann | Jan Hartmann

1 Einleitung und Motivation

Im Laufe der letzten Jahre hat die Beurteilung von Messdaten bei geodätischen Messungen immer mehr an Bedeutung gewonnen, denn diese ist die Basis für einen Qualitätssicherungsprozess. Als wesentliche Zielstellung ist die Schaffung von Vertrauen in die eingesetzte Sensorik und das Messverfahren zu nennen. Anwendungsbeispiele gibt es viele, exemplarisch sind an dieser Stelle die Deformationsanalyse oder die industrielle Messtechnik genannt. Aufgrund seiner einfachen und effizienten Durchführung hat sich das terrestrische Laserscanning (TLS) in den letzten Jahrzehnten als eine Art Standardverfahren bei der 3D-Objekterfassung etabliert. Dies zeigt sich auch an der Vielzahl von entwickelten Messsystemen und Auswertealgorithmen. Je nach Durchführung, kann der Gesamtprozess sehr komplex werden, woraus abzuleiten ist, dass die Ermittlung der Gesamtunsicherheit (als wichtiges Qualitätsmaß) eine besondere Herausforderung darstellt. Nach einer kurzen Einleitung zum Thema Unsicherheiten sowie deren Quantifizierung und Fortpflanzung wird die Unsicherheitsmodellierung am Beispiel vom statischen und kinematischen TLS erläutert und anhand von Referenzdatensätzen validiert.

2 Methoden der Unsicherheitsfortpflanzung

Die Betrachtung von Unsicherheiten stellt ein wesentliches Themenfeld in der Geodäsie dar. Zentrale Aufgabe ist die Übertragung (Fortpflanzung) der Unsicherheiten von den Beobachtungen auf die zu bestimmenden Parameter. Im Rahmen einer klassischen Ausgleichung, z. B. in einem Gauß-Helmert-Modell (GHM) erfolgt die Quantifizierung der Unsicherheit der Beobachtungen mittels eines stochastischen Modells. Mittels Varianzfortpflanzung (VF), welche im Abschnitt 2.2 näher erläutert wird, wird dann die Unsicherheit der Beobachtungen auf die Zielgrößen (Parameter) fortgepflanzt. Die Unsicherheiten werden dabei i. d. R. mittels einer Standardabweichung charakterisiert, welche standardmäßig die Normalverteilung unterstellt. Da ein berechneter Mittelwert nicht mit dem wahren Wert zusammenfallen muss, kann die Standardabweichung nicht eins

zu eins als Qualitätsparameter für die Genauigkeit betrachtet werden. Wird die Standardabweichung als Parameter für die Präzision verwendet, werden mögliche systematische Abweichungen nicht mit betrachtet. In den letzten Jahren sind deren Bestimmung und der Umgang immer mehr in den Fokus gerückt. Dies ist nötig, da modernere Sensorik immer präzisere Messergebnisse liefert, was zur Folge hat, dass selbst kleinere systematische Abweichungen nicht mehr im Messrauschen untergehen.

Daher hat sich in den letzten Jahren eine weiterführende Herangehensweise bei der Spezifikation von Unsicherheiten entwickelt. Eine Darstellung erfolgt im Rahmen des Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), nach in JCGM 100 (2008). Der GUM definiert einen Standard für den Umgang mit Messunsicherheiten, welcher Allgemeingültigkeit besitzt und auch in der Geodäsie zunehmend mehr Anwendung findet. Nach dem GUM definiert sich der Begriff Genauigkeit als eine Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis einer Messung und dem wahren Wert einer Messgröße und gilt als qualitatives Konzept. Neben der reinen Messpräzision rückt auch die Richtigkeit und somit die systematischen Messabweichungen in den Fokus der Betrachtung. Systematischen Messabweichungen können in unbekannte bzw. nicht erfassbare, sowie in bekannte und beherrschbare Anteile unterschieden werden. Der vom GUM eingeführte Begriff der (Mess-)Unsicherheit u erlaubt eine Berücksichtigung der unbekannten, systematischen Messabweichungen. Definiert ist u als Parameter, der einem Messergebnis zugewiesen ist und angibt, welche Streuung der Werte dem Messergebnis vertretbar zugeordnet werden kann.

Die Bestimmung von u kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen.

1. Die Typ A-Evaluierung der Unsicherheit u_A beruht ausschließlich auf der statistischen Analyse einer Reihe von Beobachtungen. Dies kann bei Wiederholungsmessungen z. B. eine Standardabweichung sein. Zur Typ A-Evaluierung gehören auch die Varianz-Kovarianz-Matrizen (VKM) aus dem GHM oder dem Kalman-Filter, welche im späteren Verlauf des Beitrages aufgegriffen werden.
2. Typ B-Evaluierungen entsprechen allen Bewertungen außer statistischen Evaluierungen. Dazu gehören u. a. Wissen aus vorherigen Messdaten, Herstellerangaben oder Kalibrierprotokollen. Mittels der Typ B-Evaluierung ist es möglich den unbekannten, systematischen Messabweichungen einen zufälligen Charakter zu geben. Eine solche Vorgehensweise ist nur bei kleinen und unregelmäßig streuenden Effekten angebracht. Darüber hinaus ist es nach dem GUM möglich, nicht normalverteilte Größen in u_B zu modellieren.

Die Anteile werden nach der VF quadratisch aufaddiert:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (1)$$

Der Term u_c wird als kombinierte Standardunsicherheit bezeichnet und ist gebräuchlich, wenn die Standardunsicherheit einer Messgröße über mehrere Eingangsgrößen berechnet wird.

2.1 Darstellung der Einflussfaktoren für das TLS unterteilt in statisch und kinematisch

Die Gesamtunsicherheit beim TLS setzt sich aus verschiedenen Einflussgrößen zusammen, die sich sowohl auf die Messpräzision als auch auf die Richtigkeit (systematische Beeinflussung) auswirken können. In Abb. 1 sind die Einflussgrößen beim TLS in sechs wesentliche Kategorien unterteilt.

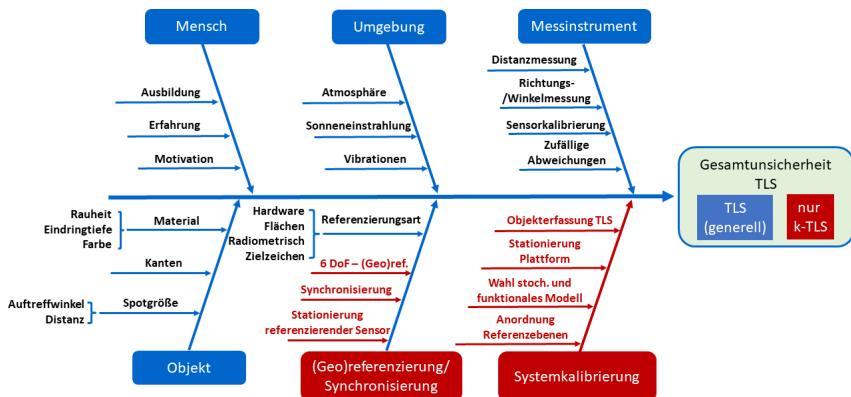


Abb. 1: Unsicherheitsfaktoren beim statischen TLS, ergänzt um spezifische Faktoren des kinematischen TLS (in rot)

Das Messinstrument und das Messobjekt sind bei der Unsicherheitsmodellierung von besonderem Interesse, da es hierbei nachweislich zu systematischen Abweichungen kommt.

Beim Messinstrument entstehen diese vorrangig durch die Unvollkommenheit der verbauten mechanischen und optischen Komponenten. Das Fehlermodell von Muralikrishnan et al. (2015) beschreibt im Zuge dessen 18 verschiedene instrumentelle Fehlerquellen und dient aktuellen Kalibrierungsansätzen als Grundlage (Holst et al. 2015, Medic et al. 2020).

Unsicherheiten durch das Messobjekt entstehen durch eine Vielzahl von Einflüssen, da die reflektorlose Distanzmessung stark von den Materialeigenschaften sowie von der geometrischen Konstellation der Aufnahme (Auf treffwinkel, Distanz) abhängig ist. Für verschiedene Objekteigenschaften wurde dies bei-

spielsweise von Schulz (2008) und Reshetnyuk (2006) gezeigt. Der Auftreffwinkel α ist definiert als Winkel zwischen dem Normalenvektor des Punktes und dem dazugehörigen Richtungsvektor ausgehend vom TLS. Bei flacher werdendem Auftreffwinkel nimmt die Spotgröße zu (siehe Abb. 2). Dementsprechend ist eine systematische Abweichung in der Distanzmessung zu erwarten. Juretzko (2004), Soudarissanane et al. (2009) und Zámečníková et al. (2014) verdeutlichten den Einfluss des Auftreffwinkels auf die TLS-Messung.

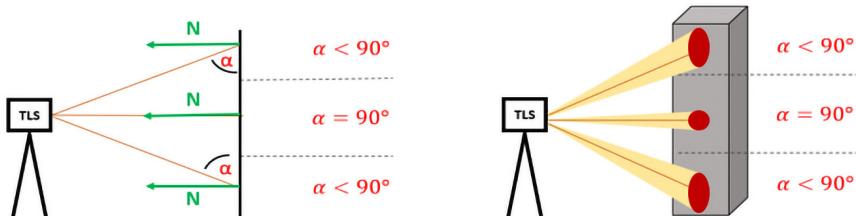


Abb. 2: Definition des Auftreffwinkels (links) und Spotgröße in Abhängigkeit des Auftreffwinkels (rechts)

3 Unsicherheitsmodellierung beim statischen TLS

Bei der Unsicherheitsmodellierung des statischen TLS (s-TLS) werden in diesem Beitrag neben den angegebenen Unsicherheiten des Sensorherstellers auch die rohen Intensitäten sowie die Unsicherheiten aus einer möglichen Referenzierung mit einbezogen. Durch VF aller genannten Unsicherheiten kann anschließend ein Qualitätsmaß für jeden Punkt in Form einer Präzision gegeben werden.

3.1 Lokale 3D-Präzision in Abhängigkeit der Intensität

Die beobachteten rohen Intensitätswerte I eines Laserscanners sind von einer Vielzahl der Objekteinflüsse aus Abb. 1 abhängig. Materialeigenschaften wie Rauheit und Farbe bestimmen wie viel Energie reflektiert wird. Zusätzlich wird bei steigender Distanz und sinkendem Auftreffwinkel weniger Energie reflektiert. Wujanz et al. (2017) zeigen, dass zwischen der Präzision der Distanzmessung u_d und den I der funktionale Zusammenhang

$$u_d = a \cdot I^b + c \quad (2)$$

besteht. Die einzelnen Parameter a , b und c sind dazu vorab im Rahmen von Kalibrierungsmessungen zu bestimmen.

3.1.1 Lokale 3D-Präzision durch Varianzfortpflanzung

Die polare TLS-Messung besteht aus zwei Winkeln (φ und θ) und einer Strecke d , die in kartesische Koordinaten überführt werden können.

$$x = d \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\varphi) \quad (3)$$

$$y = d \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi) \quad (4)$$

$$z = d \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

Durch VF der Unsicherheiten der polaren Messelemente ergibt sich die VKM der 3D-Koordinaten (X_L, Y_L, Z_L) aus

$$\Sigma_{X_L, Y_L, Z_L} = F \cdot \begin{bmatrix} u_\varphi^2 & 0 & 0 \\ 0 & u_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & u_d^2 \end{bmatrix} \cdot F^T. \quad (6)$$

Die Matrix F besteht aus den partiellen Ableitungen der Formeln (3) bis (5) nach den polaren Messelementen. Die Unsicherheiten der Winkelmessung u_φ und u_θ , werden in den meisten Fällen vom Hersteller spezifiziert und können dem Datenblatt entnommen werden (Typ B). Die Unsicherheit der Distanzmessung setzt sich aus der nach Gl. 3.1 abgeleiteten Präzision u_d und einer restlichen Systematik u_{syst} zusammen. Beide sind vom Typ B, da sie getrennt von der eigentlichen Messung bestimmt werden. Bei u_{syst} erfolgt dies z. B. durch den Hersteller im Rahmen einer Kalibrierung. Für u_d sind zunächst die Parameter aus Gl. 3.1 durch zusätzliche Messungen abzuleiten. Final ergibt sich die kombinierte Standardunsicherheit der Distanzmessung u_{d_c} aus

$$u_{d_c}^2 = \sqrt{u_d^2 + u_{syst}^2}. \quad (7)$$

Aus den Elementen der Hauptdiagonalen von Σ_{X_L, Y_L, Z_L} leitet sich schließlich der Helmertsche Punktfehler aus

$$u_{3D} = \sqrt{u_{X_L}^2 + u_{Y_L}^2 + u_{Z_L}^2} \quad (8)$$

ab. Dieser kann als Unsicherheit eines 3D-Punktes im lokalen Sensorkoordinatensystem L interpretiert werden.

3.1.2 Globale 3D-Präzision durch Varianzfortpflanzung

Die lokalen 3D-Punkte im Sensorskoordinatensystem $[X_L, Y_L, Z_L]^T$ können durch eine Helmert-Transformation in ein globales Koordinatensystem G überführt werden. Ein 3D-Punkt $[X_G, Y_G, Z_G]^T$ in G ergibt sich aus

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix} + R(\omega, \varphi, \kappa) \cdot \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} \cdot s. \quad (9)$$

Bei bekannter VKM der Transformationsparameter Σ_{Tr} (Typ B) bestehend aus je drei Translationen und Rotationen sowie einer Skalierung s , können die globalen 3D-Präzisionen über VF bestimmt werden. Es gilt

$$\Sigma_{X_G, Y_G, Z_G} = F \cdot \begin{bmatrix} \Sigma_{Tr} & 0 \\ 0 & \Sigma_{X_L, Y_L, Z_L} \end{bmatrix} \cdot F^T. \quad (10)$$

Über den Helmertschen Punktfehler kann ein Qualitätsmaß u_{3D_G} für jeden Punkt in G berechnet werden. Diese ergibt sich aus

$$u_{3D_G} = \sqrt{u_{X_G}^2 + u_{Y_G}^2 + u_{Z_G}^2}. \quad (11)$$

4 Validierung der modellierten 3D-Präzision für den Z+F Imager 5016

Zur Validierung der modellierten 3D-Präzisionen u_{3D_G} , wurde eine Referenzpunktewolke mit dem Leica LAS-XL in Kombination mit dem Leica AT960 LR aufgenommen. Die Unsicherheiten der Sensoren sind Tab. 1 zu entnehmen und liegen insgesamt unter den zu erwartenden Unsicherheiten des Z+F Imager 5016. Die Referenzpunktewolke befindet sich im HiTec Labor des Geodätischen Instituts Hannover (GIH) (Abb. 3). Zusätzlich zu den vorhandenen, wurden weitere Geometrien (Kugel, Ebenen, Freiformflächen) bestehend aus unterschiedlichen Materialien (Beton, Styropor, Keramik, ALUCORE®) platziert.

Die Messung mit dem Z+F Imager 5016 (Seriennr. 060) erfolgte unter denselben atmosphärischen Bedingungen wie bei der Referenzmessung. Die Messung wurde mit der Auflösung „Middle“ und der Scanqualität „quality+“ aufgenommen. Dadurch ergibt sich eine Punktanzahl von 330.000 auf den Messobjekten. Die Referenzierung des Scans in das Lasertracker Koordinatensystem erfolgte

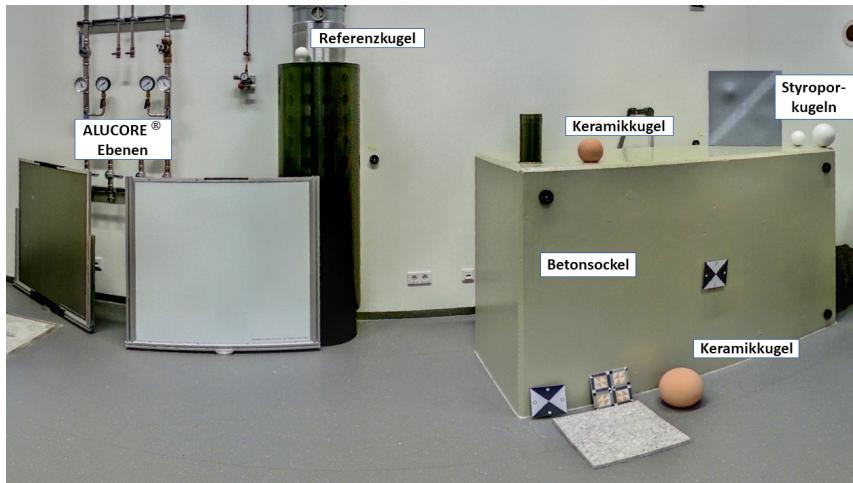


Abb. 3: HiTec Labor des GIH mit platzierten Objekten

Tab. 1: Unsicherheiten der verwendeten Sensoren

Sensor	Unsicherheit
Leica AT960 LR	$U_{X,Y,Z} = 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}$ [MPE]
Leica LAS XL	$U_p = 450 \mu\text{m}$ [2σ]
Z+F Imager 5016 (Seriennr. 060) aus Kalibrierprotokoll	$\text{Linearitätsfehler} = 0,43 \text{ mm}$ $u_\varphi = 0,0031^\circ$ [rms] $u_\theta = 0,0028^\circ$ [rms]

über Zielzeichen mit der Software Scantra (Technet GmbH), welche eine Standardunsicherheit für die Translation von 0,3 mm lieferte.

