Aspekte der Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen

Aspects of Quality Assurance of Multi-Sensor Systems

Jens-André Paffenholz, Hamza Alkhatib, Ulrich Stenz, Ingo Neumann

Der vorliegende Beitrag führt ein in die Qualitätssicherung von Multi-Sensor-Systemen (MSS). Ausgehend von der Motivation für die Qualitätssicherung wird in den weiteren Ausführungen deutlich, dass die Qualitätssicherung bei MSS im Allgemeinen und bei kinematischen MSS mit Laserscannern (k-TLS) als objekterfassender Sensor im Speziellen ein komplexes Zusammenspiel der beteiligten Sensoren sowie der Auswertealgorithmen ist. Dabei legen die Sensoren den Grundstein für die Qualität der Daten. Darauf aufbauend lassen sich durch einen an das Objekt angepassten Messprozess objektraumbasierte Einflüsse minimieren. Eine oder sogar die entscheidende Rolle bei einem MSS kommt der Sensorfusion zu. Die Bestimmung und Validierung von Qualitätsparametern spielt im Zuge der Qualitätssicherung eine entscheidende Rolle. Gezeigt wird eine Vorwärtsmodellierung auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen für einen terrestrischen Laserscanner sowie eine Rückwärtsmodellierung unter Nutzung von Referenzgeometrien für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS. Zu beiden Modellierungsvarianten werden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Schlüsselwörter: Qualität, Multi-Sensor-System, Sensorfusion, Laserscanner, Kalibrierung

This article introduces and motivates the quality assurance of multi-sensor-systems (MSS). It is shown that quality assurance for MSS in general as well as in particular for kinematic MSS with laser scanners (k-TLS) as object capturing sensors is a complex interoperation of the involved sensors as well as the data analysis process. The sensors form the fundament for the data quality. By a justified measurement process with respect to the object one can minimize object space based influences. One or the crucial role in the scope of MSS is related to the sensor fusion. The validation of quality parameters plays a crucial role in the scope of the quality assurance. A forward modelling based on Monte-Carlo simulations is shown for a terrestrial laser scanner. Also a backward modelling using reference geometries is discussed for an exemplary k-TLS based MSS. To both modelling variants results are presented and discussed.

Keywords: Quality, multi-sensor-system, sensor fusion, laser scanner, calibration

1 MOTIVATION

Der Einsatz von Multi-Sensor-Systemen (MSS) oder sogar verteilten Sensorplattformen zur effizienten Datenerfassung gewinnt immer mehr an Bedeutung. Der Grundgedanke von MSS liegt in der Kombination und Ausnutzung der individuellen Vorteile der beteiligten Sensoren und der daraus resultierenden Kompensation individueller Sensornachteile zur bestmöglichen Lösung von allgemeinen bis hin zu sehr spezialisierten Aufgaben. Als relevante Multi-Sensor-Systeme können dabei zum einen eine Kombination von mehreren Sensoren auf einer gemeinsamen Sensorplattform verstanden werden. Zum anderen kann ein MSS auch als Kombination von Sensoren verstanden werden, die durch direkte Messungen miteinander verbunden sind. Diese Definition unterscheidet sich von einer

kooperierenden Lösung von einzelnen Sensorknoten beispielsweise innerhalb eines Sensornetzes.

Die Motivation der Auseinandersetzung mit Aspekten der Qualitätssicherung im Kontext von MSS liegt in deren bisheriger und künftiger Akzeptanz begründet, die sehr eng mit der Qualität der Ergebnisse sowie der Zufriedenheit der Anwender verbunden ist. Im Zuge der Qualitätssicherung gilt es, die Einsatzfähigkeit und Leistungsfähigkeit der MSS nachzuweisen. Fundierte Aussagen zur Genauigkeit des MSS, zu den mit dem MSS erzielten Ergebnissen sowie Informationen zum Detailgrad der Objektdiskretisierung dienen beispielsweise als quantitativer Nachweis der Qualität gegenüber dem Kunden. Auch kommt der Steigerung der Effizienz bei der Auftragsdurchführung eine entscheidende Rolle zu. Hier können durch eine gewissenhafte Qualitätssicherung zeit- und kostenintensive Nachmessungen oder ggf. Nachbesserungen weitestgehend vermieden werden. Als weiteres Kriterium lässt sich eine Steigerung der Qualität anführen, die durch eine Optimierung der bisherigen Vorgehensweise auf Basis einer begleitenden Qualitätssicherung resultieren kann. Der Qualitätssicherung von MSS kommt somit eine immer herausragendere Bedeutung zu, wenngleich es sich hier um eine herausfordernde Aufgabe handelt. Dies begründet sich insbesondere durch die Tatsache, dass nicht der individuelle Sensor allein für die Qualität der Messergebnisse verantwortlich ist.

Vielmehr ergeben sich signifikante Einflussfaktoren aus der Sensorfusion im MSS sowie dem Messprozess zur Generierung des finalen Messergebnisses. Diese Einflüsse lassen sich in vier Kategorien unterteilen: die sensorbezogenen Effekte, die integrationsbedingten Einflüsse, die systembezogenen Größen und die Interaktion mit dem Objekt (vgl. auch /Hennes 2007/ sowie /Hennes & Heister 2007/).

Die sensorbezogenen Effekte sind dabei dem Instrument selbst zuzuordnen, wie beispielsweise Unsicherheiten in der Distanz- oder Winkelmessung und der individuelle Kalibrierzustand. Die integrationsbedingen Größen sind insbesondere in der Kalibrierung in Form einer Komponenten-, System- oder Selbstkalibrierung (Abschnitt 4) zu sehen. Innerhalb der Sensorfusion erfolgen Schritte wie die Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der relativen Position und Orientierung unter den beteiligten Sensoren. Die Sensorfusion beschreibt in diesem Kontext allgemein das Zusammenführen von Daten der Sensoren zu einem kombinierten Datensatz mithilfe von Auswertealgorithmen. Hierbei führen gleiche Sensortypen zu einer Redundanz und komplementäre Sensoren zu einer möglichen Kompensation von Schwächen und Stärken individueller Sensoren zur Verbesserung des Ergebnisses eines gemeinsamen Ziels. Der letzte Aspekt betrifft die Interaktion zwischen Sensor und Objekt, sodass insbesondere physikalische Einflussgrößen wie der Auftreffwinkel, die Objektrauigkeit und das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in das Material zu betrachten sind.

Zur Fokussierung des Beitrags soll ein besonderer Schwerpunkt auf MSS gelegt werden, bei denen ein Laserscanner der maßgeblich objekterfassende Sensor ist und sich das MSS darüber hinaus während der Datenerfassung in Bewegung befindet. In diesem Kontext resultiert das MSS aus der Sensorfusion des objekterfassenden Sensors sowie zwingend erforderlicher referenzierender Sensoren. Diese Sensoren, beispielsweise Navigationssensoren, wie inertiale Messeinheiten, und 3D-Positionssensoren, wie GNSS-Equipment, Tachymeter und Lasertracker, dienen der Bestimmung der zeitabhängigen Position und Orientierung des MSS im 3D-Raum. Mit Kenntnis der zeitabhängigen Position und Orientierung sowie der relativen Lage der individuellen Sensoren zueinander auf einer MSS-Plattform können die Daten der objekterfassenden Sensoren allgemein durch eine 7-Parameter-Transformation (3D-Position, 3D-Orientierung, Maßstab) in ein übergeordnetes System überführt werden. Diese Differenzierung zwischen objekterfassenden und referenzierenden Sensoren verschwimmt zunehmend, da auch objekterfassende Sensoren einen Beitrag zur Geo-Referenzierung leisten können, vgl. u. a. /Vennegeerts 2011/, der extrahierte Liniensegmente aus kinematisch erfassten 3D-Punktwolken zur Stützung der Rotationsanteile eines MSS einsetzt. Für in Bewegung befindliche beziehungsweise nichtstationäre MSS hat sich in Erweiterung des klassischen, statischen terrestrischen Laserscannings (TLS) die Bezeichnung kinematisches terrestrisches Laserscanning (k-TLS) durchgesetzt, für dessen grundlegendes Prinzip auf /Holst et al. 2015/ sowie /Neitzel & Neumann 2013/ verwiesen wird.

Die Vielzahl an verfügbaren Systemen im kommerziellen Bereich, u. a. /Frei et al. 2013/, /Riegl 2015/, sowie in der Forschungslandschaft, u. a. /Dorndorf et al. 2015/, /Keller & Sternberg 2013/, /Nüchter et al. 2013/, bestärkt weiterhin die Fokussierung auf die Qualitätssicherung k-TLS-basierter MSS. Beispielhafte Anwendungsgebiete finden sich unter anderem in der Ingenieurgeodäsie sowie der Dokumentation beziehungsweise Erfassung unserer Umwelt in 3D /Brenner et al. 2015/, /Heinz et al. 2015/, /Kuhlmann & Klingbeil 2015/, /Paffenholz 2012/. Darüber hinaus lassen sich insbesondere durch die technologische Entwicklung der Laserscanner /Reiterer et al. 2015/ und deren Fusion mit High-End-3D-Positionssensoren, wie dem Lasertracker, neue Anwendungsfelder für MSS identifizieren, z. B. bei der hochgenauen Dokumentation von Fertigungsprozessen /Dorndorf et al. 2015/. Die ganzheitliche Betrachtung der Qualitätssicherung für den gesamten Messprozess bis hin zum Messergebnis ist – nach bestem Wissen der Autoren – bisher kaum in Vorarbeiten zu finden. Eine Diskussion ausgewählter Kategorien von den sensorbedingten Effekten bis hin zur Interaktion mit dem Objekt werden u. a. von /Lichti et al. 2010/ für die Sensorkomponente und von /Zamecnikova et al. 2014, 2015/ für objektabhängige Faktoren gegeben.

Der vorliegende Beitrag gibt im Weiteren einen kurzen Abriss über die generellen Aspekte der Qualitätssicherung sowie der Beschreibung von Unsicherheiten. Darauf aufbauend wird die Qualitätssicherung von MSS eingeführt und für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS konkretisiert. Die Bestimmung von Qualitätsparametern wird einerseits als Vorwärtsmodellierung auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen für einen terrestrischen Laserscanner gezeigt und andererseits zur Validierung als Rückwärtsmodellierung unter Nutzung von Referenzgeometrien für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS diskutiert. Die Thematik des Qualitätsmanagements wird in diesem Beitrag nicht behandelt.