4.1 Vorwärtsmodellierung der Gesamtunsicherheit

Die Vorwärtsmodellierung des s-TLS beinhaltet die Berechnungsschritte aus dem Abschnitt 3. Die Klassifizierung nach GUM aller einbezogenen Unsicherheitsquellen kann Tab. 2 entnommen werden. Die Objekterfassung setzt sich aus den Winkelunsicherheiten aus dem Datenblatt (Typ B) und der Präzision der Distanzmessung (Typ B) zusammen. Zusätzlich wird der Linearitätsfehler aus der Herstellerkalibrierung angebracht. Die Unsicherheiten der Georeferenzierung werden durch die VKM aus der Scantra-Lösung (Registrierungssoftware) fortgepflanzt.

Tab. 2: Klassifizierung der Unsicherheitsquellen beim s-TLS nach GUM

Teilschritt		nach GUM	Verteilungstyp
Objekterfassung (3D-Scan)	Winkelunsicherheit	Typ B	Normalverteilung
	Distanzunsicherheit	Typ B	Normalverteilung
	Linearitätsfehler	Typ B	Normalverteilung
Georeferenzierung	VKM	Typ A	Normalverteilung

Abb. 5 zeigt die resultierenden 3D-Präzisionen für den lokalen und globalen Bezug. Zusätzlich werden in Abb. 4 die rohen Intensitätswerte sowie die Auf treffwinkel der TLS-Messung dargestellt. Anhand dieser ist zu erkennen, dass flache Auf treffwinkel zu niedrigeren Intensitäten führen können. Sichtbar ist das zum Beispiel seitlich des Betonblocks. Weiterhin ist eine Winkelabhängigkeit an den Kugeln zu beobachten. Je flacher die Auf treffwinkel (siehe Randbereiche)

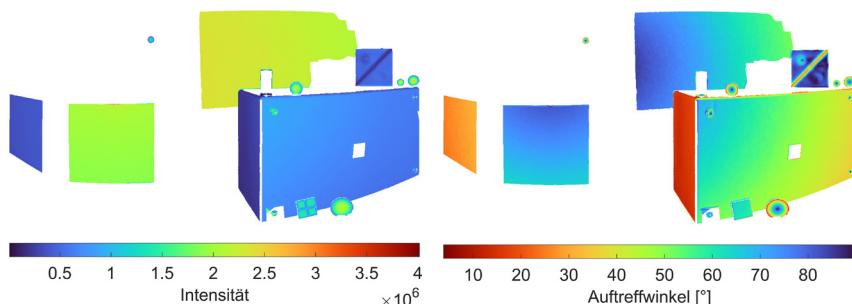


Abb. 4: Rohe Intensitätswerte der TLS-Messung (links) und berechnete Auf treffwinkel für die TLS-Punktfolge (rechts)

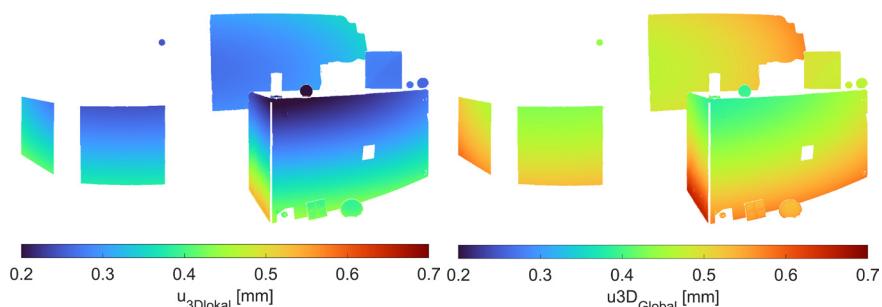


Abb. 5: Lokale 3D-Präzision (links) und globale 3D-Präzision (rechts)

desto kleiner sind die rohen Intensitäten. Die lokalen 3D-Präzisionen liegen in einem Wertebereich von 0,2 bis 0,6 mm und zeigen eine klare Abhängigkeit von den Intensitätswerten. Die größten Unsicherheiten sind an den Seiten des Betonblocks, wo auch die niedrigsten Intensitäten sind, vorzufinden. Zudem besitzt die Ebene ganz links im Bild höhere 3D-Präzisionen im Vergleich zu der Ebene direkt rechts daneben, was durch die Differenz in den jeweiligen Intensitäten begründet werden kann. Bezuglich der globalen 3D-Präzisionen ist dasselbe Muster wie bei den lokalen zu sehen. Die Werte erreichen hier eine Spanne von 0,4 bis 0,7 mm. Die leichte Erhöhung im Vergleich zur lokalen Betrachtung ist auf die zusätzlichen Unsicherheiten der Georeferenzierung zurückzuführen.

4.2 Vergleich mit Referenzumgebung

Es soll untersucht werden, inwiefern die modellierten Unsicherheiten aus Kapitel 4.1 mit der Referenzmessung übereinstimmen. Für diesen Vergleich wird die Python-Bibliothek open3d verwendet, mit der die gerichteten Distanzen zwischen s-TLS-Punktfolge und Referenz-Vermischung (Vermischung wird mit Cloud-Compare durchgeführt) berechnet werden können. Da die Referenzsensoren auch Unsicherheiten besitzen, werden diese gemäß GUM auf die globale 3D-Präzisionen fortgepflanzt

$$u_{Gesamt} = \sqrt{u_{3D_{global}}^2 + u_{LAS_{XL}}^2}. \quad (12)$$

Nachdem für jeden Punkt die Gesamtunsicherheit u_{Gesamt} und die Residuen zur Referenz vorliegen, kann die Differenz Δ zwischen beiden Größen berechnet werden. Dadurch kann beurteilt werden, inwiefern die modellierte Gesamtunsicherheit die Realität widerspiegelt.

$$\Delta = u_{Gesamt} - abs(Residuen) \quad (13)$$

Die Abb. 6 zeigt die Ergebnisse der Berechnung nach Gleichung (13). Dementsprechend bedeutet blau, dass die modellierte Gesamtunsicherheit größer ist als der Abstand zur Referenz. Im Gegensatz dazu bedeuten rote Bereiche, dass der Abstand zur Differenz größer ist als die Gesamtunsicherheit. Interessant sind vor allem die nummerierten Bereiche:

1. Referenzkugel: Die Differenz zwischen Gesamtunsicherheit und Residuen liegt bei knapp 4 mm. Bei fünf weiteren Referenzkugeln der gleichen Art die im Raum verteilt wurden, ist dieselbe Systematik zu beobachten.
2. ALUCORE® Ebene mit Auftreffwinkel < 35°: die Ebene weist größtenteils höhere Residuen als die Gesamtunsicherheit auf (~ 0,3 bis 1 mm)

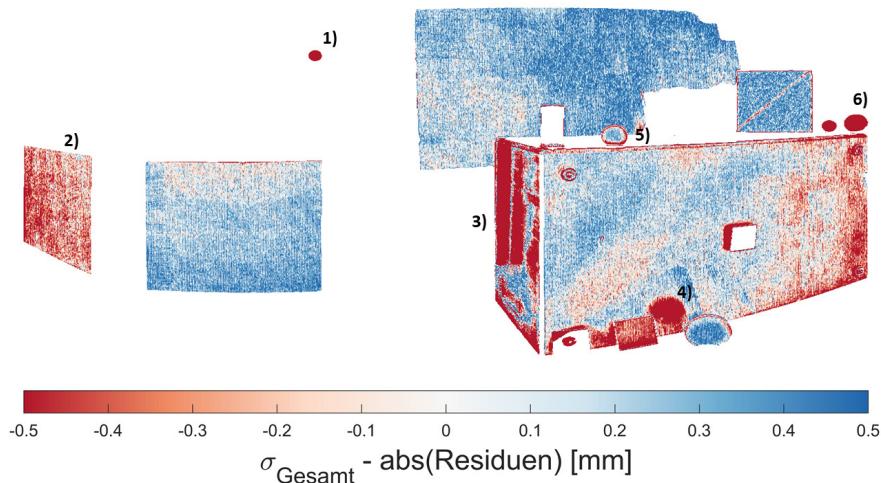


Abb. 6: Differenzen zwischen Gesamtunsicherheit und Residuen zur Referenzmessung

3. Linke Seite Betonsockel mit Auftreffwinkel < 25°: hohe Differenzen (~ 1 bis 8 mm). Hier liegen ungünstige Auftreffwinkel sowie eine spiegelnde Oberfläche vor.
4. Spiegelung Keramikkugel: In Abb. 4 ist eine Spiegelung der Keramikkugel auf der Fläche des dahinter liegenden Betonsockels zu beobachten. Genau an dieser Stelle weist die Gesamtunsicherheit Probleme auf (Differenz ~ 1,5 mm).
5. Ränder Keramikkugel: An den Rändern der Keramikkugel ist die Gesamtunsicherheit zu klein (Differenz ~ 1 mm)
6. Styroporkugeln: Systematik die nicht in der Gesamtunsicherheit berücksichtigt wird (Differenz ~ 4 mm große Kugel, ~ 6 mm kleine Kugel)

Anhand der berechneten Differenzen Δ ist zu resümieren, dass die modellierte Gesamtunsicherheit bestehend aus lokaler Präzision (TLS) und den Unsicherheiten der Referenzierung als durchaus realistisch anzusehen ist. Es ist jedoch auch festzustellen, dass es in den Bereichen, in welchen Systematiken auftreten zu größeren Abweichungen (bis zu 8 mm) zu den Referenzdaten kommt. Daraus sind diese für eine realistischere Modellierung mit zu betrachten und die zusätzlichen Effekte, welche aus den Geometrien, Materialeigenschaften (Styropor), Spiegelungen und der flachen Auftreffwinkel resultieren, näher zu analysieren.

5 Qualitätssicherung beim kinematischen Laserscanning

Neben dem s-TLS hat sich in den letzten Jahren das kinematische TLS (k-TLS) als ein weiteres 3D-Aufnahmeverfahren etabliert. Im Rahmen dieses Abschnittes wird im Speziellen auf die Unsicherheitsmodellierung beim k-TLS eingegangen. Dies erfolgt am Beispiel eines k-TLS-basierten Multi-Sensor-Systems (MSS), welches zunächst im Abschnitt 4.1 vorgestellt wird. Aufgrund der zusätzlich beim k-TLS verwendeten Sensoren, sind einige weitere Teilschritte im gesamten Mess- und Auswerteprozess zu beachten. Da diese zu entsprechenden Unsicherheiten führen, ist eine entsprechende Zusammenfassung vorzunehmen. Dies erfolgt im Rahmen einer Unsicherheitsmodellierung, welche im Abschnitt 5.2 vorgestellt wird.

5.1 Kinematisches Laserscanning – Ablauf

Beim k-TLS wird i. d. R. ein Laserscanner, welcher im Profilmodus rotiert, verwendet. Dieser wird auf eine mobile Plattform montiert und an dem Objekt vorbei bewegt. Diese Vorgehensweise wird auch in Ehm und Hesse (2012) aufgegriffen. Die Besonderheit des vorgestellten k-TLS-basierten MSS ist, dass eine direkte und gleichzeitig hochgenaue Georeferenzierung der mobilen Plattform durch einen Lasertracker in Verbindung mit einem 6 DoF (Degrees of Freedom) Sensor erfolgt, siehe Abb. 7. Für eine detaillierte Beschreibung des k-TLS-basierten MSS wird auf Hartmann et al. (2021) und Gierschner et al. (2021) verwiesen. In den Beiträgen wird die gesamte Prozesskette der Objektaufnahme und Datenverarbeitung am Beispiel des Schiffbaus dargestellt.

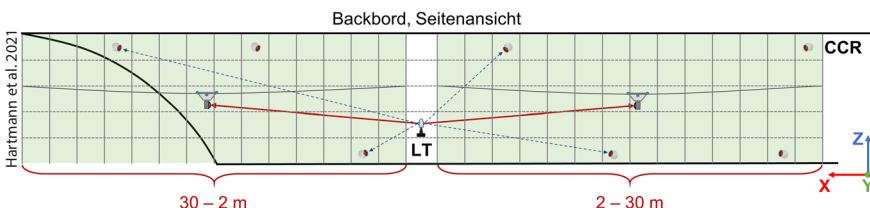


Abb. 7: Das Prinzip der k-TLS-basierten Objekterfassung am Beispiel des Schiffbaus

Inhalt dieses Beitrages ist die Qualitätssicherung für das dargestellte k-TLS-basierten MSS. Hauptaugenmerk bildet dabei die Unsicherheitsmodellierung des Gesamtprozesses. Dafür sind zunächst die Unsicherheiten der Einzelprozesse zu bestimmen, welch hier nicht im Detail erläutert werden können. Bei der TLS-basierten Objekterfassung erfolgt die Modellierung der Unsicherheit analog zur

Vorgehensweise des Abschnittes 3.1.1. Die Bestimmung der Unsicherheit, welche aus der Georeferenzierung der Plattform resultieren, erfolgt nach der Vorgehensweise in Hartmann et al. (2018). Hier wurde ein Filtermodell implementiert, durch welches für jeden Punkt die 6 DoF, als auch deren Genauigkeiten bestimmt werden. Die Bestimmung der 6 DoF zwischen dem Laserscanner und einer T-Probe, welche hier für die direkte Georeferenzierung verwendet wird, erfolgt nach dem Vorgehen in Hartmann et al. (2017). Details über die Bestimmung der Unsicherheiten bei der Stationierung des Lasertrackers in einem übergeordneten Referenzkoordinatensystem, sind in Stenz et al. (2020) zu finden.

Die praktischen Messungen fanden an einem $8\text{ m} \times 4\text{ m}$ großen Mockup, welches geometrische Elemente eines Schiffs enthält, statt. Verwendet wurde ein Z+F IMAGER 5010, welcher im Profilmodus betrieben wurde. Die Lasermessrate betrug 1 Mio. Hz. und die Drehgeschwindigkeit des Rotationsspiegels 50 rps (Rounds per Second). In jedem Profil wurden 20.000 Punkte erfasst. Als mobile Plattform diente ein einfacher Rollen-basierter Träger, welcher an einem Seil entlang bewegte wurde. Die Messzeit betrug ca. 20 Sekunden, in denen ca. 1000 Profile gemessen wurden. Für weitere Details zur Messung wird auf Hartmann et al. (2018) verwiesen.

5.2 Aspekte der Modellierung

Beim k-TLS handelt es sich um einen sehr komplexen Gesamtprozess und zudem noch hoch-nichtlinearen funktionalen Zusammenhang. Daher kann es im Falle der linearen bzw. linearisierten VF zu Problemen kommen. Zum einen ist die Bildung der partiellen Ableitungen aufwendig und zum anderen droht die Gefahr, dass es bei einer nicht exakten Ermittlung des Linearisierungspunktes numerische Abweichungen entstehen.

Aus diesen Gründen wurde hier alternativ eine numerische Methode zur Unsicherheitsfortpflanzung mittels einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) eingesetzt. Neben dem funktionalen Zusammenhang von Eingangs- und Ausgangsgrößen wird eine Wahrscheinlichkeitsdichte-/Verteilungsfunktion der Eingangsgrößen benötigt. Diese wird durch eine genügend große Anzahl an generierten Zufallszahlen M approximiert. Für Details wird auf die Darstellung in JCGM 101 (2008) verwiesen.

Für die Berechnung der Gesamtunsicherheit der k-TLS-basierten Objekterfassung werden pro Punkt 5000 Stichproben verwendet, was hinreichend gute Ergebnisse ermöglicht. Auf die in Heunecke et al. (2013) empfohlene Stichprobenanzahl von 100.000 wird hier aus rechentechnischen Gründen verzichtet. Aufgrund der Größe des Datensatzes sind hier verhältnismäßig lange Rechenzeiten zu erwarten. Ein weiterer Grund ist, dass für einige Anwendungen,

wie z. B. der Flächenmodellierung die Einzelunsicherheit eines Punkts nicht besonders ausschlaggebend ist, sondern eher die Information über viele benachbarte Punkte zusammen.

5.3 Vorwärtsmodellierung der Gesamtunsicherheit

Die Einzelunsicherheiten ergeben sich aus den Prozessierungsschritten, die im Abschnitt 5.1 kurz vorgestellt wurden. In der Tab. 3 sind die Unsicherheiten der drei Teilschritte, die den signifikantesten Einfluss bei der hier vorgestellten Methode der k-TLS-basierten Objekterfassung haben, dargestellt. Des Weiteren wurden deren Unsicherheiten bzgl. der im GUM definierten Typen A und B klassifiziert. Als Verteilung wurde ausschließlich die Normalverteilung gewählt.

Die Bestimmung der Unsicherheit der Objekterfassung entspricht dem Vorgehen aus Abschnitt 3.1.1. Es wurde hierbei jedoch eine Vereinfachung vom 3D- auf den 2D-Fall vorgenommen. Die Parameter der Systemkalibrierung ergaben sich aus einem GHM und sind daher hier als Typ A spezifiziert. Die Unsicherheiten der Georeferenzierung ergeben sich im Rahmen eines Kalman-Filters. Da es sich hierbei um ein statistisches Verfahren zur Ermittlung der Unsicherheit handelt, entspricht dies dem Typ A. Da jedoch in den Kalman-Filter Vorinformationen (Typ B) bezüglich Mess- und Systemrauschen eingebracht werden, handelt es sich hierbei um eine kombinierte Standardunsicherheit u_c .

Tab. 3: Klassifizierung der Einzelunsicherheiten beim k-TLS nach GUM

Teilschritt	nach GUM	Verteilungstyp
Objekterfassung (2D-Scan)	Typ B	Normalverteilung
Systemkalibrierung	Typ A	Normalverteilung
Georeferenzierung	Typ A+B	Normalverteilung

Aus Hartmann et al. 2021

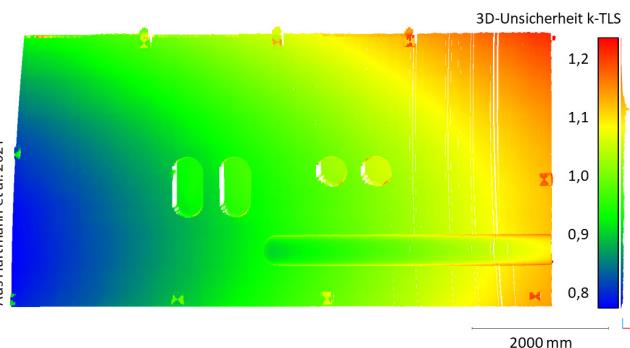


Abb. 8:
Farbcodierte
Darstellung der
3D-Gesamtun-
sicherheit einer
k-TLS-basierten
Objekterfassung

In der Abb. 8 werden die final berechneten 3D-Gesamtunsicherheiten der k-TLS-basierten Objekterfassung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese im Bereich zwischen 0,8 bis 1,2 mm liegen. Das Ansteigen der Unsicherheit von unten links (blau) nach oben rechts (rot) ist auf die unterschiedliche Messdistanz, welche von 5 m auf ca. 8 m anwächst, zurückzuführen. Darüber hinaus ist jedoch auch an den Kanten eine erhöhte Unsicherheit zu erkennen, siehe zylinderförmiges Objekt rechts unten. Dies ist auf die hier abgeschwächte Intensität und des damit verbundenen Abstieges bei der Unsicherheit der Distanzmessung zurückzuführen.

5.4 Validierung mit Referenzdaten

Die Abb. 9 zeigt einen Vergleich zwischen der k-TLS-basierten Punktwolke und einem Referenzdatensatz, welcher mit einer Leica T-Scan mit $U_p = \pm 80 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$ erfasst wurde. Dies entspricht hier einer 2σ -Abweichung zu einer Best-Fit-Ebene, siehe Hexagon (2015). Mit Hilfe des M3C2-Algorithmus nach Lague (2013) wurden die Distanzen zwischen den beiden Datensätzen ermittelt. Da ca. 2σ der Abweichungen im Rahmen von $\pm 1,5 \text{ mm}$ liegen, ist hier eine hohe Übereinstimmung mit den modellierten Unsicherheiten (vergleiche Abb. 8) zu beobachten. Es ist jedoch ein Muster aus vertikalen Streifen (gelbe bis rote Färbung) zu erkennen, wo die Differenzen bis zu 3 mm anwachsen. Dies ist auf eine leichte unregelmäßige Pendelbewegung der bewegten Plattform, welche aufgrund einer einfachen Seilaufhängung entstand, zurückzuführen. Bei der

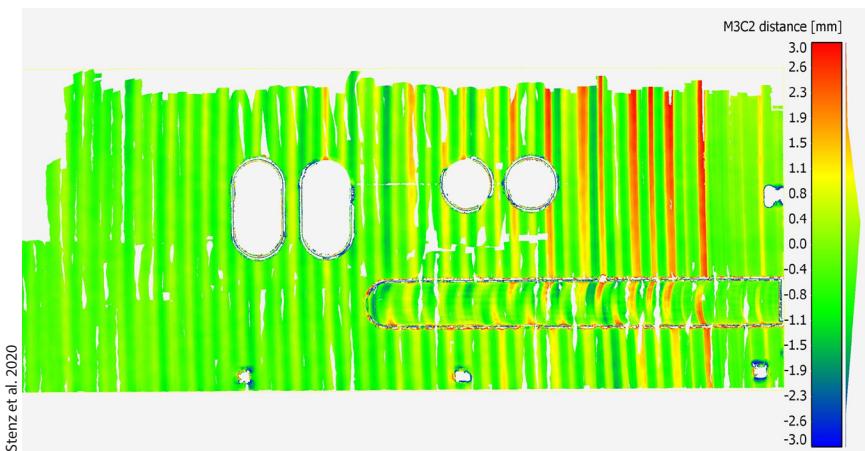


Abb. 9: Farbcodierte Darstellung der M3C2-Distanzen zwischen T-Scan und k-TLS-basierter Objektaufnahme

Prozessierung der Georeferenzierung mit einem iterativen Extended-Kalman-Filter wurde eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung angenommen. Somit ist das Bewegungsmodell, welches in das Filter verwendet wurde, entsprechend zu verbessern. Zusätzliche kann dem durch eine besser gedämpfte Plattform entgegengewirkt werden.

Ein weiterer Effekt in Abb. 9 ist an den Kanten, siehe Bullaugen und vertikales zylinderförmiges Element (rechte Seite unten), wo Abweichungen bis zu 3 mm auftreten, zu erkennen. Diese sind auf systematische Abweichungen, welche sich aufgrund des Kanteneffekts ergeben, zurückzuführen. Für eine realistischere Modellierung müssen diese Systematiken zunächst quantifiziert und entsprechend mit einbezogen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Ansätze zur Modellierung der Gesamtunsicherheit nach GUM beim s- und k-TLS gezeigt. Die abgeleitete kombinierte Unsicherheit setzt sich dabei aus Messpräzision sowie systematischen Messabweichungen zusammen. Ein Soll-Ist-Vergleich für das s-TLS und k-TLS verdeutlicht die Plausibilität der Unsicherheitsmodellierung. Trotzdem wird aus den Vergleichen deutlich, dass die bisherige Unsicherheitsmodellierung Schwächen bezüglich systematischer Effekte, wie beispielsweise Auftreffwinkel und Kanten, aufweisen. Dementsprechend müssen der Prozess der Objekterfassung und die dazugehörigen Unsicherheiten weiter untersucht werden. Da die Modellierung für den statischen Fall im Vergleich zum k-TLS nicht so komplex ist, sollten Systematiken zunächst hier untersucht werden und anschließend auf das k-TLS übertragen werden. Hierfür bietet der Referenzdatensatz für die s-TLS-Messung Potenzial, da dieser viele verschiedene Geometrien sowie Materialien beinhaltet.

Zudem sollen die Anwendungen weitere Ansätze, wie Bayessche Inferenz und Bootstrapping bei der Unsicherheitsmodellierung untersucht werden.

Literatur

- Hartmann, J., Trusheim, P., Alkhatib, H., Paffenholz, J.-A., Diener, D., Neumann, I. (2018): High Accurate Pointwise (Geo-)Referencing of a k-TLS Based Multi-Sensor-System. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. (2018), Nr. IV-4, 81–88.
- Hartmann, J., Bachmann, A., Urban, B., Hesse, C., Gierschner, F., Neumann, I. (2021): Hochgenaues kinematisches Laserscanning als Beitrag für die Qualitätssicherung in der industriellen Produktion. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 128(4), 182–190.

- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H., Möser, M. (Hrsg.); Müller, G. (Hrsg.); Schlemmer, H. (Hrsg.) (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. 2. neu bearb. u. erw. Auflage. Berlin: Wichmann.
- Hexagon (2015): Leica T-Scan 5, Produktinformationen, Hexagon. www.hexagonmi.com/de-DE/products/3d-laser-scanners/leica-tscan-5, letzter Zugriff 18.03.2022.
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H., (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners: Kalibrierung terrestrischer Laserscanner. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN; Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geo-information. 123.2016, 6, 147–157.
- JCGM 100 (2008): Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology. www.iso.org/sites/JCGM/GUM-JCGM100.htm, letzter Zugriff 30.03.22.
- JCGM 101 (2008): Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ – Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Joint Committee for Guides in Metrology. www.iso.org/sites/JCGM/GUM-introduction.htm, letzter Zugriff 30.03.22.
- Juretzko, M. (2004): Reflektorlose Video-Tachymetrie: ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, Bochum. Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Kern, F. (2003): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002. Braunschweig: Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie TU (Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, 19).
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2013, 82, 10–26.
- Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H.: Optimizing the Target-based Calibration Procedure of Terrestrial Laser Scanners: Optimierung des zielzeichenbasierten Kalibrierprozesses terrestrischer Laserscanner. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN; Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geo-information. 127.2020, 1, 27–36.
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C. (2015): Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. Precision Engineering-journal of The International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 40, 139–150.
- Reshetnyuk, Y. (2006): Investigation of the Influence of Surface Reflectance on the Measurements with the Terrestrial Laser Scanner Leica HDS 3000. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2006, 96–103.
- Schulz, T. (2008): Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy. Dissertation. ETH Zürich.
- Sheng, Y. (2008): Quantifying the Size of a Lidar Footprint: A Set of Generalized Equations. In: IEEE Geosci. Remote Sensing Lett. 5 (3), 419–422. DOI: [10.1109/LGRS.2008.916978](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.916978).

- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2009): Incidence Angle Influence on the Quality of Terrestrial Laser Scanning Points. ISPRS – Commission III – Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis Workshop Laserscanning '09, Sep 1 2009, 183–188. Paris, France: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Stenz, U., Hartmann, J., Paffenholz, J. A., Neumann, I. (2020): High-Precision 3D Object Capturing with Static and Kinematic Terrestrial Laser Scanning in Industrial Applications: Approaches of Quality Assessment. *Remote sensing*, 12(2), [290]. DOI: [10.3390/rs12020290](https://doi.org/10.3390/rs12020290).
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 125, 146–155.
- Zámečníková, M., Wieser, A., Woschitz, H., Ressl, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. In: *Journal of Applied Geodesy* 8 (4). DOI: [10.1515/jag-2014-0016](https://doi.org/10.1515/jag-2014-0016).

Kontakt

Dipl.-Ing Jens Hartmann | Jan Hartmann, M.Sc.
Leibniz Universität Hannover, Geodätisches Institut
Nienburger Straße 1, 30167 Hannover
hartmann@gih.uni-hannover.de
jan.hartmann@gih.uni-hannover.de

Gefördert durch

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Jenseits der Glaskugel: Geodätische Qualitätssicherung in großen Laserscanningprojekten

Daniel Wujanz | Frank Giedsdorf

1 Einleitung

Laserscanner haben, egal ob statisch oder kinematisch betrieben, den geodätischen Werkzeugkasten zweifelsohne bereichert. Allerdings wurde in den frühen 2000er Jahren die Maxime „*Jeder kann scannen*“ von Seiten des Marketings propagiert, wodurch sich ein Nischenmarkt zu einem heutigen Massenmarkt wandelte. Die Schattenseite dieser Entwicklung führte zu einer Parallelwelt, in welcher der Anspruch an den Anwender schrittweise heruntergefahren wurde und sich dadurch immer weiter von etablierten Prinzipien der Vermessung entfernte. In dieser ist es meist unklar, wie Laserscans algorithmisch verarbeitet werden, wie Qualitätsmaße berechnet werden und worauf diese basieren. Daher werden in diesem Beitrag zunächst verschiedene Strategien für den Qualitätsnachweis von statischen und kinematischen Laserscans diskutiert sowie deren Belastbarkeit bewertet. Abschließend wird gezeigt, wie etablierte geodätische Qualitätsmaße helfen können, die Aussagekraft der mit Laserscanning erfassten Daten deutlich zu erhöhen.

2 Qualitätssicherung im Laserscanning

Im Laserscanning übt die für die Registrierung von statischen Laserscans sowie die Bestimmung von kinematischen Parametern eingesetzte Algorithmik in der Regel einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse aus als die reine Messgenauigkeit. Folglich stellt sich die Frage, wie dieser Fehlereinfluss im Rahmen einer Qualitätsprüfung aussagekräftig quantifiziert werden kann. Als wesentlicher Nachweis der erreichten Qualität einer Vermessung mit konventionellen Messmitteln ist ein aussagekräftiges Protokoll aller getätigten Berechnungen vorzulegen. Im Laserscanning haben sich hierfür Residuen als omnipräsentes Qualitätsmaß durchgesetzt, die folglich als Berechnungsnachweis verwendet werden. Nachteilig an diesen Maßen ist jedoch, dass sie stark konfigurationsabhängig und damit wenig aussagekräftig sind. Prinzipiell können im Laserscanning

drei Strategien zu deren Berechnung unterschieden werden, die sowohl für Daten aus statischen als auch kinematischen Systemen angewendet werden können.

Dabei werden Widersprüche

1. zwischen überlappenden Punktfolgen (siehe Abschnitt 2.1),
2. zwischen Registrier- oder kinematischen Parametern (vgl. Abschnitt 2.2) oder
3. zwischen diskreten Punkten (wie Abschnitt 2.3 beschrieben) berechnet.

2.1 Widersprüche zwischen überlappenden Punktfolgen

Residuen zwischen überlappenden Punktfolgen können prinzipiell auf zwei Arten berechnet werden. Eine Gemeinsamkeit beider Strategien ist, dass nicht alle im Überlappungsbereich liegenden Punkte für die Berechnung der Qualitätsmaße herangezogen werden, sondern lediglich eine Auswahl. In der Regel umfasst diese wenige tausend Punkte, um die benötigte Laufzeit sowie die Speicherauslastung auf ein angemessenes Maß zu reduzieren. Die geometrische Verteilung der gewählten Punkte bleibt dem Benutzer in der Regel verborgen, wobei ein regelmäßiges Raster die optimale Lösung darstellt. Zur Veranschaulichung der beiden Strategien wird im Folgenden ein Beispiel verwendet, dass in Abb. 1 zu sehen ist. In dieser ist ein Schnitt durch zwei registrierte Punktfolgen zu sehen, die durch orange und grüne Kugeln hervorgehoben sind. Die digitalisierte Fläche ist durch eine graue Linie dargestellt. Es ist unerheblich, wie die Daten registriert wurden.

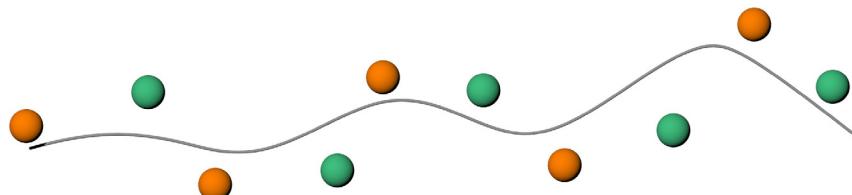


Abb. 1: Schnitt durch zwei registrierte Punktfolgen

Die erste Strategie basiert auf der Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen, wie in Abb. 2 zu sehen ist. Für jeden ausgewählten Punkt aus der ersten Punktfolge wird der nächstgelegene Punkt aus dem zweiten Datensatz bestimmt. Im vorliegenden Beispiel wurden vier grüne Kugeln ausgewählt, um die Qualitätsmaße für diese Registrierung zu berechnen. Die Auswahl erfolgte für

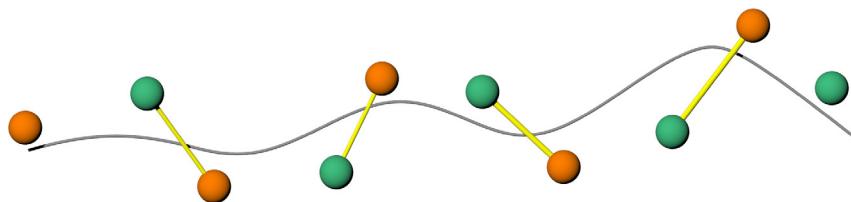


Abb. 2: Bildung von Punkt-zu-Punkt-Korrespondenzen

das folgende Beispiel von links nach rechts, ausgehend von der ersten grünen Kugel. Es ist offensichtlich, dass eine umgekehrte Reihenfolge zu anderen Korrespondenzen und somit anderen Qualitätsmaßen führen würde. Die bestimmten Korrespondenzen sind in Abb. 4 durch gelbe Verbindungen hervorgehoben. Ihre Länge gibt die Größe der einzelnen Residuen an. Als letzter Schritt wird ein einzelner numerischer Wert berechnet, z. B. der Mittelwert aller Residuen. Für den vorliegenden Fall beträgt dieser Wert im Durchschnitt 7,8 mm (Residuen von links nach rechts: 7,8 mm, 7,0 mm, 7,4 mm und 9,0 mm).

Es ist offensichtlich, dass die Auswirkung der lokalen Punktverteilung einen großen Einfluss auf die zuvor berechneten Qualitätsmaße hat. Daher wird das in den Abb. 1 und Abb. 2 gezeigte identische Szenario nun durch die Berechnung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen nochmals durchlaufen, wie in Abb. 3 dargestellt. Im ersten Schritt wurde der orangefarbene Datensatz trianguliert, was durch die hellgrau eingefärbten geraden Segmente verdeutlicht wird. In der Regel wird die Triangulation nur lokal, um ausgewählte Punkte herum ausgeführt. Anschließend werden die grünen Punkte nach Möglichkeit auf die entsprechenden Dreiecke projiziert. Der Abstand zwischen einem grünen Punkt und dem projizierten Lotfußpunkt stellt das resultierende Residuum dar. In diesem Beispiel beträgt die „Qualität“ der Registrierung 3,4 mm (Residuen von links nach rechts: 5 mm, 3,5 mm, 2,6 mm und 2,5 mm), ausgehend vom berechneten arithmetischen Mittelwert. Wenn man sich nur die Zahlen ansieht, könnte man annehmen, dass die Qualität dieser Registrierung „doppelt so gut“ ist wie die der ersten – obwohl die vorliegenden Registrierparameter identisch sind.