2 GENERELLE ASPEKTE DER QUALITÄTSSICHERUNG

Der Begriff der Qualitätssicherung ist in der DIN EN ISO 9000:2015 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe definiert.

Hier wird „Qualitätssicherung als Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen darauf gerichtet ist, dass Qualitätsanforderungen erfüllt sind“ /DIN EN ISO 9000 2015/ beschrieben. Das Erzeugen von Vertrauen erfolgt im Rahmen von geplanten sowie systematischen Tätigkeiten mit dem Ziel der Einhaltung von an die Qualität gestellten Anforderungen. Dabei wird die Summe aller Maßnahmen zur Sicherstellung einer konstanten Produktqualität unter Qualitätssicherung subsumiert.

Die Qualitätsbeschreibung von Prozessen im Allgemeinen basiert unter anderem auf folgenden gebräuchlichen Qualitätsmaßen: Verfügbarkeit der Informationen, deren Aktualität beziehungsweise Gültigkeitsdauer und -bereiche, Unschärfe und Risiko sowie der Nutzen von Handlungen und Entscheidungen. Bei der Fokussierung auf geodätische Messprozesse werden typische Maße wie Präzision, Genauigkeit, Auflösung und Sensitivität verwendet. Die jeweilige Definition der Maße ist in Normen, u.a. /DIN 1319-2:2005/ und /DIN 55350-13:1987/ geregelt. Eine explizite Wiedergabe sowie Diskussion soll an dieser Stelle nicht geführt werden, stattdessen wird für einen Überblick auf /Hennes 2007/ verwiesen. Nach /Hennes 2007/ wird die Qualität eines Messergebnisses bezüglich der Genauigkeit durch die quantitative Angabe (Parameter) der Messunsicherheit beschrieben. Somit ist ersichtlich, dass zunächst das Qualitätsmaß festgelegt werden muss, um es im zweiten Schritt mittels eines Qualitätsparameters quantitativ zu bewerten.

Die Beschreibung von Messabweichungen lässt sich in zwei Klassen gliedern: a) Zufällige Abweichungen, die aus nicht vorhersagbarer Variation von Einflussfaktoren unter vergleichbaren äußeren Bedingungen resultieren. Hierbei handelt es sich um nicht reproduzierbare Effekte /Bandemer 2006, S. 63 ff./. Es gelingt eine Reduktion zufälliger Abweichungen durch Wiederholungsmessungen unter gleichen Bedingungen und anschließender Anwendung geeigneter Aggregationstechniken /Grabe 2005/. b) Systematische Abweichungen, die aus nicht kontrollierbaren Effekten während der Messung und aus Vorverarbeitungsschritten der Messungen resultieren. Es kommt zu einer einseitigen Verfälschung der Messwerte. Der Effekt ist reproduzierbar, jedoch unbekannt /Grabe 2005/. Das systematische Verhalten lässt sich theoretisch modellieren beziehungsweise parametrisieren. Eine Eliminierung erfolgt dann auf Basis von Kalibrierprozeduren (Abschnitt 4). Aus praktischer Sicht ist dies aufgrund der fehlenden Referenz (eines übergeordneten Normals) jedoch oft nicht möglich oder zu aufwendig, sodass Messergebnisse auch durch systematische Abweichungen verfälscht sind.

Für die Bestimmung von Unsicherheiten in Messungen ist der Leitfaden GUM (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements) /JCGM 100 2008/ beziehungsweise dessen deutsche Fassung, die Vornorm /DIN V ENV 13005:1999/, international als Standard akzeptiert. Für den Zusammenhang zwischen der Zielgröße Y_n und der Einflussgrößen (auch Eingangsgrößen genannt) X_i ergibt sich: $Y_n = f(X_1, X_2, \ldots, X_n) = f(\boldsymbol{X})$. Ein Beispiel lässt sich anhand

der elektrooptischen Distanzmessungen eines Tachymeters aufzeigen. Hier steht *Y* für die Messgröße als vollständig korrigierte Distanz in der SI-Einheit Meter. Die Einflussgrößen sind z. B. gegeben durch: X_1: Strecke/m als Ausgabe am Gerät, X_2: Temperatur/°C, X_3: Luftdruck/hPa, X_4: Dampfdruck/hPa und X_5: Nullpunktkorrektion/m. Weiterführende Informationen im Umfeld der elektrooptischen Streckenmessung finden sich in /Neumann 2012/. Nach GUM erfolgt eine Einteilung der Unsicherheiten der Eingangsgrößen in zwei Kategorien: Typ A und Typ B, wobei beide Typen sowohl zufällige als auch systematische Abweichungskomponenten haben können /Koch 2008/, /Sommer & Siebert 2004/. Typ A umfasst Unsicherheiten, die aus der statistischen Analyse wiederholter Messungen gewonnen werden können. Es ist der beste Schätzwert für eine Zufallsvariable, die aus statistischen Methoden gewonnen werden kann. Zur Approximation der Verteilung der Zufallsvariablen wird eine ausreichend große Stichprobe vorausgesetzt. Anwendung findet häufig der Mittelwert mit seiner zugeordneten Standardabweichung. Typ B beschreibt Unsicherheiten, die nicht über statistische Analyse, sondern mit anderen Methoden gewonnen werden. Beispielhaft seien hier Werte aus vorherigen Messungen, Expertenwissen und Herstellerangaben genannt. Exemplarische Anwendung des GUM im Kontext des TLS finden sich u. a. in /Alkhatib et al. 2009/, die zusätzlich auch über die Unsicherheitsmodellierung von zufälligen und systematischen Effekten mittels Monte-Carlo- und Fuzzy-Techniken berichten, sowie in /Koch 2008/, der Unsicherheiten mittels Monte-Carlo-Simulationen untersucht.

3 QUALITÄTSSICHERUNG VON MULTI-SENSOR-SYSTEMEN

Die Anwendung der im vorangegangenen Abschnitt eingeführten Qualitätssicherung übertragen auf MSS führt in der Regel aufgrund der Vielzahl an beteiligten Sensoren und der damit verbundenen Einflussfaktoren zu einem komplexen, mehrstufigen Prozess. Um der Qualitätssicherung des Messergebnisses eine Aussagekraft zu verleihen, ist die Quantifizierung aller wirksamen Einflussgrößen von entscheidender Bedeutung. Eine Systematisierung der wirkenden Einflüsse lässt sich mithilfe eines Ursache-Wirkungs-Diagramms (Ishikawa-Diagramm) erreichen (*Abb. 1*). Gleichzeitig ermöglicht das Ishikawa-Diagramm eine Prüfung auf Vollständigkeit bei der Erfassung der Einflüsse. Der Hauptstrang des Ishikawa-Diagramms weist auf das Ziel und somit das Messergebnis des MSS. Die jeweiligen Seitenstränge repräsentieren die maßgeblichen Einflussgrößen, die auf das Ziel, hier das Messergebnis, wirken. Im Zuge der Qualitätssicherung von MSS lassen sich als Hauptstränge der Sensor, das Objekt, die externen Informationen bezüglich der Messumgebung, der Beobachter, der Messprozess und das Referenzsystem identifizieren. Die Haupteinflussgrößen wiederum gliedern sich in einzelne Komponenten, wobei die jeweiligen Parameter hier mehrfach vorkommen können. Es ist anzumerken, dass das Ishikawa-Diagramm jeweils auf das zu betrachtende MSS hinsichtlich der Einflüsse anzupassen ist. Eine individuelle Betrachtung für ein exemplarisches MSS erfolgt in Abschnitt 5.

4 EXEMPLARISCHE BETRACHTUNG ANHAND EINES K-TLS-BASIERTEN MSS

Der generelle Ablauf des Qualitätssicherungsprozesses eines MSS soll im Folgenden anhand der Qualitätssicherung der speziellen Realisierung eines k-TLS-basierten MSS aus /Hartmann et al. 2017/ gezeigt werden. Zunächst gilt es, dafür die Einflussfaktoren anhand des in *Abb. 1* gezeigten Ishikawa-Diagramms zu identifizieren. Das exemplarische k-TLS-basierte MSS in *Abb. 2* besteht aus einem Lasertracker Leica AT960-LR sowie einem Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) IMAGER 5006 mit adaptierter Leica T-Probe. Zur Generierung einer 3D-Punktwolke wird der auf einer beweglichen Plattform montierte Laserscanner an dem zu erfassenden Objekt vorbeigeschoben. Die Position und Orientierung der Platt-

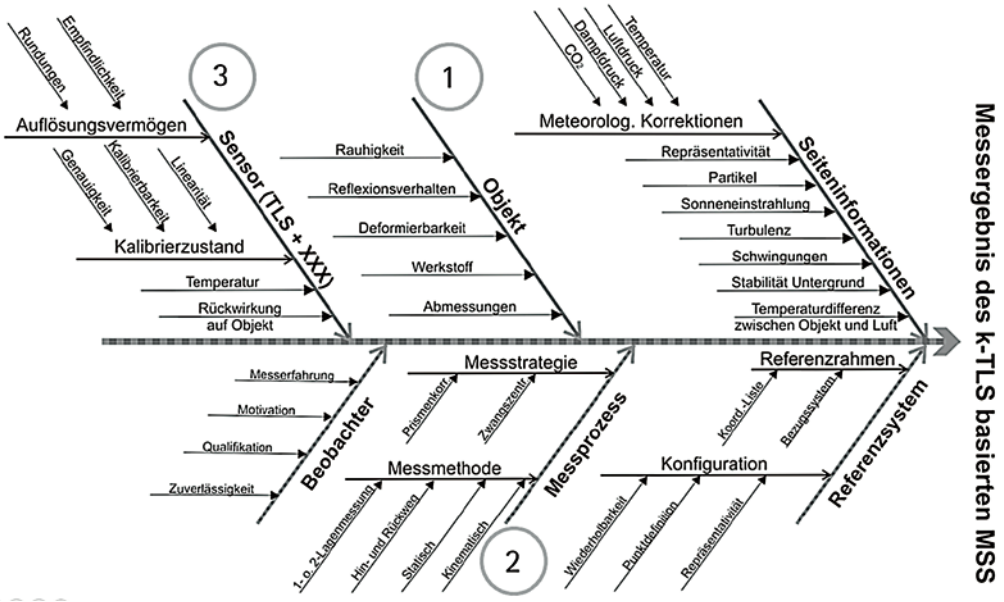

Abb. 1 | Ishikawa-Diagramm für die Qualitätssicherung der Messergebnisse eines k-TLS-basierten MSS nach /Hennes 2007/ und /Neumann 2012/

form, deren Bezugspunkt durch die T-Probe realisiert ist, wird durch Messungen des Lasertrackers zur T-Probe bestimmt. Mit einer nach /Hartmann et. al 2017/ durchgeführten Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der relativen Position und Orientierung der T-Probe zum Laserscannerzentrum lässt sich eine konsistente 3D-Punktwolke berechnen.