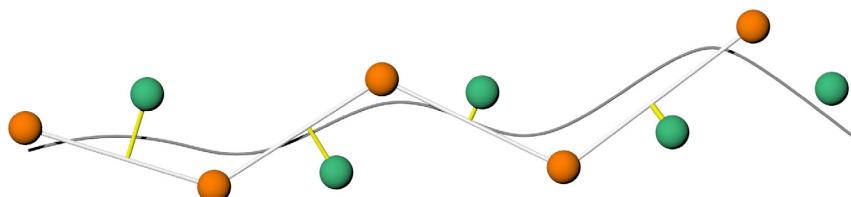


Abb. 3: Bildung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen

Im nächsten Beispiel, das in Abb. 4 dargestellt ist, wurde der grüne Datensatz in Bezug auf seine ursprüngliche Lage gedreht und verschoben, um die Auswirkungen eines unscheinbaren Parameters zu demonstrieren. Manchmal wird dieser Wert z. B. als maximaler Suchabstand (bei einigen Cloud-2-Cloud-Implementierungen), Korrespondenzschwelle oder Toleranz bezeichnet und ist in einigen Fällen in den Eigenschaften des angewandten Registrierungsalgorithmus einstellbar.

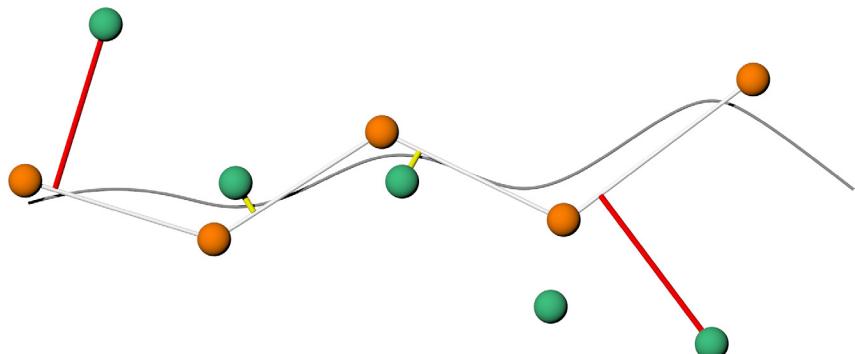


Abb. 4: Bildung von Punkt-zu-Dreieck-Korrespondenzen mit Korrespondenzschwelle

Dieser Parameter gibt den größten Abstand zwischen zwei Punkten aus zwei verschiedenen Punktwolken an, die eine Korrespondenz bilden können. Im Folgenden wird dieser Parameter mit 3,0 mm angesetzt. Die Residuen in diesem Beispiel (von links nach rechts) sind 12,0 mm, 2,6 mm, 2,9 mm und 12,7 mm. Folglich werden zwei Residuen verworfen, da sie größer als der festgelegte Schwellenwert sind, was durch die beiden roten Linien hervorgehoben wird. Folglich beträgt die „Qualität“ der Registrierung 2,75 mm. Wenden wir nun denselben Parameter auf das in Abb. 5 dargestellte Beispiel an, so „verbessern“ sich die Qualitätsmaße von 3,4 mm auf 2,55 mm, was natürlich irritierend ist. Kurz gesagt: Wenn dieser Abstand auf 1 mm eingestellt ist, wird das resultierende Qualitätsmaß kleiner als 1 mm sein.

2.2 Widersprüche zwischen Registrier- oder kinematischen Parametern

Registrierungsalgorithmen verwenden redundante Teilmengen oder extrahierte Informationen aus sich überlappenden Punktwolken, auf deren Grundlage Registrierungsparameter berechnet werden können. Dieser Satz mag banal erscheinen, jedoch nennt er zwei Informationsquellen, die für die Qualitäts-

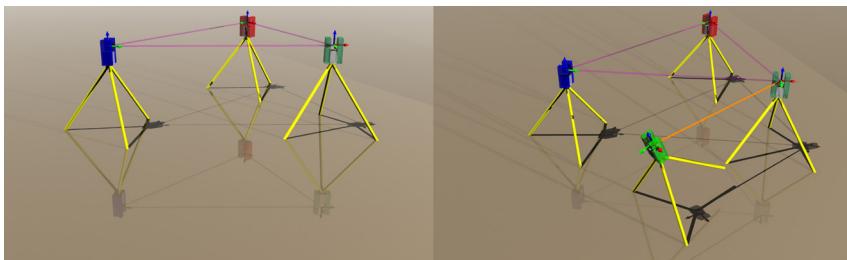


Abb. 5: Drei Scans mit fehlerfreier (links) und fehlerbehafteter Registrierung (rechts)

sicherung in Scanningnetzen genutzt werden können, nämlich die Punktwolken selbst und die Registrierungsparameter oder bei kinematischen Systemen die kinematischen Parameter.

Um Letztere für die Qualitätssicherung nutzen zu können, werden Bedingungen im Rahmen einer Blockausgleichung eingeführt. Die Grundidee ist vergleichbar mit einem Schleifennivellement, bei dem die Bedingung, dass die Höhe des Start- und Endpunktes identisch sein müssen, aufgestellt wird. Ein weiterer Vorteil dieser Strategie ist, dass sie auf alle Messtechniken anwendbar ist, die Höhenunterschiede bestimmen. Während ein Nivellement ein eindimensionales Problem darstellt, ist die Registrierung von Laserscans ein sechsdimensionales. Dennoch lässt sich das gleiche Konzept auch auf das letztgenannte Problem anwenden. Stellen wir uns vor, wir haben drei Scans aufgenommen, wie in Abb. 5 dargestellt. Zwei Registrierungen zwischen den Scans würden ausreichen, um alle Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. Es wäre jedoch nicht möglich, festzustellen, ob alle Registrierungen korrekt sind. Um eine selbstkontrollierende Konfiguration zu erstellen, wird eine dritte Registrierung zwischen den Scans berechnet. Die Registrierungen sind in der Abbildung durch drei magentafarbene Linien dargestellt.

Um die Bedingung zur Überprüfung der Registrierungen zu verstehen, wird eine virtuelle Kopie des grünen Scanners, der rechts in der Abbildung hellgrün eingefärbt ist, genutzt. Dann wird ein geschlossener Polygonzug berechnet, der von der dunkelgrünen Station ausgeht. Dies wird erreicht, indem die berechneten paarweisen Registrierungsparameter auf die entsprechenden Stationen angewendet werden: Dunkelgrün auf Blau, Blau auf Rot und schließlich Rot auf die virtuelle Kopie in Hellgrün. Unter der Annahme, dass die Registrierungsparameter fehlerfrei sind, was ein rein theoretisches Konstrukt ist, müssen die Referenzstation (dunkelgrün) und ihre virtuelle Kopie (hellgrün) hinsichtlich ihrer Position UND Orientierung identisch sein. Folglich erlaubt diese Bedingung, alle Freiheitsgrade zu kontrollieren. Wie rechts in Abb. 5 zu sehen, ist ein großer Fehlervektor zu erkennen, der durch die orangefarbene Linie und die Fehlorientierung der Station selbst hervorgehoben wird. Diese Strategie zur

Qualitätssicherung von Laserscans gibt folglich Auskunft darüber, wie gut paarweise Registrierungen zusammenpassen – unabhängig vom gewählten Registrierungsalgorithmus.

2.3 Widersprüche zwischen Zielmarken

Künstliche Zielmarken sind in der Praxis weit verbreitet, da ihre Qualitätsmaße aussagekräftig und leicht zu interpretieren sind. Da der allgemeine Arbeitsablauf und die metrische Interpretation im Allgemeinen mit geodätischen Beobachtungen vergleichbar sind, fühlen sich diese Zahlen für viele Menschen, insbesondere für Vermesser, recht vertraut an. Grundsätzlich dienen Zielmarken der paarweisen Registrierung von Laserscans und/oder der Überführung derselben in ein übergeordnetes System. Zunächst wird der lokale (paarweise) Fall betrachtet.

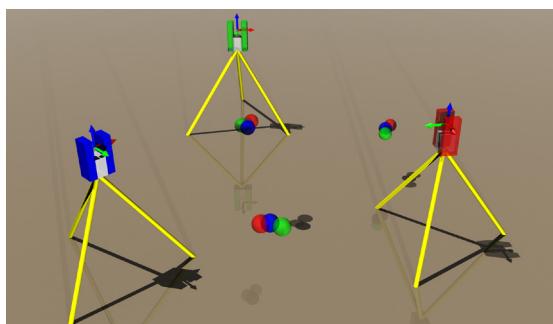


Abb. 6:
Registrierung von drei
Laserscans über lokale
Zielmarken

Abb. 6 veranschaulicht ein Szenario mit drei Stationen, die mit drei Kugeln registriert wurden. Die Farben der Kugeln zeigen, von welchem Standpunkt aus sie erfasst wurden. Da das Kugeltripel von drei Stationen erfasst wurde, sind in der Abbildung neun Kugeln zu sehen. Die Qualitätsmaße nach einer zielfmarkenbasierten Registrierung sind Restklaffen. Diese beschreiben die verbliebenden Spannungen zwischen den einzelnen Zielmarkenzentren.

Zur Überführung von erfassten Scans in ein übergeordnetes Koordinatensystem, müssen für mindestens drei Zielzeichen übergeordnete Koordinaten mit Hilfe geodätischer Messungen bestimmt werden. Diese erhöhen zusätzlich die Redundanz eines Netzes und sind zudem als unabhängige Kontrollinstanz von großem Wert. Allerdings ist deren Einbringung immer mit zusätzlichem Aufwand verbunden, was sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit eines Projektes auswirkt. Folglich stellt sich in der Praxis die Frage, wie viele Anschlusspunkte bei welcher Genauigkeit zum Erreichen einer Qualitätsvorgabe benötigt werden.

2.4 Bewertung der verschiedenen Strategien

Sowohl in der Wissenschaft als auch in kommerziellen Lösungen findet die erstgenannte Lösung die weiteste Verbreitung. Dies ist, gelinde gesagt, irritierend, da diese Metrik sehr intransparent ist und keine bestlastbare Qualitätssicherung erlaubt. Dies erklärt auch, warum in der Praxis Zielmarken trotz enormen Mehraufwandes im Feld immer noch umfangreich eingesetzt werden. Alternativ dazu werden in der Praxis oft Horizontalschnitte durch die registrierten Punkt-wolken gelegt, die als visuelle Kontrolle dienen. Prinzipiell ist diese Vorgehensweise als einfache Stichprobe zu bewerten, mit der zwar grobe Lagefehler schnell entdeckt werden können, nicht aber kleinere Abweichungen, die sich im Laufe eines Projektes aufschaukeln. Des Weiteren ist die Perspektive naturgemäß eingeschränkt. In Puncto Aussagekraft der numerischen Qualitätsmaße stellt die in Abschnitt 2.2 vorgestellte Lösung eine belastbare und gleichzeitig wirtschaftliche Lösung dar.

Gründe für die Popularität von Residuen sind deren datumsunabhängige Eigenschaften und die leichte Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Ersteres bedeutet, dass sie von der Größe einer Translation oder Rotation unabhängig sind. Allerdings haben auch Residuen interpretatorische Grenzen – der Einfluss eines geodätischen Passpunktes auf die Stabilität eines Netzes ist lageabhängig und kann daher nicht durch Residuen, oder genauer gesagt Restklaffen, ausgedrückt werden. Dies wird in Abschnitt 3 an einem praktischen Beispiel erläutert. Des Weiteren wird demonstriert, wie Restklaffen zu geodätischen Anschlusspunkten mit Hilfe unlauterer Mittel „geschönt“ werden können.

3 Grenzen von etablierten Qualitätsmaßen

Zu Recht gelten mit herkömmlichen geodätischen Messmitteln eingebrachte Anschlusspunkte als „Goldstandard“ der Qualitätssicherung im Laserscanning. Daher werden in Abschnitt 3.1 zunächst Grenzen dieser Strategie aufgezeigt. In Abschnitt 3.2 werden zur Überwindung dieser Grenzen in der Geodäsie weitverbreitete Metriken vorgestellt, die eine ideale Ergänzung zu den omnipräsent im Laserscanning eingesetzten Qualitätsmaßen darstellen.

Zur Veranschaulichung dient im Folgenden eine Vermessung, die mit einem statischen Laserscanner im Rahmen einer Toleranzprüfung auf einer Industriebaustelle durchgeführt wurde, die sich über Fläche von ca. 150 m × 210 m erstreckt. Zur Erfassung der Baustelle wurden 370 Scans erfasst, die über 528 paarweise Registrierungen verknüpft wurden. Zusätzlich wurden 63 Tachymeterpunkte eingemessen, an die 327-mal von unterschiedlichen Standpunkten

angeschlossen wurde. Die Genauigkeitsforderung betrug 10 mm. Nach der Durchführung einer Blockausgleichung ergaben sich folgende Widersprüche:

- Zwischen Registrierungen: Mittel: 0,2 mm, Median: 0,4 mm, Max: 3,7 mm
- Zu Anschlusspunkten: Mittel: 3,3 mm, Median: 2,7 mm, Max: 7,7 mm

Bei reiner Betrachtung der Restklaffen zu den Anschlusspunkten wäre man geneigt anzunehmen, dass die Genauigkeitsforderung von 10 mm deutlich erfüllt wurde. Diese Annahme lässt allerdings zwei wesentliche Aspekte außer Acht. Zunächst ist festzustellen, dass aus wirtschaftlichen Gründen natürlich nicht alle Laserscans tachymetrisch eingemessen und überprüft wurden. Somit ist zunächst nicht klar, ob alle Scans korrekt registriert wurden. Des Weiteren ist nicht klar, wo die tachymetrischen Anschlusspunkte im Scanningnetz verteilt sind und wie diese sich auf das Netz auswirken. Beide Aspekte werden später in Abschnitt 4.2 wieder aufgegriffen.

Abb. 7 zeigt die Netzkonfiguration des gemessenen Netzes. Kreise beschreiben einzelne Scans, während Pfeile paarweise Registrierungen darstellen. Auf die Lage der tachymetrischen Anschlusspunkte wird später eingegangen.

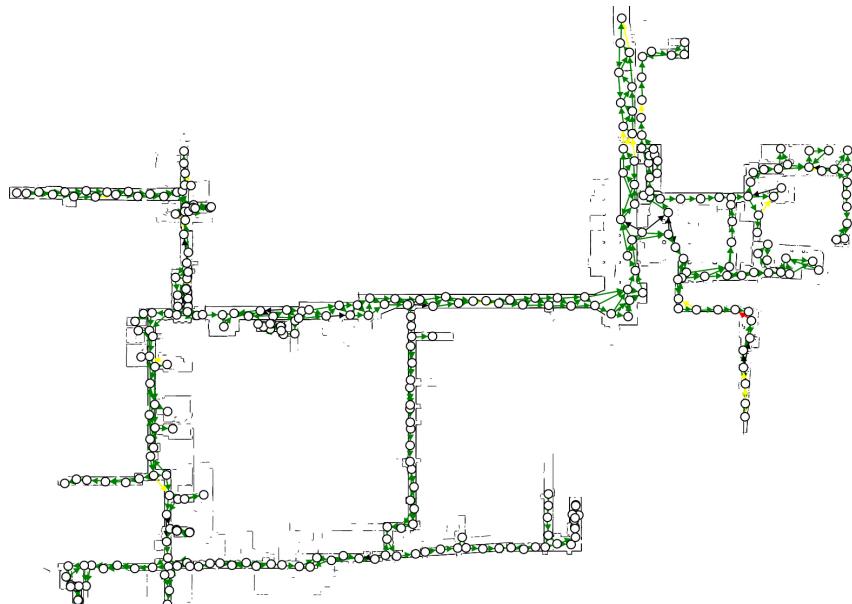


Abb. 7: Übersicht über das gemessene Scanningnetz

3.1 Unlautere „Beschönigung“ von Scanningnetzen

In diesem Abschnitt werden drei einfache Möglichkeiten beschrieben, wie Qualitätsnachweise „schön“ gerechnet werden können. Dabei ist es unerheblich, ob statische oder kinematische Laserscans verarbeitet werden. Nehmen wir für das vorliegende Beispiel im Folgenden an, dass Widersprüche zur Tachymetrie über 10 mm vorlägen.