Die drei wesentlichen Einflussfaktoren auf das Messergebnis eines k-TLS-basierten MSS sind das zu erfassende Objekt, der Messprozess zur Generierung der Daten sowie die eingesetzten Sensoren. Im Vergleich zu den drei genannten Einflussfaktoren sind die externen Informationen bezüglich der Messumgebung beispielsweise der Einfluss der atmosphärischen Parameter auf die primären Messgrößen des TLS, das Referenzsystem sowie der Beobachter, Letzterer aufgrund des weitestgehend automatisierten Erfassungsprozesses von untergeordneter Bedeutung. Im Folgenden wird auf die Diskussion der drei wesentlichen Einflussfaktoren hinsichtlich möglicher, exemplarischer Komponenten fokussiert. Überträgt man diesen Gedanken auf die generelle Vorgehensweise für ein MSS, so sind alle relevanten Einflussgrößen zu identifizieren und als signifikant auf die Qualität wirkende Größen quantitativ zu bewerten.

Dem Objekt (*Abb. 1* (*1*)) kommt durch seine Oberflächenbeschaffenheit sowie dem Auftreffwinkel der laserbasierten Entfernungsmessung des TLS eine besondere Bedeutung zu, deren Einfluss u. a. von /Zamecnikova et al. 2014, 2015/ untersucht wurde. Einen weiteren Beitrag liefert das zeitliche und geometrische Verhalten des Objekts.

Der Einfluss des Messprozesses (*Abb. 1* (*2*)) wird insbesondere durch die gewählte Messstrategie, zum Beispiel zur Minimierung der objektbasierten Einflüsse, dominiert. So lassen sich durch die gezielte Erzeugung von senkrechten Auftreffwinkeln durch die Ausrichtung des Laserscanners innerhalb des MSS und das Abfahren einer entsprechenden Trajektorie diese Einflüsse auf das Messergebnis minimieren.

Durch die Sensorfusion innerhalb eines MSS trägt der Einflussfaktor Sensor (*Abb. 1* (*3*)) mit einer Vielzahl an Komponenten bei. Einerseits sind die individuellen Qualitätsmaße und -parameter, wie Genauigkeit der Messgröße und Abtastrate jedes beteiligten Sensors, zu berücksichtigen. Andererseits lassen sich systembezogene Qualitätsmaße und -parameter, wie die gegenseitige Kontrollierbarkeit der Sensoren, identifizieren. Weiterhin ist der Aspekt der Sensorintegration von entscheidender Bedeutung. Hier dominieren zwei wesentliche Komponenten: a) Die Synchronisation (zeitliche Referenzierung) aller beteiligten Sensoren, welche sich in die Einführung einer einheitlichen Zeitskala für alle Daten innerhalb des MSS und verbleibende Latenzzeiten aufgrund einer imperfekten Synchronisation teilen lässt. b) Die räumliche Referenzierung beziehungsweise geometrische Anordnung der Sensoren zueinander, was der Überführung der individuellen Sensorkoordinatensysteme in ein gemeinsames MSS-Koordinatensystem entspricht. Dieser als Kalibrierung bezeichnete Prozess kann durch drei unterschiedliche Strategien ausgeführt werden.

Als Komponentenkalibrierung bezeichnet, erfolgen eine Separierung aller Betrachtungen auf jeweils eine Messgröße sowie der Vergleich einer originären Messgröße mit Referenzwerten. Hierdurch ist eine klare Trennung aller Einflüsse bezogen auf die jeweilige Messgröße gegeben. Die Bestimmung der Kalibrierparameter erfolgt dann in der Regel durch einfache mathematische Modelle. Demgegenüber stehen im Allgemeinen (sehr) aufwendige Kalibrierprozesse, was insbesondere mit wachsender Sensoranzahl zu einer ineffizienten sowie kostenintensiven Vorgehensweise führt. Auch ist die Repräsentativität der Vorgehensweise für die jeweilige Anwendung nicht zwingend gegeben.

Im Rahmen einer Systemkalibrierung werden alle beziehungsweise mehrere Messgrößen in einem gemeinsamen Kalibrierprozess betrachtet. Der Vergleich mit Referenzwerten erfolgt auf Basis von abgeleiteten Größen, in der Regel Zielgrößen wie Koordinaten. Diese Vorgehensweise zeichnet sich durch weniger aufwendige Kalibrierprozesse und einer daraus resultierenden höheren Effizienz im Vergleich zur Komponentenkalibrierung aus. Demgegenüber steht eine erschwerte Trennung respektive Zuordnung einzelner Kalibrierparameter zu den individuellen Messgrößen sowie eine gesteigerte Komplexität der mathematischen Modelle zur Bestimmung der Kalibrierparameter. Ein Beispiel für eine Systemkalibrierung eines k-TLS-basiertes MSS zeigen /Dorndorf et al. 2015/.

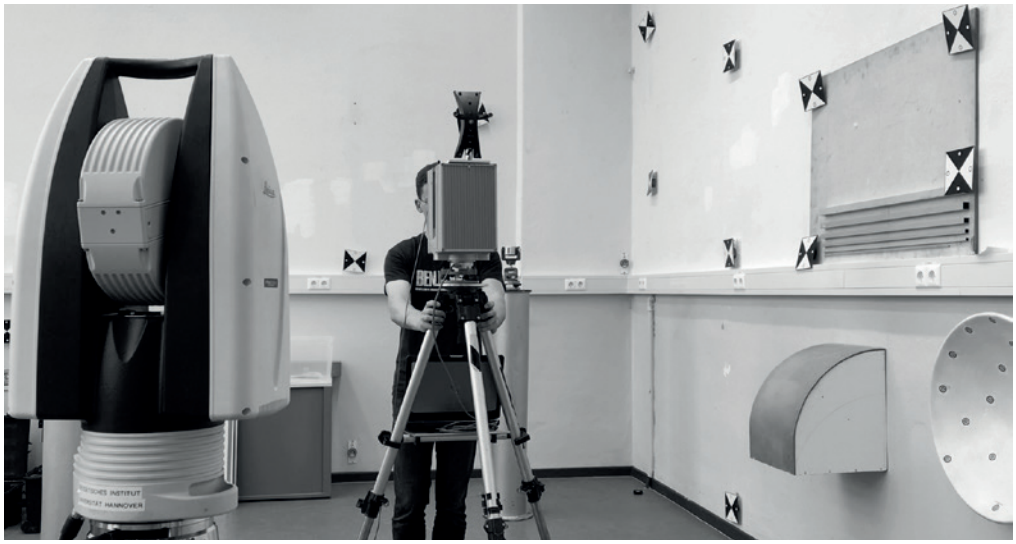

Abb. 2 | Beispielhaftes k-TLS-basiertes MSS, bestehend aus dem Laserscanner Z+F IMAGER 5006 mit adaptierter Leica-T-Probe (Mitte) und dem Lasertracker Leica AT960-LR (links) im 3D-Labor des GIH in der Vorbeifahrt an den Referenzgeometrien (rechts)

Die Selbstkalibrierung, auch als In-situ-Kalibrierung bezeichnet, ist eine Systemkalibrierung, die parallel bzw. zeitgleich zum Messprozess durchgeführt wird. Da keine separaten Kalibriermessungen notwendig sind, ist dies eine sehr effiziente Vorgehensweise, die insbesondere auch der individuellen Situation am Messort bei der Bestimmung der Kalibrierparameter Rechnung trägt. Ein Beispiel für die Selbstkalibrierung eines Laserscanners wird von /Holst & Kuhlmann 2014/ gezeigt.

5 BESTIMMUNG UND VALIDIERUNG VON QUALITÄTSPARAMETERN

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie für individuell relevante Einflussgrößen auf die Qualität eines MSS eine numerische (quantitative) Ableitung erfolgen kann. Hierbei wird zwischen einer Vorwärts- und Rückwärtsmodellierung unterschieden. Unter der Vorwärtsmodellierung wird die A-priori-Verfügung über Qualitätsparameter verstanden, die dann auf die relevanten Zielgrößen fortgepflanzt werden. Bei der Rückwärtsmodellierung werden Referenzmessungen mit übergeordneter Genauigkeit eingeführt und mit den Messungen des MSS verglichen. Aus den Abweichungen zwischen der Referenz und den Messungen des MSS erfolgt dann die Bestimmung der Qualitätsparameter. Hierbei ist zu beachten, dass die Rückwärtsmodellierung meist auf abgeleiteten Werten (Zielgrößen) zu erfolgen hat. Die Ergebnisse aus einer Rückwärtsmodellierung lassen sich für die Verbesserung der Vorwärtsmodellierung nutzen.

Die Bestimmung von Qualitätsparametern lässt sich gerade bei numerisch komplexen Fragestellungen und bei nichtlinearen Zusammenhängen im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen durchführen. Die Vorwärtsmodellierung ist charakterisiert durch das Treffen von Annahmen zu bestimmten und beschreibbaren Unsicherheitsquellen zur Ausschöpfung des gesamten Unsicherheitsbudgets (vgl. Abschnitt 3 und *Abb. 1*) und deren Fortpflanzung auf eine Zielgröße, wie beispielsweise Koordinaten oder ein flächenhaft modelliertes Objekt. Das Unsicherheitsbudget kann in der Regel nicht vollständig abgebildet werden, da bestimmte Unsicherheitsquellen ggf. nicht modelliert werden können, beispielsweise aufgrund fehlender Information zur Verteilung einer Zufallsvariablen oder aus Gründen der Vereinfachung. Bezogen auf einen exemplarischen Laserscanner erfolgt hier ausschließlich die Modellierung der Distanzunsicherheit, sodass Unsicherheiten des Auftreffwinkels oder Objekteigenschaften im vorwärtsmodellierten Unsicherheitsbudget unberücksichtigt bleiben.

Die Rückwärtsmodellierung zur Validierung von Qualitätsparametern zeichnet sich durch die Nutzung von Objektrauminformation aus, wie beispielsweise Referenzgeometrien mit bekannten Dimensionen und Abmessungen. Die Koordinaten und flächenhaften Informationen der Referenzgeometrien sind mit übergeordneter Genauigkeit bezogen auf das zu erwartende Unsicherheitsbudget des Prüflings zu bestimmen. Im Zuge der Rückwärtsmodellierung erfolgt keine Separierung des Gesamtunsicherheitsbudgets wie bei der Vorwärtsmodellierung, da mit aus Rohdaten abgeleiteten Informationen (z. B. Koordinaten) gearbeitet wird, in deren Unsicherheitsbudget individuelle Unsicherheiten kumuliert zu beobachten sind.

Im folgenden Abschnitt 5.1 wird die Vorwärtsmodellierung beispielhaft für einen terrestrischen Laserscanner im Einsatz bei lastinduzierten Verformungsmessungen gezeigt. Der Abschnitt 5.2 stellt dann die notwendige Infrastruktur für eine Rückwärtsmodellierung vor und diskutiert die Validierung des Unsicherheitsbudgets für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS.

5.1 VORWÄRTSMODELLIERUNG MIT MONTE-CARLO-SIMULATIONEN

Die im Folgenden vorgestellte Vorwärtsmodellierung zur Bestimmung von Qualitätsparametern nutzt Monte-Carlo-Simulationen zur flexiblen Modellierung und Fortpflanzung von Messunsicherheiten. Dies erfolgt im Einklang mit dem GUM /JCGM 100 2008/, /DIN V ENV 13005:1999/ und der Weiterentwicklung des GUM um Monte-Carlo-Simulationen /JCGM 101 2008/, /Siebert & Sommer 2004/. Exemplarisch werden die Unsicherheiten von 2D-Profilmessungen terrestrischer Laserscanner, dem typischen Messmodus beim Einsatz in k-TLS-basierten MSS, simuliert und auf die Zielgröße übertragen. Anschließend werden die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse der Auswertung einem realen Datensatz kritisch gegenübergestellt. Diese Modellierung der Unsicherheiten und deren Fortpflanzung auf die Messergebnisse sind für jede signifikante Einflussgröße des MSS vorzunehmen.

/Kutterer et al. 2010/ und /Alkhatib & Kutterer 2013/ stellen Strategien für die Untersuchung von 2D-Profilmessungen (Vertikalprofile mit einer Wiederholfrequenz von bis zu 50 Profilen/Sekunde) eines terrestrischen Laserscanners vor. Der reale Datensatz ist mit dem Ziel der Detektion von vertikalen Deformationen einer Autobahnbrücke im Rahmen von kontrollierten Belastungsszenarien mit einem terrestrischen Laserscanner vom Typ Z+F Imager 5006 erfasst worden /Liebig et al. 2011/. *Abb. 3* zeigt die Aufnahmekonfiguration der Messungen unterhalb der Autobahnbrücke, die im unbelasteten Zustand mit mehreren Wiederholungsmessungen erfasst wurde, um eine Referenzgeometrie von der Brücke zu erhalten. Hierfür wurden 2D-Profilmessungen mit einer Wiederholungsrate von 12,5 Profilen pro Sekunde durchgeführt, woraus 7 216 Punkte pro Epoche für einen definierten Abschnitt (blaue Markierung in *Abb. 3*) resultierten. 500 Epochen respektive 2D-Profile repräsentieren den unbelasteten Zustand der Autobahnbrücke. Die Zielgrößen Y_i sind die jeweiligen z-Koordinaten als Funktion der gemessenen Auftreffwinkel und Schrägstrecken. In /Alkhatib & Kutterer 2013/ wird das Simulationsverfahren allgemein eingeführt und an einem exemplarischen, realen Datensatz von 2D-Profilmessungen an einer Autobahnbrücke in Süddeutschland evaluiert.

Der funktionale Zusammenhang ist für einen horizontierten Laserscanner gegeben durch eine klassische polare Punktbestimmung über die originären Messgrößen Horizontalrichtung, Zenitwinkel und Schrägstrecke, wobei Erstere konstant ist. Zu Beginn werden für die Monte-Carlo-Simulation verschiedene Verteilungen, hier aus der Gruppe der Dreiecks-, Rechteck- und Normalverteilung, für die zu untersuchenden Einflussgrößen aus Erfahrungen, Untersuchungen und Annahmen festgelegt. Folgende Einflussgrößen mit ihren Verteilungsfunktionen werden berücksichtigt:

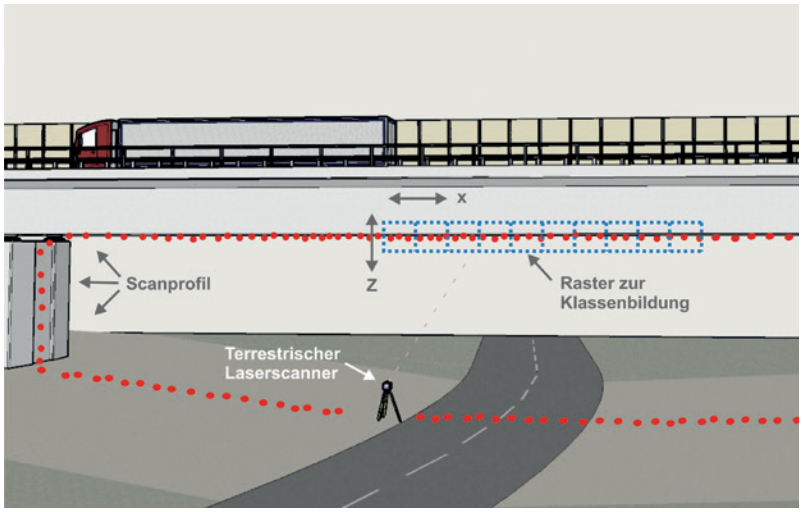

Abb. 3 | Aufnahmekonfiguration und Klassenbildung zur Auswertung einer 2D-Profilmessung /Liebig et al. 2011/. Der reale Datensatz bezieht sich auf den blau markierten Bereich mit einer Ausdehnung von ca. 20 m Länge und einer Höhe über dem Laserscanner von ca. 9,5 m

$$Y_i = f(X_1, X_2, X_3, X_4); \quad (1)$$

X_1: Unsicherheit der Distanz (Typ A, Normalverteilung), X_2: distanzabhängiger Anteil (ppm-Werte) der Unsicherheit der Distanzmessung (Typ B, Normalverteilung), X_3: Unsicherheit des Zenitwinkels (Typ A, Normalverteilung) und X_4: vertikale Auflösung des Zenitwinkels, gegeben durch die Schrittweite des Motors (Typ B, Rechteckverteilung).

Es wird eine große Anzahl (mindestens 100 000) von Stichproben der Einflussgrößen aus den Verteilungen $X_1 \sim N$ (0; 0,5 mm), $X_2 \sim N$ (0; 30 ppm), $X_3 \sim N$ (0; 10 mgon), $X_4 \sim U$ (0; 20 mgon) generiert und mit dem funktionalen Zusammenhang der 2D-Profilmessung in die Zielgröße Y_i, hier die z-Koordinaten der 2D-Profilmessungen, transformiert. Die ausgewählten Parameter der oben genannten Verteilungen der Einflussgrößen sind dem Datenblatt des Laserscanners Z+F Imager 5006 entnommen. Das Ergebnis der Simulation sind Verteilungen der generierten, transformierten Stichproben, aus denen sich statistische Momente höherer Ordnungen nummerisch berechnen lassen. Neben dem Mittelwert und der Standardabweichung (statistische Momente erster und zweiter Ordnung) werden die Schiefe und Kurtosis, auch als Wölbung bezeichnet (statistische Momente dritter und vierter Ordnung), berechnet. Das statistische Moment dritter Ordnung, die Schiefe, gibt Auskunft über die Symmetrie der Verteilung. Das statistische Moment vierter Ordnung, die Kurtosis, beschreibt die Wölbung und gibt an, ob die Verteilung im Gegensatz zur Normalverteilung spitz oder abgeflacht ist. Bei normalverteilten Daten nimmt die Schiefe den Wert 0 an, wogegen die Kurtosis den Wert 3 annimmt. Je weiter die Schiefe der Datenverteilung von 0 und deren Kurtosis von 3 abweicht, umso größer ist die Abweichung der Daten von einer Normalverteilung. Anschließend können die simulierten Unsicherheiten der Zielgrößen mit den abgeleiteten statistischen Momenten aus realen Messungen verglichen werden.

Für die empirische Schätzung der statistischen Momente der Zielgrößen in der Vorwärtsmodellierung wurden Simulationen mit den oben genannten Einflussgrößen X_1 bis X_4 berechnet. Für weitere Simulationsvarianten, die sich durch eine Variation der Einflussgrößen ergeben, wird auf /Alkhatib & Kutterer 2013/ verwiesen. In *Abb. 4* sind die Ergebnisse der Simulationen für die Einflussgrößen X_1 bis X_4 gezeigt, welche sich durch die Berechnung der statistischen Momente aus dem realen Datensatz (*Abb. 5*) validieren und bestätigen lassen. Im Hinblick auf die in *Abb. 4* und *Abb. 5* dargestellten Standardabweichungen wird der Effekt der Proportionalität der Distanz auf die Standardabweichungen der repräsentativen Profilpunkte deutlich sichtbar. Weiterhin ist das Wurzel-n-Gesetz für die Standardabweichung des Mittelwerts $\sigma_{\bar{x}}$ in Bezug auf die Standardabweichung der einzelnen Werte ersichtlich. *Abb. 4* zeigt, dass sich die aus den Simulationen berechnete Schiefe der Datenverteilung bei allen berechneten Klassen (1, 5 und 10 Punkte pro Klasse) nicht signifikant vom *Wert 0* unterscheiden, während die Abweichung der Kurtosis vom *Wert 3* signifikant ist. Diese aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse werden durch die Auswertung des realen Datensatzes (*Abb. 5*) bestätigt.