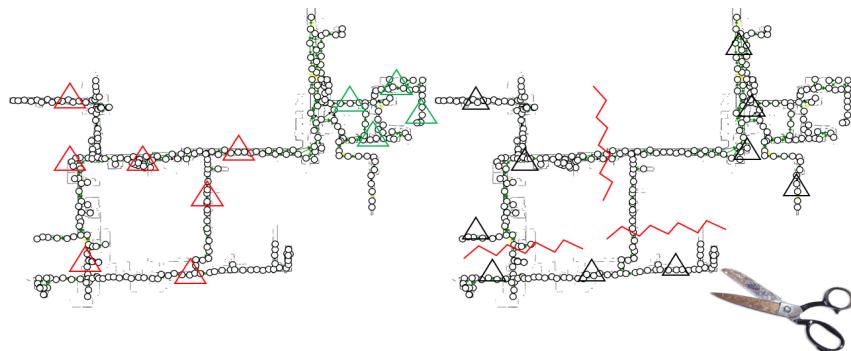


Abb. 8: Reduktion von Anschlusspunkten (links) und Registrierungen (rechts)

Die erste Strategie basiert auf der gezielten Reduktion von Redundanz mit Fokus auf die geodätischen Anschlusspunkte. Dazu werden einfach alle Punktidentitäten zwischen Tachymetrie und Laserscans aufgelöst, die den geforderten Wert überschreiten. Im linken Teil von Abb. 8 kennzeichnen rote Dreiecke deaktivierte Anschlusspunkte, während grüne Dreiecke verwendete Anschlusspunkte hervorheben. Es ist offensichtlich, dass es ein Leichtes ist, auch „Genauigkeiten“ um 1 mm zu erreichen, solange man nur immer weiter ausdünnnt. Folge dieser Maßnahme ist eine allgemeine Destabilisierung des Netzes, die in der Regel zu Extrapolationseffekten führt. Beide negativen Einflüsse spiegeln sich nicht in den resultierenden Restklaffen wider. Diese suggerieren weiterhin ein hochgenaues Ergebnis.

Bei der zweiten Strategie wird ebenfalls gezielt die Redundanz innerhalb des Netzes reduziert, allerdings nun durch Auflösen von paarweisen Registrierungen oder dem Splitten von kinematischen Scans. Treten Spannungen im Netz auf, die sich negativ auf die Widersprüche an den Anschlusspunkten auswirken, kann entweder zwischen zwei Anschlusspunkten oder alternativ innerhalb einer bestehenden Schleife getrennt werden. Ergebnis dieser Methode sind einzelne Blöcke zusammenhängender statischer und/oder kinematischer Punktwolken, die über mindestens drei Anschlusspunkte pro Block im geodätischen Datum hängen. Auch hier gaukeln die resultierenden Widersprüche nach

„erfolgreicher“ Anwendung dieser Methode ein ausreichend genaues Ergebnis vor. Folge dieser Maßnahme sind unsaubere Übergänge zwischen den einzelnen Blöcken. Es sei erwähnt, dass dieser Effekt unbewusst auch in vielen kommerziell verfügbaren Softwarelösungen für die Registrierung von statischen Scans auftritt. Und zwar dann, wenn die Software nicht in der Lage ist, größere Scanprojekte gemeinsam auszugleichen. In diesem Fall werden die Projekte entweder in Sub-Projekte aufgeteilt, die noch prozessiert werden können oder in Gruppen oder sogenannte Cluster eingeteilt. Der rechte Teil von Abb. 8 visualisiert die genannte Methode. Dreiecke kennzeichnen wieder geodätische Anschlusspunkte, während die roten Zickzack-Linien die Trennstellen einzelner Blöcke darstellen.

Eine dritte Methode der unlauteren Einflussnahme auf die Ergebnisse ist eine inadäquate Gewichtung. Erwähnenswert ist hierbei, dass in vielen Softwarelösungen diese Manipulation nicht von Seiten des Nutzers bewusst herbeigeführt wird, sondern von Herstellerseite in Form fester Gewichte einzelner Beobachtungen. Zur Veranschaulichung dieser Methode gehen wir von einem kinematischen Scanprojekt aus. Mittels GNSS wurden in einem Außenbereich Anschlusspunkte gemessen. Deren Genauigkeit liegt bekanntlich deutlich hinter jener tachymetrischer Beobachtungen. Um kleine Restklaffen an den Anschlusspunkten zu erhalten, wählt man z. B. a priori-Gewichte der GNSS-Punkte im Sub-Millimeterbereich, während die Widersprüche zwischen den beiden Datenquellen in das Laserscanningnetz gedrückt werden. Je optimistischer, also höher, die Genauigkeit angenommen wird, desto größer wird der auf das Netz ausgeübte Zwang. Als Folge dieser Maßnahme wird die Punktwolke verbogen. Dies sieht man mitunter in Projekten mit GNSS-Anschlusspunkten, deren Höhengenauigkeit merklich schlechter ist als die der Lage, in Form von nicht-planaren Böden.

3.2 Geodätische Qualitätsmaße im Laserscanning

Nicht umsonst gibt es in der Geodäsie Qualitätsmaße jenseits der Residuen. Im Folgenden werden daher geeignete Maße und deren Aussagekraft vorgestellt. Das Einbringen von geodätisch koordinierten Anschlusspunkten ist, wie gesagt, eine verlässliche Methode, um etwa die Referenzierung von statischen Laser-scans zu überprüfen. Allerdings wäre es unwirtschaftlich, jeden einzelnen Scan einzumessen. Zur Überbrückung von Anschlusspunkten stehen daher zahlreiche kommerzielle Lösungen zur Verfügung, mit denen Scans, basierend auf deren Überlappungsbereichen, registriert werden können. Beispiele hierfür sind der ICP-Algorithmus (Besl und McKay 1992), der auch als Cloud-to-Cloud bezeichnet wird, oder etwa die Verwendung von aus den Scans extrahierten Ebenen (technet 2022).

Um sich aber vor den zuvor vorgestellten, unlauteren Methoden zu schützen, können Redundanzanteile berechnet werden. Diese geben Auskunft über das Maß der Kontrolliertheit der paarweisen Registrierparameter. Sind zwei Scans lediglich durch eine Registrierung verbunden, so sind die Redundanzanteile gleich null. Ein solches Szenario ist unbedingt zu vermeiden, da keine verlässliche Aussage über die Richtigkeit der Registrierungen getroffen werden kann.

In Abb. 9 sind die Redundanzanteile für das Beispielnetz berechnet worden. Grüne Pfeile sprechen für eine gute, rote hingegen für eine schwache Kontrolliertheit. Maßnahmen, die beiden Registrierungen zu kontrollieren wären zum



Abb. 9: Redundanzanteile eines statischen Scanningnetzes

einen das Berechnen von weiteren paarweisen Registrierungen (sofern die Messkonfiguration dies erlaubt) oder die Einführung eines geodätischen Anschlusspunktes am toten Ende des Zuges. Ein weiterer Grund für niedrige Redundanzanteile ist die geometrische Beschaffenheit des Überlappungsbereiches zwischen zwei Scans. Gehen wir von einem zylinderförmigen Tunnel aus. Selbst wenn die erfassten Scans mit mehr als einer Registrierung eingebunden wurden, so ist die Translation entlang der Tunnelachse als auch die Rotation um ebenjene nur schwach bestimmt. Redundanzanteile geben Auskunft darüber, wie vertrauenswürdig und belastbar abgeleitete Qualitätsmaße, zum Beispiel Restklaffen, sind.

Um die Folgen der Ausdünnung von Redundanz zu zeigen, eignet sich als Kriterium die Stationierungsgenauigkeit. Diese gibt Auskunft darüber, wie genau ein statischer Laserscan oder Teile eines kinematischen Scans in Bezug auf ein geodätisches Datum positioniert werden konnten. Als Datum können zum Beispiel lokale Koordinatensysteme von Einzelscans, geodätische Anschlusspunkte oder ein Planungsmodell, wie etwa ein CAD oder BIM, fungieren. Durch Fehlerfortpflanzung kann die Stationierungsgenauigkeit für jeden Scan

oder Teilscan berechnet werden. Die Qualität der Stationierung hängt von vielen Faktoren ab, ist daher aber auch aussagekräftig. Einflüsse sind etwa die gesamte Netzkonfiguration der paarweisen Registrierungen, Qualität und Lage von Anschlusspunkten, individuelle Gewichtung der Beobachtungen und der Güte der Kalibrierung des eingesetzten Scanners.



Abb. 10: Fehlerfortpflanzung eines Puzzles (links) und des Scanningnetzes (rechts)

Berechnet man die Stationierungsgenauigkeit für das zu Beginn des Abschnitts eingeführte Beispiel, so zeigt sich, dass die geforderte Genauigkeit von 10 mm nicht eingehalten werden kann. Dies ist an der Farbgebung im rechten Teil von Abb. 10 zu sehen. Rot eingefärbte Scans weisen eine Stationierungsgenauigkeit oberhalb der geforderten Genauigkeit auf. Dies erscheint bei Betrachtung der mittleren Restklaffen von 3,3 mm zur Tachymetrie zunächst merkwürdig, wird aber plausibel, wenn die Lage der tachymetrischen Anschlusspunkte berücksichtigt wird. Diese ist durch das blaue Vieleck hervorgehoben. Es ist ersichtlich, dass die Verteilung der Passpunkte unvorteilhaft gewählt wurde. Die aufgetretenen Extrapolationsfehler können im linken Teil von Abb. 10 anhand eines Puzzles nachvollzogen werden.

4 Qualitätssicherung in großen Laserscanningprojekten

Prinzipiell ist die Chance bei der Registrierung zu Scheitern unabhängig von der Anzahl der erfassten Scans. Allerdings stellt bei Großprojekten mit mehreren tausend statischen Scans die Fehlersuche eine besonders große Herausforderung dar. Einer der Gründe hierfür ist, dass es in der Regel zu größeren Anteilen an Ausreißern kommt, die das Optimierungsergebnis verfälschen und dadurch die Fehlersuche erschweren. Typische Gründe für Ausreißer sind etwa:

- Dekalibrierte oder unterschiedlich gut kalibrierte Scanner – insbesondere bei Nutzung mehrerer Systeme
- Durch Vibrationen oder instabile Verhältnisse verursachte fehlerhafte Stehachsen/Inclinometerbeobachtungen

- Lokale Minima bei paarweisen Registrierungen
- Falsche Matches bei Zielmarken durch symmetrische Anordnung
- Fehler bei tachymetrischem Anschluss, etwa beim vergessenen Wechsel der Prismenkonstanten (Prismenmodus auf Reflektorlos)

Bezüglich des ersten Punktes ist es daher ratsam, vor der Messung alle genutzten Systeme auf Messtauglichkeit hin zu prüfen. Dafür eignen sich entweder vom Hersteller bereitgestellte Werkzeuge oder herstellerneutrale Verfahren (DVW 2014). Um den Anteil von Ausreißern zunächst gering zu halten, ist es ratsam, das Gesamtprojekt in Gruppen einzuteilen, etwa gemäß der architektonischen Struktur. Die Prozessierung folgt dabei dem Prinzip „vom Kleinen ins Große“. Zunächst werden alle Gruppen individuell ausgeglichen und wenn nötig bereinigt. Anschließend werden die Einzelteile stückweise zusammengesetzt.

Treten in einer Gruppe in mehreren Beobachtungstypen Ausreißer (siehe obige Liste) auf, so ist es ratsam, diese individuell auszugleichen. Zeigt zum Beispiel eine reine Blockausgleichung der paarweisen Registrierungen keine signifikanten Widersprüche, so wird anschließend der nächste Beobachtungstyp, etwa die Inklinometer hinzugefügt, die dann ggf. zu Spannungen führen. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis alle Beobachtungstypen einbezogen wurden und ein in sich konsistenter Datensatz entstanden ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Qualität von Laserscannigprojekten wird durch den Scanner selbst, die eingesetzte Software und die Messkonfiguration beeinflusst. Insbesondere die verwendete Software zur Registrierung der Laserscans und deren Werkzeuge zur Qualitätssicherung sind hierbei von großer Bedeutung, um vorgegebene Qualitätsvorgaben einhalten zu können. Unglücklicherweise ist die Transparenz bezüglich der meisten Hersteller nicht sonderlich groß, so dass auf Anwenderseite Unklarheit darüber herrscht, wie die verwendete Software im Detail funktioniert und was Qualitätsmetriken aussagen. In diesem Beitrag wurden daher verschiedene Strategien für die Qualitätssicherung diskutiert sowie deren Aussagekraft bewertet. Des Weiteren wurden Grenzen der etablierten Qualitätsmetriken aufgezeigt und schließlich weitere geodätische Qualitätsmaße vorgestellt, welche die Aussagekraft bei der Netzanalyse deutlich erhöhen.

Literatur

- Besl, P. J., McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. Robotics-DL tentative, International Society for Optics and Photonics, Seiten 586–606.
- DVW (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). Fachautoren: Neitzel, F. Gordon, B., Wujanz, D. <https://dvw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1149-verfahren-zur-standardisierten-ueberpruefung-von-terrestrischen-laserscannern-tls>, letzter Zugriff 13.04.2022.
- technet (2022): Scantra Produktseite. www.technet-gmbh.com/produkte/scantra/, letzter Zugriff 13.04.2022.

Kontakt

Frank Gielsdorf | Daniel Wujanz
Technet GmbH Gründig + Partner
Am Lehnshof 8, 13467 Berlin
frank.gielsdorf@technet-gmbh.com
daniel.wujanz@technet-gmbh.com

Qualitätssicherungssystem zur automatisierten Spalt- und Übergangsmessung am Ende einer Produktionslinie

Tobias Schröder | Johannes Baumgartl | Volker Schwieger

1 Einleitung

1.1 Beitrag

Diese Veröffentlichung beschreibt ein neuartiges modulares autonomes Messsystem zum Vermessen von Fugen mit den Charakteristiken Spalt und Übergang an einer Automobilkarosserie. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die einzelnen Software- und Hardwarekomponenten modular über eindeutige Schnittstellen kombiniert werden.

Die geforderte Toleranz an das Gesamtsystem liegt bei ± 4 mm in der Positionierung am Messpunkt in Relation zum CAD. Das bedeutet jeder vom Robotersystem angefahrenen und vermessene Punkt muss innerhalb von $T = \pm 4$ mm wiederholbar genau sein. Dafür wird in dieser Untersuchung eine Messsystemanalyse durchgeführt.

1.2 Gliederung

Diese Veröffentlichung ist in die folgenden fünf Kapitel gegliedert:

1. In Kapitel 2 wird der Stand der Technik für die Hauptkomponenten vorgestellt, wie auch die Verfahren erläutert und bewertet, die bisher für die Vermessung verwendet werden. Weiter werden vergleichbare Systeme und Verfahren der Spalt- und Übergangsmessung vorgestellt und beschrieben.
2. In Kapitel 3 wird das entwickelte und modulare Messsystem und die darin beinhalteten Komponenten durchleuchtet und analysiert. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die Referenzierungen geworfen, mit deren Hilfe die fahrbare Plattform einen Bezug zur der zu vermessenden Karosserie herstellt.
3. In Kapitel 4 werden sowohl die Versuchsaufbauten, die zur Feststellung der einzelnen Varianzen und Genauigkeiten führten als auch dessen Ergebnisse detailliert vorgestellt.

4. Im abschließenden Kapitel 5 wird ein Fazit über den aktuellen Stand der Entwicklung gezogen. Außerdem werden unterschiedliche Versuchsansätze und Lösungswege diskutiert und für die Zukunft bewertet.

1.3 Einführung in die Spaltmessung

Die Spalt- und Übergangsmessung hat bei Automobilherstellern eine lange Tradition. Die Abmessungen zwischen Anbauteilen haben wichtige optische und funktionale Aspekte, wie Beyer (2008) beschreibt. Funktional sind Spalte wichtig, da sie, je nach Ausrichtung und Größe, wesentlich die Geräuschentwicklung, den Kraftstoffverbrauch, den Strömungswiderstandskoeffizienten, die Dichtigkeit und die Schließkraft beeinflussen. Sie garantieren die einwandfreie Funktion von Türen, Heckdeckeln, der Motorhaube und somit des gesamten Fahrzeuges. Der optische Aspekt betrifft vor allem den Kunden, denn je kleiner der Spalt, desto hochwertiger und dynamischer erscheint das Fahrzeug.

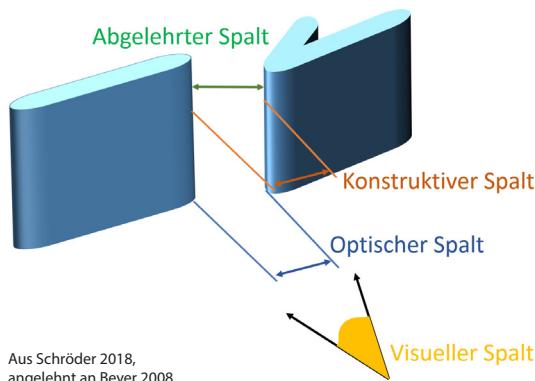


Abb. 1:
Verschiedene Betrachtungsarten eines Fahrzeugpalts

Die Anbauteile eines Fahrzeugs bilden fünf verschiedene Spalt-Geometrien, abhängig von Anbauposition und Anbauteil. Alle Geometrien können in vier Klassifikationen betrachtet und ausgewertet werden. In der Abb. 1 sind die verschiedenen Betrachtungsarten dargestellt. Geometrisch unterschieden wird zwischen einem konstruktiven Spalt (braun) und einem abgelehrten Spalt (grün). Ist der Spalt-Übergang null, liegt der abgelehrte Spalt auf dem konstruktiven Spalt. Der optische Spalt (blau) beschreibt den Abstand der Spiegelpunkte, wo hingegen der visuelle Spalt den vom Betrachter wahrgenommenen Verlauf der Baukonturen zeigt. Jede dieser vier Betrachtungsarten hat seinen Nutzen im Entstehungsprozess eines Neuwagens. Diese beginnt mit der Konstruktion und geht über die Produktion bis hin zum qualitativen Eindruck des Kunden zum Design.