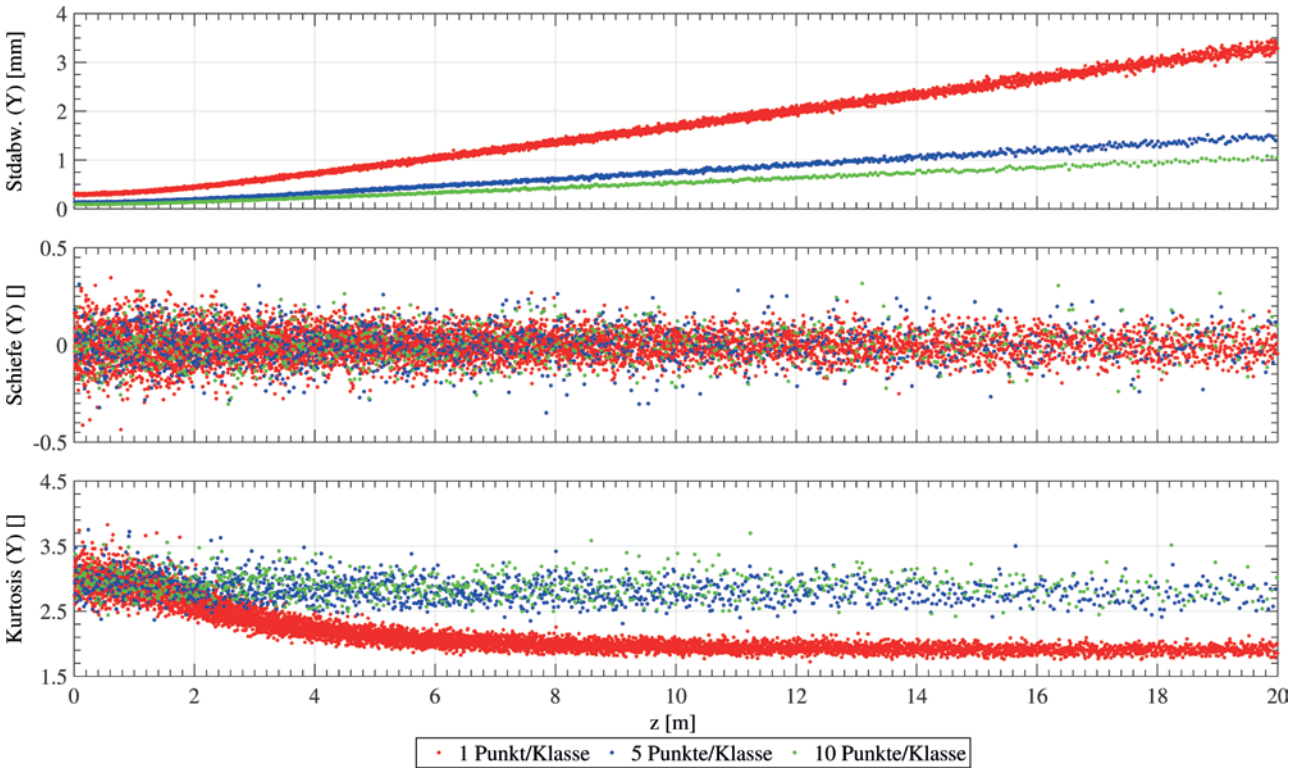

Abb. 4 | Statistische Momente zweiter bis vierter Ordnung der Zielgrößen, hier z-Koordinaten der 2D-Profilmessungen, aus Monte-Carlo-Simulationen für die Einflussgrößen X_1 bis X_4. Für die Standardabweichung (oben), die Schiefe (Mitte) und die Kurtosis (unten) sind jeweils die Ergebnisse für drei Klassen (Aggregation von 1, 5 und 10 Punkten pro Klasse) der 2D-Profilpunkte gezeigt

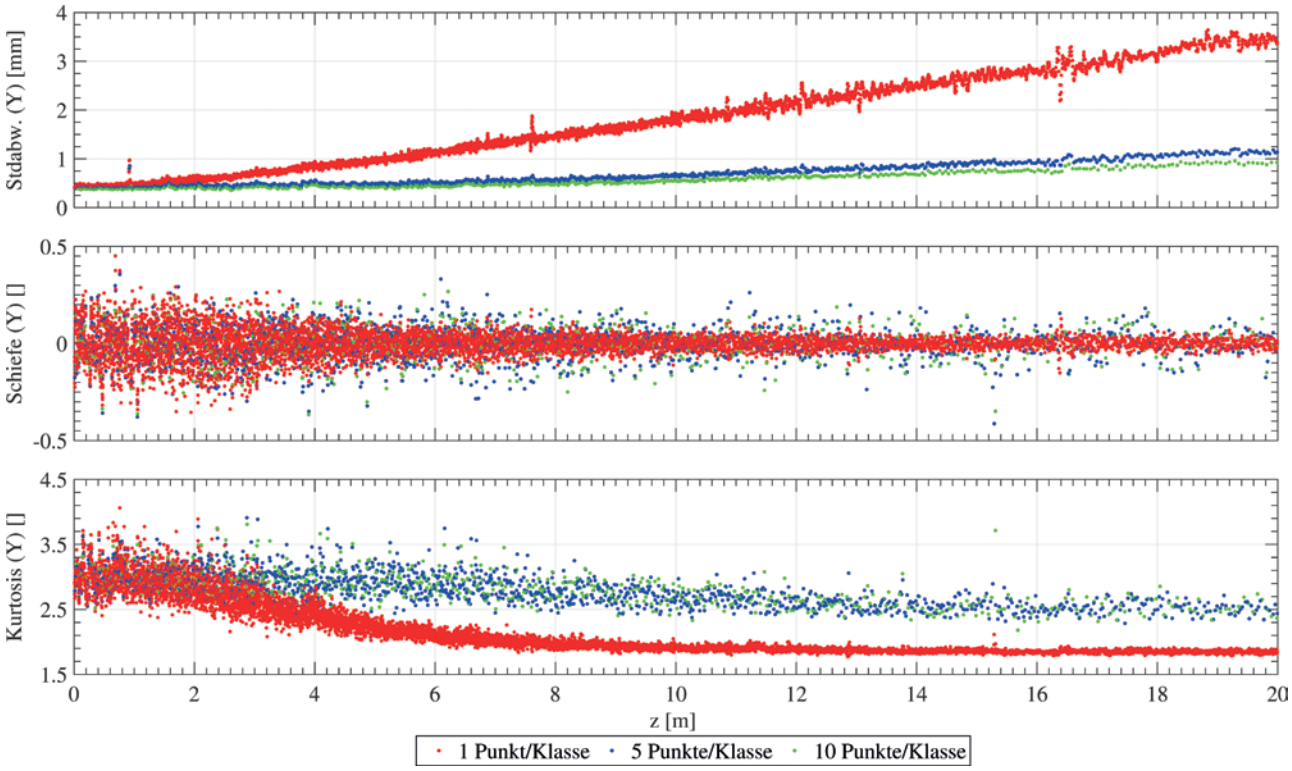

Abb. 5 | Statistische Momente zweiter bis vierter Ordnung der Zielgrößen, hier z-Koordinaten der 2D-Profilmessungen, aus dem realen Datensatz für die Einflussgrößen X_1 bis X_4. Für die Standardabweichung (oben), die Schiefe (Mitte) und die Kurtosis (unten) sind jeweils die Ergebnisse für drei Klassen (Aggregation von 1, 5 und 10 Punkten pro Klasse) der 2D-Profilpunkte gezeigt

5.2 BEISPIEL ZUR RÜCKWÄRTSMODELLIERUNG ANHAND VON REFERENZGEOMETRIEN FÜR EIN K-TLS-BASIERTES MSS

Im Folgenden wird die Rückwärtsmodellierung zur Validierung von Qualitätsparametern in Abhängigkeit der Einflussgrößen anhand von Referenzgeometrien für das bereits in Abschnitt 4 eingeführte k-TLS-basierte MSS (vgl. *Abb. 2*) vorgestellt. Dem Schritt der Validierung ist eine entsprechende Kalibrierung des MSS ebenfalls mithilfe von Referenzgeometrien vorangegangen, zu dessen Einzelheiten sowie weiteren Informationen zum MSS wird auf /Hartmann et al. 2017/ verwiesen.

Das 3D-Labor des Geodätischen Instituts Hannover (GIH) dient als Umgebung zur Durchführung der Validierung der Qualitätsparameter. Das 3D-Labor zeichnet sich durch ein hochgenaues Referenznetz von ca. 50 Punkten in einem Volumen von ca. 6 m × 8 m × 5 m aus (*Abb. 6*). Jeder dieser Punkte ist durch einen magnetischen Halter signalisiert, der neben einem Corner Cube Reflektor (CCR) auch spezielle flächenhafte Zielzeichen aufnehmen kann. Somit sind sowohl Messungen auf die diskreten, punktuellen CCR durch Sensoren wie Lasertracker und Tachymeter als auch Messungen auf die flächenhaften Zielzeichen durch Sensoren wie Laserscanner möglich. Durch an individuelle Aufgabenstellungen angepasste Referenzgeometrien, die ebenfalls in das Referenznetz eingebunden sind, lassen sich Effekte wie die Auflösung oder der Einfluss des Auftreffwinkels von Laserscannermessungen untersuchen.

Die gesamte Infrastruktur des 3D-Labors mit ihren Wänden, Kabelkanälen, Referenzpunkten und Referenzgeometrien (*Abb. 6*) sind mit übergeordneter Genauigkeit mit dem Lasertracker (hier Leica AT960-LR) in Verbindung mit der Leica T-Scan 5 eingemessen worden. Die Leica T-Scan 5 ist in der Lage, hochauflösende 3D-Punktwolken mit einer Genauigkeit von ca. 1/10 mm (2 σ) zu erzeugen /Hexagon Metrologie 2013, 2015/. Für die 3D-Punktwolken der Referenzgeometrien ergibt sich ein Punktabstand innerhalb der 3D-Punktwolke von ca. 1/10 mm, sodass eine spätere Modellierung der Referenzgeometrien nicht zwingend erforderlich ist. Dies lässt sich mit einer Abwägung des Mehrwerts der Modellierung gegenüber verbleibender Restabweichungen aufgrund der Modellierung begründen. Als gemeinsames Datum aller Messungen dient das durch die magnetischen Halter definierte hochgenaue Referenzpunktfeld mit einer mittleren Standardabweichung σ_{3D} = 50 µm der Punkte nach der Ausgleichung.

Abb. 7 (links) zeigt die Referenzgeometrie Q bestehend aus sechs Quadern. Charakteristisches Merkmal der Referenzgeometrie Q ist der sukzessiv kleiner werdende Abstand zwischen den ebenfalls sukzessiv kleiner werdenden Quadern. Die Referenzgeometrie Q adressiert die detaillierte Untersuchung des Auflösungsvermögens des MSS. Zur Minimierung von Überlagerungseffekten weiterer Einflussgrößen, wie dem Auftreffwinkel, ist die Referenzgeometrie Q auf Höhe der Kippachse des Laserscanners im MSS an der Wand montiert, sodass ein möglichst optimaler Auftreffwinkel von ca. 100 gon erreicht wird.

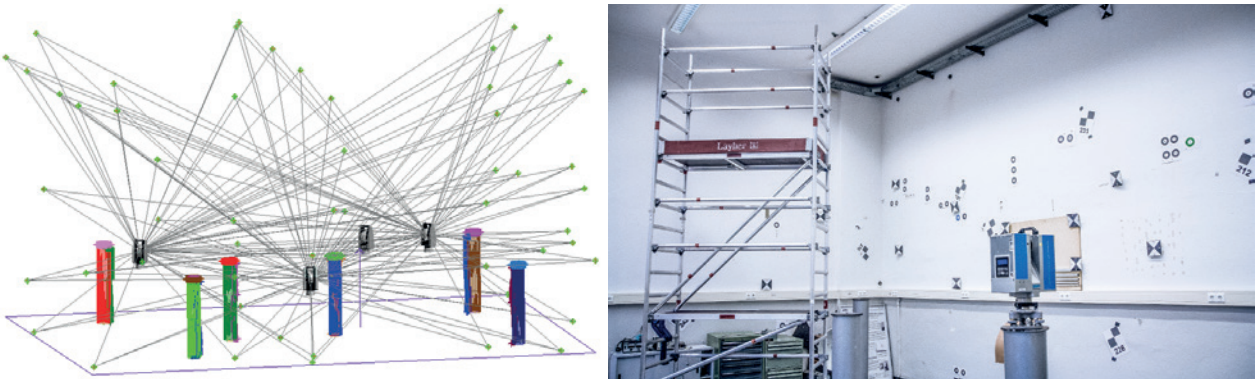

Abb. 6 | Infrastruktur und Referenzgeometrien im 3D-Labor des Geodätischen Instituts. Links: Vier Sensorstandpunkte mit Sichten zu den Punkten des Referenznetzes. Rechts: Blick in das 3D-Labor mit Zielzeichen in den Referenzpunkten sowie exemplarische Referenzgeometrien rechts an der Wand

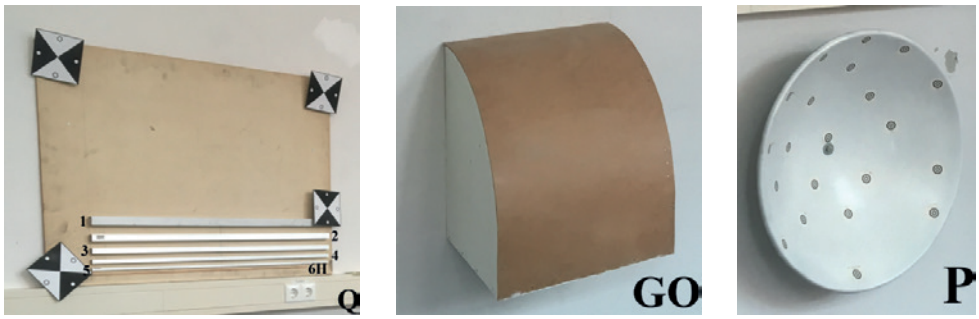

Abb. 7 | Referenzgeometrien im 3D-Labor des Geodätischen Instituts. Links: Sechs Quader aus Metall bzw. Holz mit abfallender Kantenlänge von 30 mm bis 5 mm auf einer Holzplatte. Der Abstand zwischen den Quadern fällt analog zu deren Querschnitt ab. Mitte: Gekrümmte Oberfläche aus Holz mit einer Ausdehnung von 358 mm × 415 mm × 480 mm (Länge × maximale Tiefe × Höhe). Rechts: Paraboloid aus Metall mit einer Brennweite von 152 mm

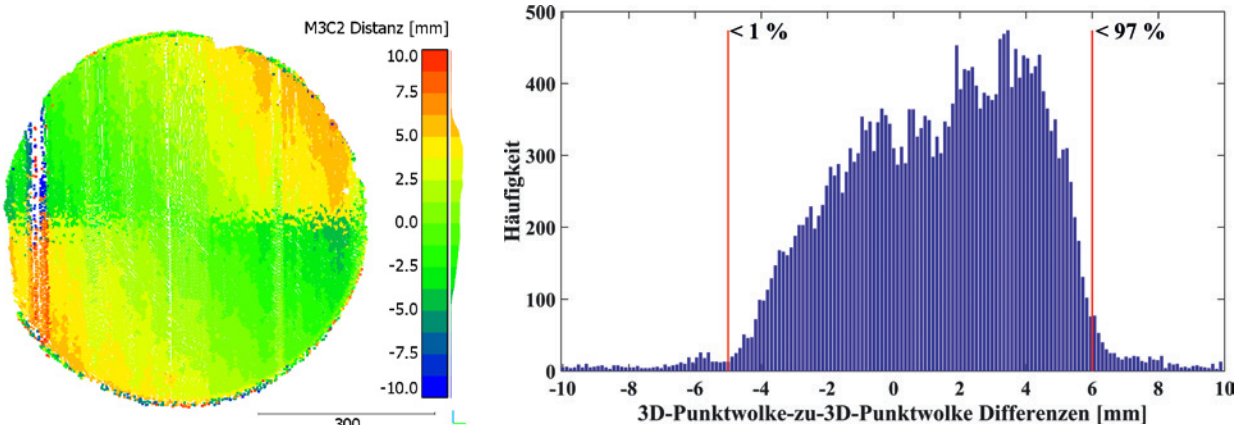

Abb. 8 | 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen (in mm) der Referenzgeometrie P zwischen dem k-TLS-basierten MSS und der Referenzmessung mit der Leica T-Scan mit einer Streuung von ±10,0 mm sowie das Histogramm der Differenzen

Die Untersuchung des Einflusses des Auftreffwinkels des Laserstrahls wird mithilfe der in *Abb. 7* (rechts und Mitte) gezeigten Referenzgeometrien GO und P durchgeführt. Die Referenzgeometrie GO besteht aus einer gekrümmten Oberfläche aus Holz und deckt ein typisches Spektrum von Auftreffwinkeln in strukturierten Umgebungen ab. Die Referenzgeometrie P ist ein Paraboloid, welches als gekrümmte Oberfläche ebenfalls ein breites Spektrum an Auftreffwinkeln abdeckt.

Die zur Validierung notwendigen Messdaten der Referenzgeometrien Q, GO und P sind bei einer Rotationsgeschwindigkeit des Vertikalspiegels des Laserscanners von 50 Hz aus einer Entfernung von ca. 1,5 m erfasst worden. Das k-TLS-basierte MSS aus /Dorndorf et al. 2015/ und /Hartmann et al. 2017/ wurde dabei mit Schrittgeschwindigkeit an den Referenzgeometrien vorbeigeschoben. Grundlage der Auswertung sind die so erfassten 3D-Punktwolken mit einem Punktabstand innerhalb der Punktwolke von ca. 1 mm sowie die vorliegenden hoch aufgelösten Referenz-3D-Punktwolken mit einem Punktabstand innerhalb der Punktwolke von ca. 1/10 mm. Die Auswertung erfolgt einerseits auf Basis abgeleiteter geometrischer Maße aus einer Modellierung der 3D-Punktwolken (modellbasierter Vergleich) und andererseits durch eine Berechnung von punktweisen Differenzen zwischen den 3D-Punktwolken (3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-(Cloud2Cloud-)Differenzen). Für die notwendige Schätzung von Geometrien im modellbasierten Vergleich kam die Software Leica Cyclone (Version 8.1.1) zum Einsatz. Die 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen wurden mithilfe der Open-Source-Software CloudCompare V2 (Version 2.7.0 Stereo) und dem Zusatzmodul „M3C2 distance“ berechnet. Für eine detaillierte Beschreibung des im Plug-in „M3C2 distance“ genutzten Algorithmus wird auf /Lague et al. 2013/ verwiesen. In allen Auswertungen dienen die hoch aufgelösten 3D-Punktwolken der Leica-T-Scan-Messung zur Ableitung der Referenzgeometrien bzw. als Referenz-3D-Punktwolke.