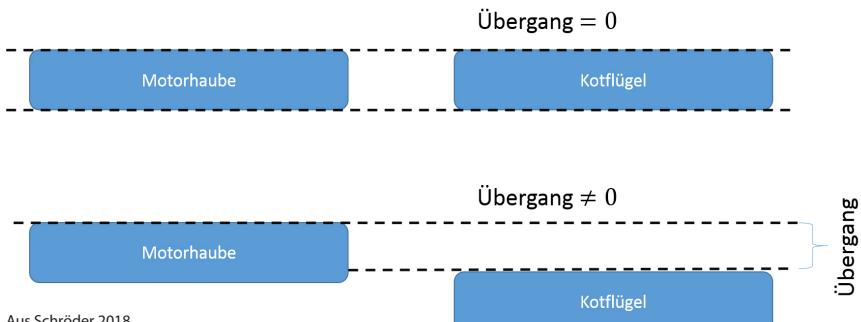


Abb. 2: Übergang der Anbauteile am Beispiel Motorhaube zu Kotflügel

Der Übergang zwischen Anbauteilen ist das zweite eine Fuge beschreibende Merkmal und ist definiert als vertikaler Abstand der Bauteile zueinander. In [Abb. 2](#) ist schematisch der Übergang zwischen Kotflügel und Motorhaube dargestellt. Der perfekte Übergang liegt bei 0 mm vertikaler Verschiebung. Da einige Anbauteile des Fahrzeugs absichtlich falsch ausgerichtet werden, um einen aerodynamischen Vorteil zu erzielen, der den Strömungswiderstandscoefficienten verringert, sind Übergänge $\neq 0$ teilweise erwünscht. Je größer der Übergang, also die vertikale Verschiebung, desto größer wird der abgelehrte Spalt. Durch Simulationen wird in den frühen Entwicklungsphasen eines neuen Fahrzeuges der Übergang zwischen Anbauteilen so festgelegt, dass Strömungskoeffizient und Geräuschentwicklung optimal werden.

Spalt und Übergang können auf zwei verschiedene Arten bestimmt werden. Die Unterscheidung erfolgt in Bezug auf den Kontakt mit dem Messobjekt. Folglich gibt es Kontakt- und Berührungsmethoden (taktile Messmethoden) sowie kontaktfreie Methoden. Erstere kann nur von einem Mitarbeiter unter Zuhilfenahme einer Schablone oder Fühlerlehre definiert in DIN (2014) durchgeführt werden und ist bisher nicht automatisiert durchführbar. Die kontaktlosen Methoden können und werden auch automatisiert von Robotern gemessen. In den folgenden zwei Abschnitten sind die einzelnen Verfahren erläutert.

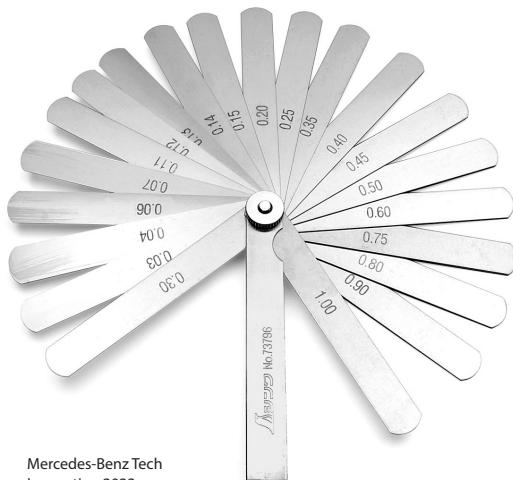
1.4 Taktile Spaltmessmethoden

Die taktile Spalt- und Übergangsmessung wird durch Fühlerlehren oder Schablonen, die ausschließlich für den zu messenden Punkt hergestellt werden, realisiert. Die Messpunkte werden vorher definiert, die dazugehörigen Spaltkonturen und Geometrien liefert das CAD-Modell. Die Geometrien und Maße des CAD-Modells werden in ein Programm für CNC-Fräsen übertragen. Den

Anweisungen des fertigen CNC-Programmes gemäß wird im Anschluss eine Delrinplatte (thermoplastischer Kunststoff) mit den Messpunkt-Konturen gebräst.

Eine weitere Möglichkeit zur taktilen Spaltmessung ist die Fühlerlehre. Sie besteht aus mehreren Blech- oder Kunststoffstreifen, die ihr eigenes Maß halten. Die Abb. 3 zeigt eine solche Fühlerlehre. Der Messvorgang besteht aus dem

Einführen des passenden Fühlers in den Spalt und dem anschließenden Ablesen des Messwertes, der auf den jeweiligen Führer gedruckt ist. Mit Schablonen und Fühlerlehrnen kann eine Genauigkeit von bis zu 0,05 mm erreicht werden. Entscheidend ist jedoch je nach Fugenverlauf auch die Genauigkeit mit der am exakten Messort gemessen wird. Hier sind durch den Einfluss der manuellen Messung durch einen Mitarbeiter sehr hohe Schwankungen möglich, beschreibt Mercedes-Benz Tech Innovation (2022).



Mercedes-Benz Tech
Innovation 2022

Abb. 3: Fühlerlehre zur Spaltmaßbestimmung

1.5 Kontaktlose Messmethoden

Die berührungslosen Verfahren verwenden Triangulationssensoren bestehend aus Laserlinie und Kamera. Die aufgenommenen Kamerabilder werden unter optimalen Bedingungen nur aus der ausgesendeten Laserstrahlung belichtet. So kann die Kontur des Spalts mit Hilfe von Software und implementierten Algorithmen berechnet werden. Grundsätzlich gibt es auch hier zwei Verfahren, um den Spalt kontaktlos zu überprüfen. Das erste heute gängige und automatisierte System besteht aus zwei fest zueinander ausgerichteten Sensoren (Abb. 4 rechts). Das sogenannte Doppelkopfsensor-Prinzip basiert auf zwei Triangulationssensoren und einer Adaptierung, die für verschiedene Roboterflansche angepasst werden kann. Das manuell vom Mitarbeiter auszuführende Mono-system, das aus einem Sensor besteht, der um den Spalt gekippt wird (z.B. CalibriGap, Hexagon 2022), ist in Abb. 4 links dargestellt. Durch die Verkipfung um den Spalt lässt sich ein zweidimensionales Bild der Kontur nach dem

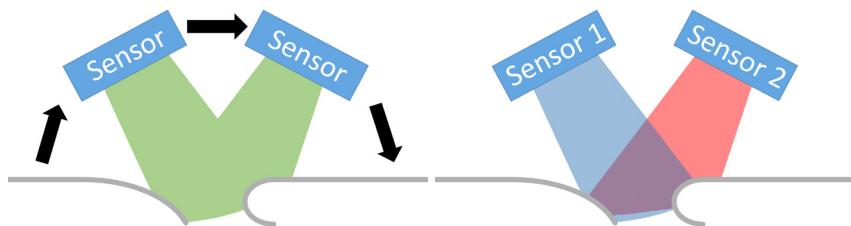


Abb. 4: Links: Monosystem: ein Sensor wird um den Spalt geschwenkt, um ein Spaltprofil zu erzeugen. Rechts: Stereosystem: zwei Sensoren, die gleichzeitig messen, um ein Spaltprofil zu erzeugen

Aus Schröder 2018, angelehnt an Beyer 2008

Structure-from-Motion-Prinzip erstellen. Einen guten Überblick bietet Civera et al. (2012), die das Structure-from-Motion-Verfahren mit Hilfe eines Kalman-Filters untersuchen. Nachteilig ist jedoch die kaum mögliche Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, da die Messung durch einen Mitarbeiter niemals an derselben Stelle erneut durchgeführt werden kann, exakt wie bei den taktilen Messmethoden.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel fasst zusammen, was bisher an Messsystemen und Verfahren in den einzelnen Fertigungsschritten verwendet wird und zeigt auch die Potenziale der jeweiligen Komponenten auf. Zusätzlich werden die Module des titelgegebenen Qualitätssicherungssystems vorgestellt.

2.1 Fugenmessende Systeme und Verfahren in der Automobilproduktion

In diesem Abschnitt werden die automatischen Spaltmessanlage (SMA), das Spaltmessen mit mobilen Einheiten (SME) und die manuelle Spaltmessung in drei Kategorien vorgestellt und erläutert.

2.1.1 Spaltmessanlage

Die vollautomatisierte Spaltmessanlage wird ausschließlich an einem Fertigungsband eingesetzt und ist mit Schutzzäunen gesichert. Das bedeutet die Umgebung wurde an die Robotik angepasst um Messfähigkeit sicherzustellen. Eine Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) ist somit ausgeschlossen. Die Aufgabe der SMA besteht in der Messung der charakteristischen Kenngrößen an Fugen zwischen

den Anbauteilen. Messungen werden sowohl im getakteten (stehende Fahrzeuge) als auch im fortlaufenden (bewegte Fahrzeuge) Betrieb durchgeführt. Der für die SMA-Anwendung verwendete Roboter ist der KUKA-Industrieroboter KR150, KUKA (2022a). Die Spaltmessanlage verwendet Laser-Triangulations-Sensoren im Doppelkopfaufbau, die mit einem roten und einem blauen Laser arbeiten. Die Einmessung des Fahrzeuges erfolgt mit einem Kamerasystem, das auf markante Karosserieteile ausgerichtet ist, um die Positionierung der Karosserie auf dem Förderband zu ermitteln.

2.1.2 Spaltmessen mit mobilen Einheiten

Die SME ist die mobile Variante der SMA. Die angewandten Messverfahren sind identisch. Es wird aber ein größerer Wert auf die Mobilität der Anlage gelegt. Dafür wird ein Leichtbauroboter LBR der Firma KUKA auf einem speziell von KUKA entworfenen Wagen, dem FlexFellow, montiert. Weitere Informationen zu den verwendeten Systemen bietet KUKA (2022b) an. Der FlexFellow hat ausreichend Stauraum für die Robotersteuerung, einen Messrechner und die Stromversorgung. Hiermit kann eine messende Einheit wesentlich kompakter als eine SMA aufgebaut werden. Dies geht jedoch zu Lasten der Erreichbarkeit, da der LBR, entgegen dem in der SMA verbauten Roboter, nur etwa ein Drittel des Arbeitsraumes abdeckt. Der verwendete Doppelkopsensor entspricht dem in Abschnitt SMA beschriebenen System. Die Spaltmessung mit mobilen Einheiten wurde über die vergangenen Jahre stetig weiterentwickelt und rundet nun ihr Portfolio mit einer bandsynchronen und einer selbstfahrenden Variante ab. Alle verwenden jedoch identische Sensoren wie die SMA, und sind daher nur für die Messung von Rohbau, bzw. lackierten Karosserien geeignet. Glas, spezielle Automobilkunststoffe und Chrom können nicht ohne weiteres gemessen werden. Die abschließende Messung, dass sogenannte technische Produktaudit erfolgt aus diesem Grunde mit einem handgeführten Scanner und speziellem Kreidespray. Dieses System wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

2.1.3 Manuelle Spaltmessung

Hierzu wird der CalibriGap Sensor der Firma Hexagon eingesetzt, weitere Informationen bietet Hexagon (2022). Dieser besteht aus einem Lasertriangulationssensor und einem Abstandshalter in Form einer Metallschiene. Der Sensor arbeitet mit einem roten oder einem blauen Laser, das ihm eine Unabhängigkeit der Oberflächenfarbe schafft. Er kann jedoch nicht auf Chrom oder Automobilglas messen. Für eine Messung von transparenten oder spiegelnden Flächen wird deshalb ein spezielles selbstaflösendes Kreidespray verwendet. Dieses wird vom Mitarbeiter an den genannten Stellen appliziert und im Nachgang auf



Abb. 5: CalibriGap-Sensor zur manuellen Spaltmessung

der dünnen Kreideschicht gemessen. Zusätzlich wird die Position aller Messorte von Hand mit speziellen Schablonen angezeichnet. In Abb. 5 wird das System während einer Messung gezeigt. Das CalibriGap-System wird zur Messung um den Spalt geschwenkt. Dabei darf sich der Abstand nicht verändern. So wird ein dreidimensionales Profil aus den aufgenommenen Bildern berechnet. Dies funktioniert ähnlich wie beim Doppelkopf Sensor mit einer relativen Orientierung der Bilder zueinander. Das zugrundeliegende photogrammetrischen Auswerte-Konzept Structure-from-Motion ist in Civera et al. (2012) ausführlich beschrieben. Aufgrund des zeitlichen Aufwands für Anzeichnen, Maskieren und Messen wird die manuelle Spaltmessung ausschließlich abseits der Fertigungsbänder eingesetzt. Der Messvorgang mit von Hand geführten Sensoren wird stark vom Menschen beeinflusst, weshalb in Zukunft ein automatisiertes System auf einem QM-Arbeitsplatz die Qualitätssicherung anhand von Stichproben übernehmen soll.

3 Systemvorstellung

Das Kapitel ist anhand der Abb. 6 hervorgehobenen Komponenten strukturiert, es werden die einzelnen Systemkomponenten vorgestellt und beschrieben, sowie in ein Verhältnis anhand der Schnittstellen gesetzt. Der Begriff SME-SL setzt sich aus SME (Spaltmessen mit mobilen Einheiten) und aus SL (selbstfahrend, lang) zusammen und ist die Weiterentwicklung der SME-S (selbstfahrend).

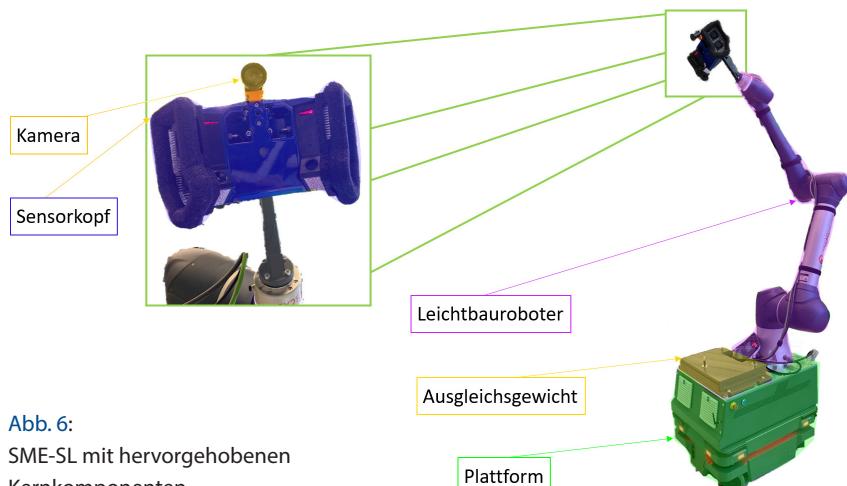


Abb. 6:
SME-SL mit hervorgehobenen
Kernkomponenten

3.1 Plattform

Die Plattform der Firma MIR gilt als agil, anpassbar und relativ umgebungsunabhängig. Es wird die MIR 250 verwendet. Sie bietet eine Traglast von 250 kg und ist deshalb auch für das Gewicht des Leichtbauroboters geeignet. Weitere Informationen sind in MIR (2022) zusammengefasst. Das AMR (autonom mobile robot) navigiert selbstständig auf einer bekannten Karte anhand des SLAM-Navigation Algorithmus. Dafür stehen der Plattform zwei Sick Laser-scanner mit Sicherheitstechnik zur Verfügung. Zusätzlich besitzt das AMR eine Stereokamera im Frontbereich, die auch überhängende Objekte erkennt und einigen Ultraschallsensoren für die Fahrt in beengter Umgebung. Das Ziel der Plattform ist es, den Leichtbauroboter in eine Position am Fahrzeug zu bringen, damit dieser möglichst vielen Messschnitte erreichen kann. Auf der fahrbaren Plattform ist ein Aufbau angebracht, der einen Messrechner, ein IO Modul und die Steuerung des Roboterarms beinhaltet. Im Datenblatt des AMRs wird die Genauigkeit, mit der die Plattform an einen Punkt auf der Karte fahren kann, mit ± 10 cm angegeben. Mithilfe eines Bosch Entfernungsmessers (siehe PLR 30C 2022), als Referenzsystem wurden verschiedene Positionen mit dem AMR angefahren um als Ergebnis die Genauigkeit der MIR zu bestätigen. Basierend auf diesem Versuch kann für die MIR Plattform eine Varianz von ± 10 cm angenommen werden.

3.2 Zusatzgewicht

Das Zusatzgewicht dient einem Ausgleichsgewicht ähnlich dem eines Kranes. Durch den sehr kurzen Radstand und die Antriebstechnologie mit einem zentralen Panzerantrieb ist die Plattform nicht für den verhältnismäßig langen Roboter geeignet. Um eine Stabilität auch bei ungünstigen Roboterfahrten zu garantieren, wurden etwa 80 kg zusätzliches Gewicht in Form von Stahlplatten auf der Plattform befestigt. Hierdurch kann auch bei schneller Fahrt und Not-Aus-Situationen ein Umkippen der Plattform vermieden werden.