Für den modellbasierten Vergleich dient insbesondere die Referenzgeometrie P. Als Vergleichskriterium wird die Brennweite des Paraboloids herangezogen. Es erfolgt ein rein numerischer Vergleich. Die Unterstützung einer Vorwärtsmodellierung auf Basis der Brennweite ist aufgrund des komplexen mathematischen Zusammenhangs der Brennweite ungeeignet. Hat die Rückwärtsmodellierung das erklärte Ziel der Verbesserung der Vorwärtsmodellierung, so ist der zu betrachtende geometrische Parameter entsprechend mit Bedacht auszuwählen. Für die Referenzgeometrie P wird eine Brennweite von 152,5 mm geschätzt. Die Schätzung durch die mit dem k-TLS-basierten MSS erzeugte 3D-Punktwolke liefert eine Brennweite von 153,0 mm. Als Differenz für den geschätzten Paraboloidparameter Brennweite lässt sich 0,5 mm angeben. Die

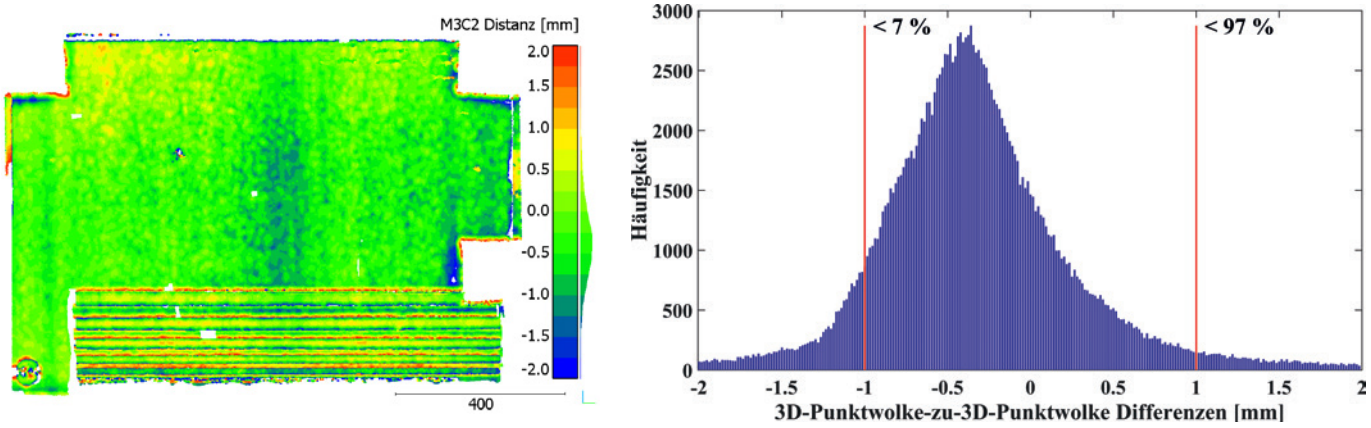

Abb. 9 | 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-(Cloud2Cloud-)Differenzen (in mm) der Referenzgeometrie Q zwischen dem k-TLS-basierten MSS und der Referenzmessung mit der Leica T-Scan mit einer Streuung von ± 2,0 mm sowie das Histogramm der Differenzen

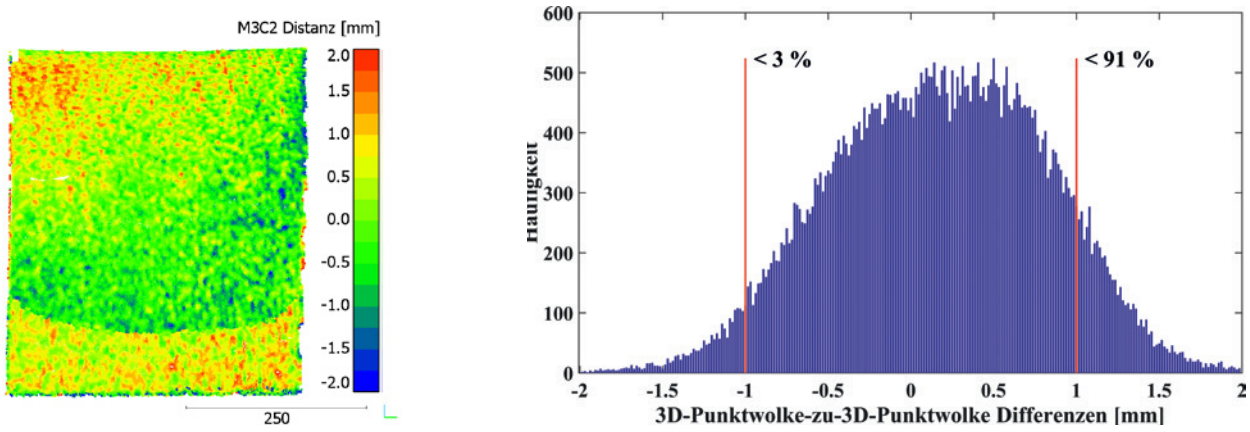

Abb. 10 | 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-(Cloud2Cloud-)Differenzen (in mm) der Referenzgeometrie GO zwischen dem k-TLS-basierten MSS und der Referenzmessung mit der Leica T-Scan mit einer Streuung von ±2,0 mm sowie das Histogramm der Differenzen

3D-Punkwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen für die Referenzgeometrie P (vgl. *Abb. 8*) liegen im Wesentlichen im Bereich von –5,0 mm bis +6,0 mm (96 % der Differenzen, vgl. *Abb. 8* rechts). Ausnahmen bilden ein schmaler Streifen auf der linken Seite sowie der untere Rand mit punktuellen Differenzen im Bereich von ±10,0 mm. Diese Bereiche machen ca. 4 % der gesamten Differenzen aus. Mögliche Gründe für diese Abweichungen sind einerseits potenzielle Bewegungen der Referenzgeometrie zwischen den zeitlich auseinanderliegenden Aufnahmen und andererseits verbleibende Restfehler im Zuge der Synchronisation im k-TLS-basierten MSS. Das Histogramm der Differenzen (vgl. *Abb. 8* rechts) zeigt eine rechtsschiefe Verteilung mit einer deutlichen Konzentration der Differenzen im Bereich von –3,0 mm bis +6,0 mm. Weiterhin weist die Verteilung kein eindeutiges Maximum auf, was auf eine bimodale Verteilung hindeutet; maximale Werte sind für +2,0 mm und +4,0 mm zu notieren.

In *Abb. 9* sind die 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen für die Referenzgeometrie Q zwischen dem k-TLS-basierten MSS und der Referenzmessung mit der Leica T-Scan dargestellt. Das Histogramm der Differenzen zeigt eine deutliche Konzentration im Bereich von –1,2 mm bis +0,6 mm und weist eine linksschiefe Verteilung auf. Das spitz zulaufende, eindeutige Häufungsmaximum bei –0,5 mm deutet auf einen Exzess signifikant größer als 0 hin. Circa 90 % der Differenzen sind kleiner als 1 mm (vgl. *Abb. 9* rechts). An den horizontalen Kanten der Quader wachsen die Differenzen auf bis zu +2,0 mm an, durch den ungünstigen, flachen Auftreffwinkel sowie die Laserspotgröße des Laserstrahls und der damit verbundenen „Mixed-Pixel"-Eigenschaft an den Kanten der Quader. Die metallischen Quader (1 bis 5 von oben) zeigen vereinzelt Datenlücken, die sich durch ungünstige Reflexionen ergeben können. Der Quader aus Holz (ganzen unten, vgl. *Abb. 7* und *Abb. 9*) zeigt Differenzen in einer Größenordnung von 3 mm. Aufgrund seiner Kantenlänge von 5 mm kann dieser Quader nicht mehr zuverlässig aufgelöst werden. Für den oberen Bereich der Referenzgeometrie Q (Bereich ohne Quader, nur Holzplatte) zeigt sich eine homogene Verteilung der Differenzen. Die an den oberen Ecken sowie oberhalb der Quader sichtbaren quadratischen Ausschnitte sind die Bereiche der ebenfalls auf der Holzplatte befindlichen magnetischen Halter, vgl. *Abb. 7* (links). Im Zuge der Aufnahme der Referenz-3D-Punktwolke befanden sich die flächenhaften Zieltafeln in den magnetischen Haltern, welche bei der Aufnahme mit dem k-TLS-basierten MSS nicht adaptiert waren. Die nun im Vergleich dargestellten Differenzen um –2,0 mm sind dieser Tatsache geschuldet und sollten bei der Diskussion und Bewertung der Ergebnisse für die Quader sowie die übrige Holzplatte in den Hintergrund treten.

Die 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen der Referenzgeometrie GO zwischen dem k-TLS-basierten MSS und der Referenzmessung mit der Leica T-Scan ist in *Abb. 10* dargestellt. Das Histogramm der Differenzen weist einen Bereich von –2,0 mm bis +2,0 mm mit einem Bias von ca. 0,3 mm auf. Circa 88 % der Differenzen sind kleiner als 1,0 mm (vgl. *Abb. 10* rechts). Die maximalen Differenzen mit bis zu +2,0 mm zeigen sich im oberen sowie unteren Bereich der Referenzgeometrie GO. Der mittlere Bereich ist durch eine homogene Verteilung der Differenzen charakterisiert. Eine eindeutige systematische Verteilung der Differenzen in Bezug auf die unterschiedlichen Auftreffwinkel für den Bereich von ca. 30 gon bis ca. 100 gon kann nicht festgestellt werden.

Als Zwischenfazit für die Rückwärtsmodellierung lässt sich festhalten, dass die Referenzgeometrie P gegenüber den Referenzgeometrien Q und GO eine größere Streuung der Differenzen aufweist, welche, wie bereits oben beschrieben, auf eine potenzielle Bewegung der Referenzgeometrie zwischen den zeitlich auseinanderliegenden Aufnahmen und gegebenenfalls verbleibende Restfehler im Zuge der Synchronisation im k-TLS-basierten MSS zurückzuführen sind und ca. 5 % der Differenzen ausmachen. Dies führt zu den großen punktuellen Differenzen beim 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Vergleich. Der modellbasierte Vergleich zeigt hier eine sehr gute Übereinstimmung im Bereich von 0,5 mm, woraus sich schlussfolgern lässt, dass die betrachtete Brennweite nicht sensitiv für die kleinen Bereiche mit den vergleichsweise großen Punktdifferenzen ist. Die Referenzgeometrie GO zeigt insbesondere im mittleren Bereich eine deutliche Häufung minimaler Differenzen, dies gilt ebenfalls für den homogenen Bereich der Holzplatte der Referenzgeometrie Q. Hieraus lässt sich intuitiv ableiten, dass das k-TLS-basierte MSS aus *Abb. 2* Objekte mit einer homogenen Oberfläche gut erfassen kann. Bei kleinen Vorsprüngen, wie die Quader in Referenzgeometrie Q, sowie gekrümmten, metallischen Oberflächen, wie Referenzgeometrie P, zeigen sich minimale Verschlechterungen, die sich aus Faktoren wie dem Verhältnis Laserspotgröße zu Vorsprüngen und Materialeigenschaften zusammensetzen. Ins-

besondere für die horizontalen Quaderkanten zeigen sich erhöhte Differenzen von maximal 2,0 mm zwischen den 3D-Punktwolken.