3.3 Leichtbauroboter

Der Leichtbauroboter der Firma Doosan ist mit 1700 mm und einer Traglast von 20 kg einer der größten seiner Art. Er ist durch die Achsmomentüberwachung sensitiv hinsichtlich Kollisionen und kann daher auch in einer Mensch-Roboter-Kollaboration eingesetzt werden. Der Doosan H2017 wiegt rund 70 kg, weitere Informationen bietet Doosan (2022). Bedient wird der Leichtbauroboter mit einem Tablet, dass an der Steuerung angeschlossen ist. Er verfügt zusätzlich über eine C⁺⁺-Schnittstelle, die verwendet werden kann um den Roboter auch ohne das Bedientablet zu nutzen. Ein dafür entwickelter Treiber ist Teil der Applikation SME-SL. Die Wiederholgenauigkeit des Doosan ist mit $\pm 0,15$ mm angegeben und wurde im Verlauf der experimentellen Versuche unter Zuhilfenahme des Sensorkopfs bestätigt.

3.4 Sensorkopf

Der Sensorkopf der Firma minikomp Bogner kombiniert zwei Wenglor UV-Triangulationssensoren mit einer aktiven Temperaturüberachtung und Kühlung, da UV-Dioden als sehr temperaturempfindlich gelten. Der Sensorkopf wiegt 3,3 kg und verwendet eine Wellenlänge von 375 nm in einem Messbereich von 10 cm (X) und 20 cm (Z). Die UV-Sensor-Module arbeiten nach dem gleichen Funktionsprinzip wie herkömmliche, im Automobilbau häufig verwendete, Triangulationssensoren. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 7 dargestellt.

Die Abb. 7 zeigt wie anhand eines bekannten Triangulationswinkel ein ausgesendetes Laserlicht auf einem CMOS Sensor aufgenommen werden kann, um hoch genaue Profile eines Objektes zu erzeugen. Die Auflösung des Wenglor-Sensors ist mit 3,2 bis 14 µm in Z und 26 bis 55 µm in X angegeben, siehe Wenglor (2022b).

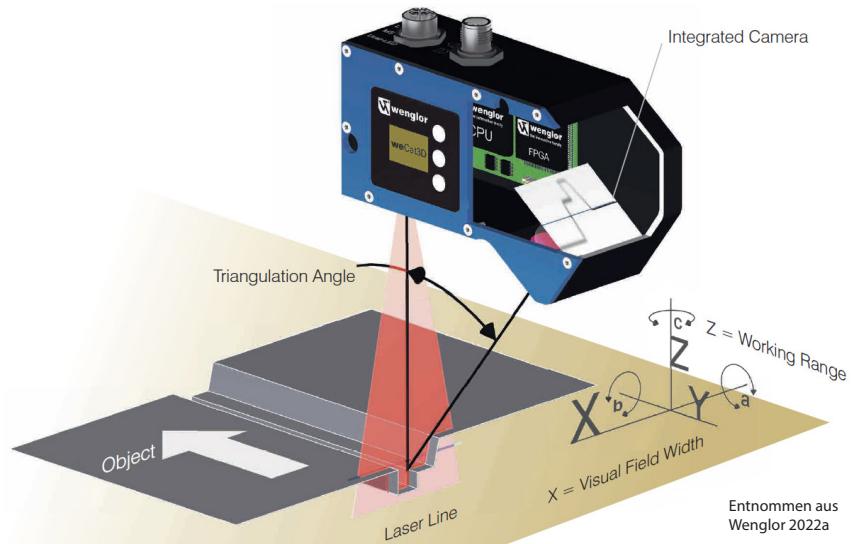


Abb. 7: Funktionsweise des Triangulationssensors am Beispiel der Wenglor WeCat Familie

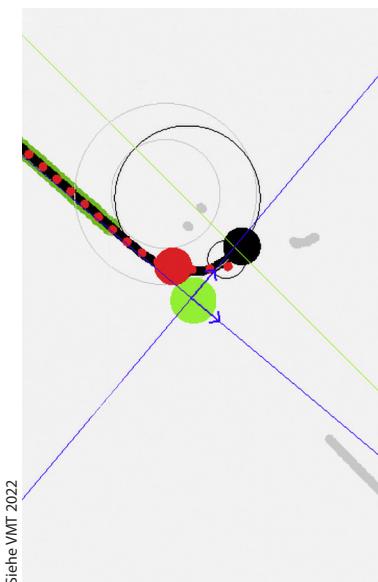


Abb. 8: Ausgewertetes Spaltprofil im ContourClient von VMT

Zur Auswertung des durch den Sensorkopf aufgenommenen Profils wird die Best-Fit-Software der Firma VMT verwendet. Die aufgenommenen Sensordaten werden anhand der Spaltgeometrie ausgewertet, um Spalt und Übergang zu ermitteln. Ein ausgewertetes Spaltprofil ist in Abb. 8 dargestellt. Zur Berechnung des Virtuellen Spaltpunktes (VGP), welcher in Grün dargestellt ist, wird im hier dargestellten Beispiel ein Kreis berechnet. Die Kreisparameter ergeben sich durch die reale Geometrie am Fahrzeug und beziehen Fertigungsmerkmale mit ein. Der rote Punkt markiert dabei den Radius einlauf und der schwarze das Ende der Kontur. Zwischen diesen Punkten wird der Kreis in die aufgenommene Kontur geschätzt. Der virtuelle Spaltpunkt sowie das in blau dargestellte Fadenkreuz dienen zur Überprüfung der Messortgenauigkeit und werden auch zur Referenzierung verwendet, welche in Kapitel 4 beschrieben ist.

3.5 Kamera

Die auf dem Sensorkopf montierte Kamera wird für die Referenzierung verwendet. Dabei wird ein Algorithmus von Daimler Protics benutzt, der die detektierten Kanten im Bild mit bekannten Kanten eines korrespondierenden CAD-Modells vergleicht und übereinanderlegt. Der Ursprung des CAD-Modells liegt im Fahrzeughalbspunkt, welcher sich wiederum in der Mitte der Vorderachse

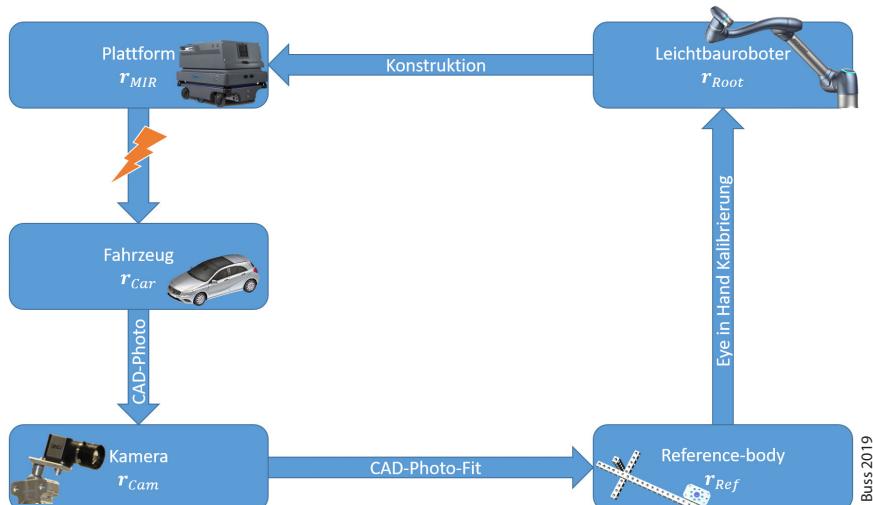


Abb. 9: Benötigte Transformationsschritte, um den Fahrzeughalbspunkt in Relation zur SME-SL zu bestimmen

befindet. Durch das abgestimmte CAD-Modell kann der Fahrzeughalbspunkt im Bild berechnet werden und durch die bekannte Orientierung der Kamera zum Roboterursprung, ist das System nun in der Lage, den Standort des Fahrzeugs in Roboterkoordinaten zu berechnen. Der Transformationspfad ist in Abb. 9 dargestellt, weitere Informationen liefert Buss (2019) und Scheer et al. (2019).

Die in der Grafik gezeigte Eye in Hand Referenzierung wird in Kapitel 4 ausführlich beschrieben und ist eine der größten Neuerungen zur SME-S, die in Schröder (2018) vorgestellt wird.

3.6 Schnittstellen

Abgesehen von den auf Abb. 6 dargestellten Hardwareschnittstellen und Montagepositionen der einzelnen in diesem Kapitel vorgestellten Komponenten, wer-

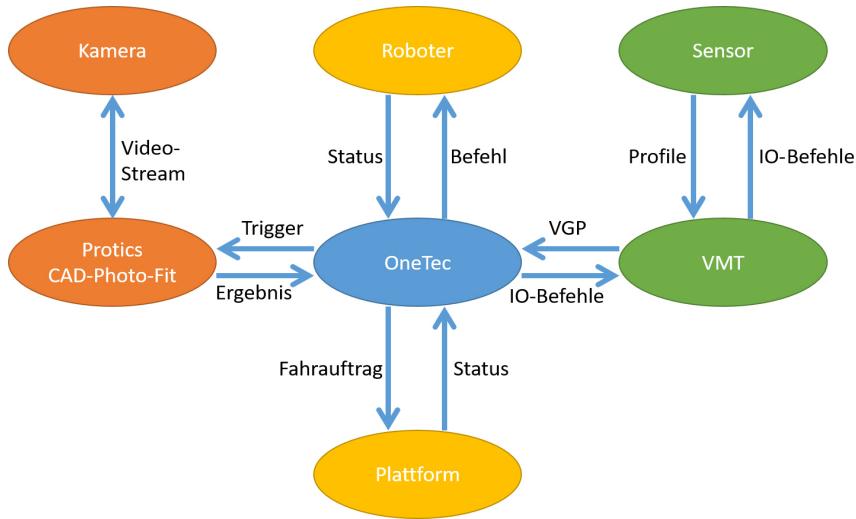


Abb. 10: Schnittstellen der SME-SL anhand der Subsysteme, VMT, Protics und OneTec

den in Abb. 10 die Softwareschnittstellen sowie der benötigte Datenfluss zwischen den einzelnen Subsystemen dargestellt.

Die unterschiedlichen Schnittstellen lassen sich am anhand des in Abb. 11 dargestellten Messablaufes erläutern. Im ersten Schritt (1) fährt die Plattform von der Ladestation auf eine Position, in der der Roboter in der Lage ist anhand der Kamera das gesamte Fahrzeug aufzunehmen. Hierbei wird von der OneTec Software zuerst eine Bewegung der Plattform kommandiert und sobald die Plattform die Position erreicht hat und dies an OneTec meldet, wird die Roboterbewegung gestartet. Hat der Roboter seine Position erreicht, wird das an OneTec gemeldet. OneTec kommandiert im nächsten Schritt Protics, welches wiederum dann die Messung des Fahrzeugs mit dem oben erklärten Prinzip vornimmt (2). Anhand des zurück gelieferten Ergebnisses kann OneTec jetzt die nächste Plattform Position berechnen, da alle Messpunkte und Plattform Positionen in Fahrzeugkoordinaten bekannt sind.

Der zweite Schritt ist eine von OneTec kommandierte Bewegung der Plattform zur ersten Messpose (3). Dabei verwendet die Plattform eine autonome Navigation anhand SLAM und keinen vorgegebenen Graphen. An einer Messpose angekommen, wird der Roboter in eine Position gebracht um das Fahrzeug erneut mithilfe von Protics (4) zu messen. Hiermit werden der Genauigkeitsverlust durch die AMR Varianz minimiert. Anschließend wird der Sensorkopf an zwei Stellen des Fahrzeugs eine Messung mit Hilfe der VMT-Schnittstelle durchführen und anhand des VGP die Position korrigieren. Dieser Prozess ist in Kapitel 4 ausführlich beschrieben (5 und 6). Alle weiteren Messpositionen (7)

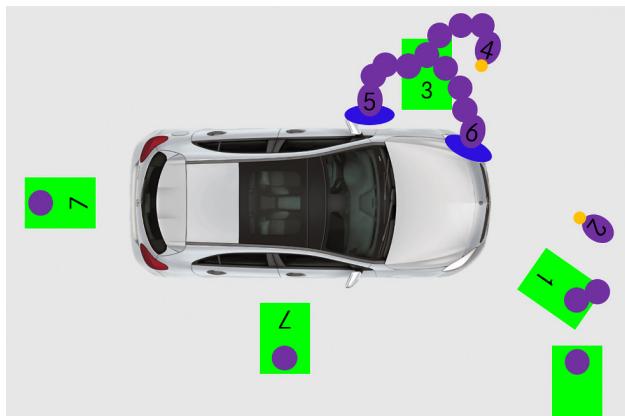


Abb. 11:
Messablauf der
SME-SL

werden nach demselben Prinzip abgearbeitet. Die vorliegende Vorgabe für die Messorttreue bei automatisierten Spaltmessanlagen fordert eine Messortgenauigkeit von ± 4 mm, durch die Referenzierungen am Spalt (VMT) und die erneute Referenzierung durch Protics an der Messposition erfüllt die SME-SL diese Vorgabe. Der Nachweis hierzu wird in Kapitel 4 erbracht.

4 Experimentelle Untersuchung

Dieses Kapitel beschreibt die Neuentwicklungen des Systems und bietet eine Genauigkeitsbetrachtung der SME-SL. Dafür werden die vorliegenden Prozessvorgaben beleuchtet und mit den Werten der SME-SL verglichen. Jedes Messsystem muss vor dem produktiven Einsatz eine MSA bestehen, wobei MSA Messsystemanalyse bedeutet. Die Daten einer aktuellen MSA werden in diesem Kapitel zusätzlich zusammengefasst vorgestellt.

4.1 Prozessvorgaben

Wie im vorherigen Kapitel bereits erwähnt, beläuft sich die relevante Vorgabe vor allem auf die Messorttreue. Diese muss innerhalb einer Toleranz von ± 4 mm liegen. Zusätzlich zur Messorttreue werden auch Toleranzangaben, die abhängig von der Spaltgeometrie sind, durch das interne Toleranzmanagement festgelegt. Der Fokus im Rahmen der SME-SL Entwicklung liegt jedoch auf der Position am Messort, da Triangulationssensoren in gleicher Bauart bereits erfolgreich in der Produktion verwendet werden. Dennoch wird für jede messende Anlage eine vollständige Messsystemanalyse (MSA) durchgeführt.

4.2 Kamerakalibrierung

Das Plattform Koordinatensystem kann als Referenzkoordinatensystem betrachtet werden. Die Kameramessung wird verwendet, um die Pose der Plattform relativ zum Fahrzeug zu berechnen. Notwendig ist es hierfür, die Kamera, welche am Sensorkopf befestigt ist, mittels der Eye-in-Hand-Kalibrierung, welche in Horau und Dornaika (1995) beschrieben wird, in einen Bezug zur Plattform zu bringen. Dafür wird auf der Plattform ein Kalibrierkörper angebracht, welcher von der Kamera erfasst werden kann.

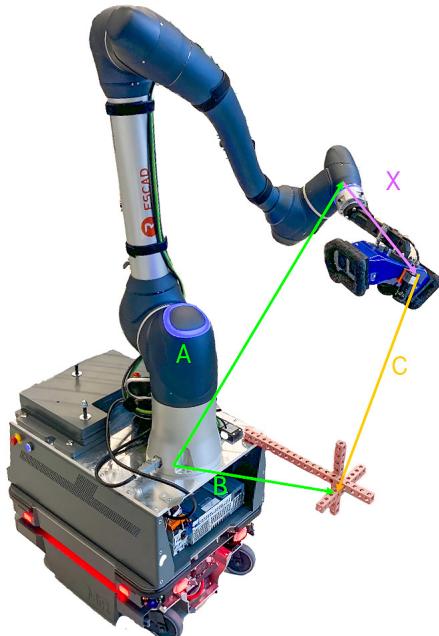


Abb. 12: SME-SL während der Kamerakalibrierung

schen Darstellung, welche mit Abb. 13 gegeben ist, werden die Anforderungen sichtbar.

Um die Transformation ${}^g T_c$ zu berechnen, werden mehrere Positionen ${}^b T_g^{(i)}$ angefahren, womit aus der Kameramessung ${}^c T_t^{(i)}$ folgt. Dieser Prozess wird mehrmals wiederholt $i \rightarrow j$, um eine möglichst präzise Schätzung der Transformation ${}^g T_c$ zu erhalten. Es ergibt sich daraus folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} {}^b T_g^{(1)} {}^g T_c {}^c T_t^{(1)} &= {}^b T_g^{(2)} {}^g T_c {}^c T_t^{(2)} \\ \left({}^b T_g^{(2)} \right)^{-1} {}^b T_g^{(1)} {}^g T_c &= {}^g T_c {}^c T_t^{(2)} \left({}^c T_t^{(1)} \right)^{-1} \\ A_i X = XB_i \end{aligned} \quad (1)$$

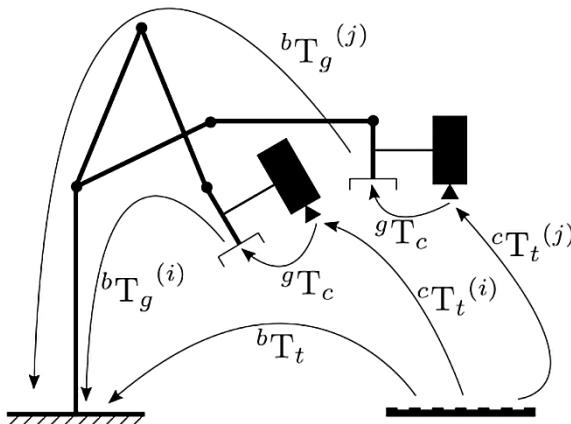


Abb. 13:
Schematische Darstellung der Eye-in-Hand-Transformation

Entnommen aus OpenCV 2022

Zur Lösung der Gleichungssystems sind mindestens zwei nicht parallel rotierte Roboterbewegungen nötig. Durch Versuche an der SME-SL wurden 30 bis 40 Bewegungen als praktikable Lösung ermittelt, da hier Aufwand und Restfehler in einem vertretbaren Rahmen sind. Für die Implementierung wird OpenCV verwendet, worin der vorherige Prozess ausführlich geschrieben ist. Weitere Informationen bietet OpenCV (2022). Die Referenzierung wird in regelmäßigen Abständen von der SME-SL gefordert und durchgeführt.

4.3 Sensorkalibrierung

Der Sensoraufbau wird anhand eines Prismas kalibriert, dass sich im messbaren Bereich der beiden Triangulationssensormodule befindet. Die Einbauposition der Sensormodule im Sensorkopf verändert sich mit der Zeit auf Grund der Temperatur oder Verschiebungen. Aus diesem Grunde ist die Kalibrierung regelmäßig durchzuführen. Der Prozess zur Kalibrierung des Sensorkopfes ist automatisiert und berechnet die Transformation zwischen den beiden von den einzelnen Sensoren aufgenommenen Profilen. Hierfür wird der Slave-Sensor mittels Translation und Rotation auf das Profil des Master-Sensors transformiert. Im Master wird die Spitze des Prismas als Koordinatenursprung definiert. Anschließend wird im Slave die Spitze ermittelt und die Transformation berechnet.

4.4 Referenzierung am Spaltmesspunkt

Die Referenzierung am Spaltpunkt wird mithilfe der Sensorprofile durchgeführt. Durch den oben beschriebenen Virtual-Gap-Point lassen sich die Koordinaten des Messortes bestimmen. Dafür wird ein Koordinatensystem in den virtuellen Spaltpunkt gelegt. Die Einheit fährt jetzt autonom zu ihrer Ladestation und dann zurück zum Messpunkt. Das Ergebnis ist ein Versatz zum vorherigen Messort. Die Abb. 14 zeigt die Oberfläche der Best-Fit-Software. Bei der erneuten Positionierung ergibt sich durch die verschiedenen Fehlerinflüsse ein Versatz zum vorhergehenden Messort.

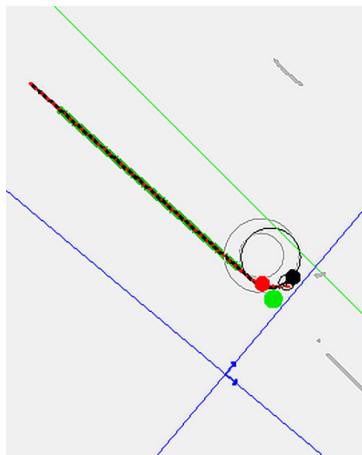


Abb. 14: Versatz VGP1 (Koordinatenkreuz) zu VGP2 (grüner Punkt)

Im optimalen Fall würde der Ursprung des Koordinatensystems bei jeder Wiederholungsmessung im virtuellen Spaltpunkt liegen. Das System liefert eine x - und y -Komponente je Messort, die den Versatz zwischen virtuellem Spaltpunkt und Referenzkoordinatensystem beschreibt. Dieser Versatz wird von der SME-SL in das Roboterkordinatensystem umgerechnet und korrigiert. Zur Validierung wird die Messung nach der Verschiebung erneut durchgeführt, als Kriterium für eine erfolgreiche Referenzierung gilt ein Versatz der Validierungsmessung kleiner 0,8 mm. Durch die Referenzierung an zwei unterschiedlich ausgerichteten Spaltmesspunkten können alle Translationen der Karosserie bestimmt werden.

4.5 Messorttreue

Die Messorttreue beschreibt mit welcher Varianz der vorgegebene Messpunkt an der Karosserie angefahren werden kann. Zur Überprüfung lässt sich das Prinzip der Referenzierung am Spaltmesspunkt aus dem vorherigen Abschnitt nutzen. Hierfür wird an jedem Messpunkt zusätzlich ein Virtual-Gap-Point als Referenz gesetzt, oben als blaues Koordinatenkreuz beschrieben. Alle Werte werden im Sensorkordinatensystem als x - und y -Versatz zur eingerichteten Referenz angegeben. Daraus folgen verschiedene Kategorien: (1) die Fahrt zur Messpose mittels AMR, (2) die Referenzierung auf die Karosserie anhand der Kamera, (3) die Referenzmessung vor der Korrektur, (4) die Validierungsmessung nach

Tab. 1: Einflussfaktoren auf die einzelnen Punkttypen sowie deren Fehlerspanne

Punkt Typ	Einflussfaktoren	Fehlerspanne
AMR-Fahrt	σ_{AMR}	$\pm 100 \text{ mm}$
Kameramessung	$\sigma_{Roboter}, \sigma_{AMR}$	$\pm 30 \text{ mm}$
Referenzpunkt	$\sigma_{Kamera}, \sigma_{Roboter}$	$\pm 20 \text{ mm}$
Validierungspunkt	$\sigma_{sensor}, \sigma_{Roboter}$	$\pm 1 \text{ mm}$
Messpunkt	$\sigma_{Roboter}$	$\pm 2 \text{ mm}$

der Korrektur und (5) die eigentlichen Messpunkte nach der Referenzierung. Die Tab. 1 zeigt die einzelnen Einflüsse auf die Positionen der drei Kategorien und gibt eine Fehlerspanne an.

Anhand der Tab. 1 lässt sich erkennen, dass die Plattform sehr ungenau positioniert und der Referenzierungsvorgang das Ergebnis bis auf einen Millimeter verbessert. Aufgrund von Rotationseffekten, die im Moment nicht berücksichtigt werden, folgt eine Messorttreue von $\pm 2 \text{ mm}$. Es besteht jedoch die Möglichkeit, zusätzliche Referenzierungspunkte an besonders herausfordernden Messorten (keilförmiger Spaltverlauf) zu nutzen.

4.6 Messsystemanalyse der SME-SL

Eine MSA besteht aus drei Schritten, welche für den Fall der SME-SL in Tab. 2 dargestellt sind. Das Verfahren basiert auf VDA (2021) mit geringen Anpassungen durch die Mercedes-Benz Tech Innovation (2022).

Wobei c_g das Messmittelpotenzial als

$$c_g = \frac{0,2 \cdot T}{4 \cdot \sigma} \quad (2)$$

beschreibt und mit c_{gk} der Fähigkeitsindex des Messmittels als

$$c_{gk} = \frac{0,2 \cdot T - |x_m - \bar{x}|}{2 \cdot \sigma} \quad (3)$$

angegeben wird. Wobei T die Toleranz, σ die Standardabweichung, x_m das Bezugsnormal und \bar{x} den Mittelwert der Messungen beschreibt. Durch die Formeln erklärt sich, warum nur in Schritt 1 der MSA ein c_{gk} -Wert bestimmt werden kann, da für den Fähigkeitsindex des Messmittels ein Bezugsnormal x_m

Tab. 2: Schritte der Messsystemanalyse der SME-SL

Schritt	Vorgehen	Anforderungen
1	≥ 30 Messungen eines kalibrierten Normspaltes	$c_g, c_{gk} > 1,33$
2	≥ 20 Roboterfahrten ohne AMR Bewegung	$c_g > 1,33$
3	≥ 20 Komplette Programmabläufe	$c_g > 1,33$

vorhanden sein muss. Die folgenden Abschnitte stellen einen MSA-Prozess in einem Labor an einer E-Klasse vor.

4.6.1 MSA Schritt 1

Der Sensor wird auf ein kalibriertes Frästeil mit bekanntem Spalt und Übergang ausgerichtet. Die Messung der Spaltprofile am Frästeil von 30 Profilen mittels VMT-Software wird statisch durchgeführt. Die ermittelten Werte für Spalt und Übergang werden in die aufgeführten Formeln (2) und (3) eingesetzt um c_g und c_{gk} zu bestimmen. Im Schritt 1 geht es um die Einhaltung der Vermessungstoleranz bei der Fertigung am Fahrzeug

Womit sich ergibt:

$$c_g^{Spalt} = \frac{0,2 \cdot 1}{4 \cdot 0,014} = 3,57 \quad (4)$$

$$c_{gk}^{Spalt} = \frac{0,1 \cdot 1 - |3,81 - 3,832|}{2 \cdot 0,014} = 1,39 \quad (5)$$

Analog ergibt sich für den Übergang:

$$c_g^{\text{Übergang}} = \frac{0,2 \cdot 1}{4 \cdot 0,003} = 16,67 \quad (6)$$

$$c_{gk}^{\text{Übergang}} = \frac{0,1 \cdot 1 - |0,8 - 0,855|}{2 \cdot 0,003} = 25,832 \quad (7)$$

Die Ergebnisse bestätigen das Bestehen der MSA für den Schritt 1.

4.6.2 MSA Schritt 2

Der Sensor liefert Werte, die in x - und y -Aufschluss über die Position am Spalt geben. Die z -Komponente wird anhand eines Maßbands an der Messstelle und der darauf vom Sensor projizierten Laserlinie bestimmt. Die Genauigkeit der Maßbandablesung reicht aus, um einen Unterschied in 0,5 mm-Schritten zu erkennen. Betrachtet man die Toleranzforderung von ± 4 mm reicht die Maßbandablesung für diesen Zweck aus. Als Toleranz ist hier die gesamte Systemtoleranz zu verstehen. Die Formel für c_g lässt sich auch ohne einen Nominalwert berechnen. Daher wird für die Positionierung in drei Freiheitsgraden (x, y, z) der c_g -Wert jeweils einzeln berechnet. Die Tab. 3 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tab. 3 zeigt, dass der Beispelpunkt in allen drei Freiheitsgraden die Kriterien der MSA Schritt 2 erfüllt. Der hohe c_g^z -Wert lässt sich durch die zweite Sensorreferenzierung an einem horizontalen Spalt erklären. Durch die vorherige Anpas-

sung der x -, y -Komponente ist die Positionierung während der z -Referenzierung kaum abhängig vom Spaltverlauf; daher resultieren die guten c_g^z -Werten. Der resultierende Vorteil ist, dass durch die vorgestellte Referenzierungsreihenfolge auch sehr keilförmige Spaltverläufe messbar sind.

Tab. 3: Messsystemanalyse Schritt 2 der SME-SL am Beispiel eines Spaltmesspunktes

Komponente	σ	c_g
x	0,1732 mm	2,3092
y	0,1842 mm	2,1709
z	0,0254 mm	15,7598

4.6.3 MSA Schritt 3

Der dritte Schritt der MSA beinhaltet mehrere zusätzliche Komponenten. In der Regel werden mindestens vier Fahrzeuge mehrfach gemessen um sicherzustellen, dass auch eine Repositionierung des Fahrzeugs in der Zelle sowie unterschiedliche Farben innerhalb der Toleranz messbar sind. Die Tab. 4 zeigt das Ergebnis von 20 Durchläufen an einem Fahrzeug.

Tab. 4: Messsystemanalyse Schritt 3 der SME-SL am Beispiel eines Spaltmesspunktes bei mehreren Programmabläufen

Komponente	σ	c_g
x	0,2494 mm	1,6038
y	0,2664 mm	1,5014
z	0,0754 mm	5,3066

Im dritten und finalen Schritt der Messsystemanalyse zeigt sich eine Verschlechterung der c_g -Werte in allen Freiheitsgraden. Das Ergebnis war zu erwarten, da die Plattform die größte Varianz in das System einbringt. Die MSA Schritt 3 im Labor gilt dennoch als bestanden, da alle $c_g > 1,33$ gilt.

5 Fazit

Das hier vorgestellte System zeichnet sich durch seine Modularität hinsichtlich Software- und Hardwarekomponenten aus. Durch die beschriebene Weiterentwicklung können auch die neuen gestiegenen Anforderungen erfüllt werden, so dass die funktionalen Eigenschaften der Spalte sichergestellt werden können.

Das zweistufige Referenzierungskonzept ermöglicht den Einsatz von Hardwarekomponenten mit deutlich höheren Toleranzen hinsichtlich ihrer Positioniergenauigkeit (in der Größenordnung von mehreren Zentimetern) bei gleichzeitiger Einhaltung der geforderten Messortgenauigkeit von ± 4 mm des Gesamtsystems.

Die Leistungsfähigkeit des Systems ist durch den Prozess der Messsystemanalyse gemäß VDA (2021) formal nachgewiesen. Somit wird die hier vorgestellte Anlage bereits in Serie eingesetzt und weitere Implementierungen sind in Planung. Ein weiteres Tätigkeitsfeld ist die weitere Flexibilisierung der Komponentenkombination zu einem Gesamtsystem, so dass die heute noch bestehenden Limitierungen hinsichtlich weiterer Varianten nicht durch Implementierung und Anpassung von Komponenten erfolgen muss, sondern durch Komposition dieser erfolgen kann.

Literatur

- Beyer, R., Becker, F., Schuler B., Mikeska H., Lehmann K. (2008): Spalt ist nicht gleich Spalt. INSPECT 02/2008.
- Bosch PLR 30C (2022): www.bosch-diy.com/de/de/p/plr-30-c-0603672100-v37743, letzter Zugriff 04/2022.
- Buss, R. (2019): Weiterentwicklung eines selbstfahrenden Messroboters für die Kontrolle von Spalt und Übergang an Karosserien. Masterarbeit am IIGS der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Daimler AG (unveröffentlicht).
- Civera, J., Davison, A. J., Montiel J. M. M. (2012): Structure from Motion using the Extended Kalman Filter. Springer Berlin Heidelberg.
- DIN (2014): DIN 2275:2014-03 Fühlerlehren, März 2014.
- Doosan (2022): www.doosanrobotics.com/de/products/series/h2017, letzter Zugriff 04/2022.
- Hexagon (2022): www.nextsense-worldwide.com/en/industries/automotive/manual-in-line-gap-measurement.html, letzter Zugriff 04/2022.
- Horaud, R., Dornaika, F. (1995): Hand-Eye Calibration. Int. Journal of Robotics Research Vol. 14, No.3, 195–210.
- KUKA (2022a): www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industriero-boter/, letzter Zugriff 04/2022.
- KUKA (2022b): www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industriero-boter/lbr-iiwa, letzter Zugriff 04/2022.
- Mercedes-Benz Tech Innovation (2022): Interne Informationen.

- MIR (2022): www.mobile-industrial-robots.com/solutions/robots/mir250/, letzter Zugriff 04/2022.
- OpenCV (2022): docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html, letzter Zugriff 04/2022.
- Scheer, F., Neumann, M., Wirth, K., Ginader, M., Yavuz, O., Müller, S. (2019): Evaluation of Model-Based Tracking and its Application in a Robotic Production Line.
- Schröder, T. (2018): Entwicklung eines sensorgestützten Verfahrens zum Referenzieren auf ein Messobjekt für einen selbstfahrenden Messroboter. Masterarbeit am IIGS der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit der Daimler AG (unveröffentlicht).
- VDA (2021): Mess- und Prüfprozesse. Eignung, Planung und Management, 3., überarbeitete Auflage, Juli 2021.
- VMT (2022): <https://vmt-vision-technology.com/358/automotive/spaltvermessung>, letzter Zugriff 04/2022.
- Wenglor (2022a): www.wenglor.com/medias/__secure__?mediaPK=9016421187614&attachment=true, letzter Zugriff 04/2022
- Wenglor (2022b): www.wenglor.com/de/2D-3D-Sensoren/2D-3D-Profilsensoren/2D-3D-Profilsensor/p/OPT3013, letzter Zugriff 04/2022.

Kontakt

Tobias Schröder | Johannes Baumgartl
Mercedes-Benz Tech Innovation & IIGS Universität Stuttgart
Wilhelm-Runge-Straße 11, 89081 Ulm
tobias.t.schroeder@mercedes-benz.com
johannes.baumgartl@mercedes-benz.com

Volker Schwieger
Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS)
Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart
volker.schwieger@iigs.uni-stuttgart.de

Erstmals seit der Covid-19-Pandemie wurde im Jahr 2022 das DVW-Seminar „Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren“ wieder als Präsenzveranstaltung durchgeführt. Es war das 208. DVW-Seminar, welches am 2. und 3. Juni 2022 an der Berliner Hochschule für Technik stattgefunden hat.

Die behandelte Thematik wird bereits seit vielen Jahren vom DVW und VDV in Seminaren behandelt. Standards, Normen und die inzwischen gut eingeführten DVW-Merkblätter setzen Rahmenbedingungen insbesondere für Prüfungen, Kalibrierungen und damit auch für die Qualitätssicherung. Dieser Band ergänzt die vorhandenen Arbeitsunterlagen für den Berufspraktiker.



ISBN: 978-3-95786-314-0



9 783957 863140

Schriftenreihe des DVW
Band 101 / 2022
Printversion: 31,60 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodesie.info