6 FAZIT

Die Aspekte der Qualitätssicherung von MSS wurden ausgehend von einer Motivation für die Qualitätssicherung in allgemeiner Form sowie für eine spezifische Realisierung eines k-TLS-basierten MSS vorgestellt. Den Grundstein für die Qualität der Daten legen die individuellen Sensoren. Eine, wenn nicht sogar die entscheidende Rolle bei einem MSS kommt der Sensorintegration zu, wo insbesondere die zeitliche und räumliche Referenzierung der beteiligten Sensoren mit größter Sorgfalt zu bestimmen ist, um etwaige Effekte aus verbleibenden Kalibrierungsabweichungen möglichst gering zu halten. Gezeigt wurde darüber hinaus eine Vorwärtsmodellierung auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen für einen terrestrischen Laserscanner sowie die notwendige Infrastruktur für eine Rückwärtsmodellierung unter Nutzung von Referenzgeometrien und ein Beispiel für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS. Die Rückwärtsmodellierung kann dabei als Validierung von Qualitätsparametern im Zuge der Qualitätssicherung angesehen werden. Für eine umfassende Qualitätssicherung bietet sich die Kombination der Vorwärts- und Rückwärtsmodellierung an.

Die vorgestellte Bestimmung von Qualitätsparametern in der Vorwärtsmodellierung hat eine hervorragende Übereinstimmung der Resultate für die statistischen Momente zweiter bis vierter Ordnung der Zielgrößen aus den Monte-Carlo-Simulationen und dem realen Datensatz gezeigt. Für die Schiefe wurde keine signifikante Abweichung vom *Wert 0* festgestellt, wohingegen die Kurtosis signifikant vom *Wert 3* abweicht. Für die Rückwärtsmodellierung anhand von Referenzgeometrien für ein exemplarisches k-TLS-basiertes MSS hat sich gezeigt, dass Genauigkeiten im Bereich von wenigen Millimetern, mit einer kleinen Ausnahme für die Referenzgeometrie P, erreicht werden können. Hieraus kann geschlossen werden, dass die zeitliche und räumliche Referenzierung im Rahmen des Kalibrierungsprozesses weitestgehend ausreichend genau bestimmt werden konnte. Der kleinste noch aufgelöste Quader in der Validierung hat eine Kantenlänge von zehn Millimetern. Das Auflösungsvermögen ist damit größer als die Mittelwerte der Differenzen zu den Referenzgeometrien von ca. 1,0 mm. Durch einen modellbasierten Vergleich sowie die Berechnung von 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen für die Referenzgeometrie P konnte gezeigt werden, dass der Vergleich von aus Modellen abgeleiteten Parametern mitunter optimistischere Ergebnisse zeigt als die punktuelle Analyse von Differenzen. Von einem umfassenden Vergleich auf Basis modellierter Geometrien wird aufgrund der hohen Punktdichte der Referenz-3D-Punktwolke (1/10 mm) gegenüber der k-TLS-basierten 3D-Punktwolke (1 mm) abgesehen. Bei gleichen Punktabständen innerhalb der Punktwolke ist gegebenenfalls ein modellbasierter Vergleich anzustreben, wenngleich hier dann eine eingehende Auseinandersetzung mit Unsicherheiten der Objektmodellierung erforderlich ist. Eine umfassende, statistische Analyse der resultierenden 3D-Punktwolke-zu-3D-Punktwolke-Differenzen bezüglich ihrer Art des Rauschens (z. B. farbiges oder zufälliges Rauschen), Art der Verteilung und Korrelationsstruktur ist in Vorbereitung. Abschließend kann für das exemplarische vorgestellte k-TLS-basierte MSS festgehalten werden, dass Auflösung und Genauigkeit vom klassischen statischen TLS erreicht werden können und gleichzeitig die Effizienz des k-TLS beibehalten werden kann.

LITERATUR

Alkhatib, H.; Neumann, I.; Kutterer, H. (2009): Uncertainty modeling of random and systematic errors by means of Monte Carlo and fuzzy techniques. In: Journal of Applied Geodesy (JAG), 3(2009)2, 67–79.

Bandemer, H.-W. (2006): Mathematics of Uncertainty. Ideas, Methods, Application Problems. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 189. Springer, Berlin/Heidelberg.

Brenner, C.; Bock, F.; Schlichting, A. (2015): Automatisierte Interpretation von LiDAR Mobile Mapping Daten. In: Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015), Schriftenreihe des DVW, 81. Wißner, Augsburg, 45–62.

DIN 1319-2:2005 Grundlagen der Messtechnik – Teil 2: Begriffe für Messmittel. Beuth, Berlin.

DIN 55350-13:1987 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik – Teil 13: Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen. Beuth, Berlin.

DIN EN ISO 9000:2015 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Beuth, Berlin.

DIN V ENV 13005:1999 Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Beuth, Berlin.

Dorndorf, A.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I.; Hesse, C. (2015): Validierung und Kalibrierung eines TLS-basierten Multi-Sensor-Systems. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015. Wichmann, Berlin/Offenbach, 85–98.

Frei, E. A.; Vennegeerts, H.; Omelanowsky, D. (2013): Kinematische Scanlösungen von p3d system. In: Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013), Schriftenreihe des DVW, 72. Wißner, Augsburg, 107–124.

Grabe, M. (2005): Measurement uncertainties in science and technology. Springer, Berlin/Heidelberg.

Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Strübing, T.; Neumann, I. (2017): Determination of position and orientation of LiDAR-sensors on multi-sensor platforms. In: Journal of Surveying Engineering (zur Publikation angenommen).

Hennes, M. (2007): Konkurrierende Genauigkeitsmaße – Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)4, 136–146.

Hennes, M.; Heister, H. (2007): Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), 114(2007)11/12, 375–383.

Heinz, E.; Eling, C.; Wieland, M.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2015): Development, calibration and evaluation of a portable and direct georeferenced laser scanning system for kinematic 3D mapping. In: Journal of Applied Geodesy (JAG), 9(2015)4, 227–243.

Hexagon Metrologie (2013): Systemspezifikationen für mobile KMG, Leica Absolute Tracker AT901 und Leica T-Produkte. www.leicageosystems.de (03.09.2016).

Hexagon Metrologie (2015): Leica Absolute Tracker AT960 Produktbroschüre. www.leica-geosystems.de (13.09.2016).

Holst, C.; Kuhlmann, H.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2015): TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz. In: Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015), Schriftenreihe des DVW, 81. Wißner, Augsburg, 9–26.

Holst, C.; Kuhlmann, H. (2014): Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. In: Journal of Applied Geodesy (JAG), 8(2014)4, 295–310.

JCGM 100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections, ISO/IEC Guide 98-3). Version 2008, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.

JCGM 101: Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method (ISO/IEC Guide 98-3-1). Version 2008, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1), 2008.

Keller, F.; Sternberg, H. (2013): Multi-Sensor Platform for Indoor Mobile Mapping: System Calibration and Using a Total Station for Indoor Applications. In: Remote Sensing, 5(2013)11, 5805–5824.

Koch, K.-R. (2008): Evaluation of uncertainties in measurements by Monte Carlo simulations with an application for laserscanning. In: Journal of Applied Geodesy (JAG), 2(2008)2, 67–77.

Kuhlmann, H.; Klingbeil, L. (2016): Mobile Multisensorsysteme. In: Freeden, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–36.

Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82(2013), 10–26.

Lichti, D. D.; Kim, C.; Jamtsho, S. (2010): An integrated bundle adjustment approach to range camera geometric self-calibration. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(2010), 360–368.

Liebig, J. P.; Grünberg, J.; Paffenholz, J.-A.; Vennegeerts, H. (2011): Taktile und laserbasierte Messverfahren für die messtechnische Überwachung einer Autobahnbrücke. In: Bautechnik, 88(2011)11, 749–756.

Neitzel, F.; Neumann, I. (2013): Scanning in Motion – Kinematisches TLS mittels mobiler Plattformen. In: Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013), Schriftenreihe des DVW, 72. Wißner, Augsburg, 89–106.

Neumann, I. (2012): Messunsicherheit bei elektrooptisch bestimmten Strecken. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn), 119(2012)11/12, 369–379.

Nüchter, A.; Elseberg, J.; Borrmann, D. (2013): Irma3D – An Intelligent Robot for Mapping Applications. In: Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Telematics Applications, 11.–13.11.2013, Seoul, Korea. IFAC Proceedings, 46(2013)29, 119–124.

Paffenholz, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 689. München.

Reiterer, A.; Höfler, H.; Wölfelschneider, H. (2015): Aufbau und Funktionsprinzipien mobiler Laserscanner – Stand der Technik und neue Trends. In: Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015), Schriftenreihe des DVW, 81. Wißner, Augsburg, 27–44.

Riegl (2015): Mobile Laser Scanning. www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning (01.03.2016).

Siebert, B. R. L.; Sommer, K.-D. (2004): Weiterentwicklung des GUM und Monte-Carlo-Techniken. In: tm – Technisches Messen, 71(2004)2, 67–80.

Sommer, K.-D.; Siebert, B. R. (2004): Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. In: tm – Technisches Messen, 71(2004)2, 52–66.

Vennegeerts, H. (2011): Objektraumgestützte kinematische Georeferenzierung für Mobile-Mapping-Systeme. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 657. München.

Zamecnikova, 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 (JAG), 8(2014)4, 311–325.

Zamecnikova, M.; Neuner, H.; Pegritz, S.; Sonnleitner, R. (2015): Investigation on the influence of the incidence angle on the reflectorless distance measurement of a terrestrial laser scanner. In: Vermessung & Geoinformation, 103(2015)2+3, 208–218.

Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz
LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT
Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
paffenholz@gih.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Hamza Alkhatib
LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT
Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
alkhatib@gih.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Ulrich Stenz
LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT
Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
stenz@gih.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann
LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
GEODÄTISCHES INSTITUT
Nienburger Str. 1 | 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: 02.03.2016 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet