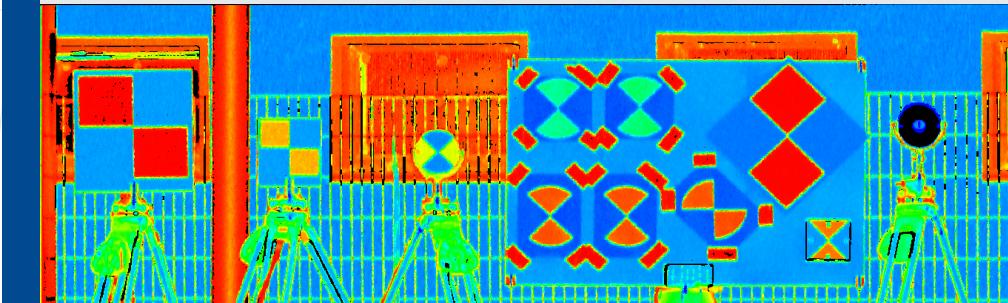


Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“
Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018)

Beiträge zum 177. DVW-Seminar am
13. und 14. Dezember 2018 in Fulda



Schriftenreihe des DVW
Band 93 / 2018

Wißner

Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“
Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018)

Beiträge zum 177. DVW-Seminar am
13. und 14. Dezember 2018 in Fulda

Redaktion:
Christoph Holst

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



Schriftenreihe des DVW
Band 93
Wißner-Verlag

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

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 93

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.):
Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). DVW-Schriftenreihe,
Band 93, Augsburg, 2018, 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: 978-3-95786-199-3
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2018
www.geodesie.info

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: Jannik Janßen

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: Welche Genauigkeit hat mein Laserscan(ner)?

Christoph Holst Tobias Jurek Martin Blome Lars Marschel Michael Petersen Thomas P. Kersten Klaus Mechelke Maren Lindstaedt Wolffried Wehmann Thomas Wunderlich Peter Wasmeier Wolfgang Wiedemann Freddie Kern Heiner Kuhlmann	
Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten?	9

Erik Heinz Tomislav Medić Christoph Holst Heiner Kuhlmann	
Genauigkeitsbeurteilung von Laserscannern anhand realer Messobjekte	41

Session 2: Wie modelliere und registriere ich meine Laserscans?

Michael Geist Frank Niemeyer Fabian Gierschner	
Modellierung – Strategien zur Interpretation von 3D-Punktwolken	59

Jannik Janßen Christoph Holst Heiner Kuhlmann	
Registrierung mit Targets: Wie genau ist das?	75

Daniel Wujanz Sandro Schaller Frank Gielsdorf Lothar Gründig	
Ebenenbasierte Registrierung von mehreren Tausend Laserscans	95

Jürgen Mayer Bernhard Metzler	
Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung (SLAM) im terrestrischen Laserscanning	109

Inhalt

Session 3: TLS in der Infrastruktur

Andreas Riemenschneider
TLS und BIM – Die Erfassung, Analyse und Visualisierung von
Infrastrukturprojekten _____ 119

Johannes Wagner
Laserscanninganwendungen Hauptbahnhof Stuttgart 21 _____ 129

Markus Kohlmann | Erich Wieser
Kinematische Vermessung des Straßenraums mit fahrendem Messsystem _ 139

Session 4: Aktuelle Anwendungen und Themen

Ralph Zimmermann
Flexibles Scanning bei der Meyer Gruppe – zwischen Karibik und
Werftstandorten _____ 155

Marten Jeschky | Michael Geist | Thorsten Fichtler | Lisa Knaack
TLS-basierter Ansatz zur Optimierung des Bauraums für die Nachrüstung
technischer Anlagen in beengten Treppenhäusern _____ 165

Martin Burghof
P40, BLK360 und RTC360 – ein Erfahrungsbericht _____ 181

Vorwort

Terrestrische Laserscanner (TLS) erobern nun schon seit einigen Jahren die geodätische Wissenschaft und Praxis, angeregt von Innovationen der Instrumentenhersteller und Softwareunternehmen. Wir befinden uns in einem Wechselspiel zwischen diesen technologischen Neuerungen – wie etwa immer präziser messenden Laserscannern mit automatisierter Registrierung zwischen den Standpunkten – und dem Bedürfnis, dennoch einen Überblick über die Qualität von Laserscans und daraus abgeleiteter Produkte zu behalten. Dieses Spannungsfeld möchten wir mit dem diesjährigen TLS-Seminar aufgreifen, indem wir insbesondere Fragen aus der Praxis, die dem Vermessungstechniker/-ingenieur in der Vorbereitung und Nachbereitung seines Messjobs unter den Nägeln brennen, adressieren:

- Welche Genauigkeit hat mein Laserscan(ner)?
- Wie modelliere und registriere ich meine Laserscans?

Während diese Fragen in den ersten beiden Sessions des Seminars explizit beantworten werden, greifen Session drei und vier sie implizit mit auf: International hochanerkannte Vermessungsbüros, Industrieunternehmen, Forschungseinrichtungen und innovative Behörden berichten von ihren Projekten und Erfahrungen mit terrestrischen Laserscannern.

Die Zielgruppe des Seminars sind die Kolleginnen und Kollegen in der Praxis, Forschung oder Ausbildung aus den Bereichen der Geodäsie, der Geoinformation und aus Nachbardisziplinen, die sich über dieses hochaktuelle Teilgebiet der elektrooptischen Messtechnik umfassend und unabhängig von Anbietern informieren möchten.

Die Organisatoren und die DVW-Arbeitskreise 4 »Ingenieurgeodäsie« und 3 »Messmethoden und Systeme« freuen sich darauf, mit Ihnen in Fulda Anregungen und Gedanken zu diesem weiterhin zukunftsorientierten, innovativen Thema auszutauschen. Schließlich danken wir hiermit allen, die an der Entstehung dieses Tagungsbandes durch ihre sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Beiträge mitgewirkt haben.

Christoph Holst und Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation

Session 1: Welche Genauigkeit hat mein Laserscan(ner)?

Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten?

Christoph Holst | Tobias Jurek | Martin Blome | Lars Marschel | Michael Petersen |
Thomas P. Kersten | Klaus Mechelke | Maren Lindstaedt | Wolffried Wehmann |
Thomas Wunderlich | Peter Wasmeier | Wolfgang Wiedemann | Freddie Kern |
Heiner Kuhlmann

1 Motivation und Zielsetzung von TLS-Prüffeldern

Die Genauigkeit der Messpunkte hängt beim terrestrischen Laserscanning (TLS) von einer Vielzahl von Faktoren und Einflüssen ab. Diese lassen sich in die Kategorien zufällige und systematische Abweichungen einteilen. Die Abweichungen werden verursacht durch scannerinterne Abweichungen, atmosphärische Bedingungen, die Messkonfiguration und die Objektoberfläche, die reflektorlos gemessen wird (Kuhlmann und Holst 2017). Die resultierende Größenordnung der Abweichungen ist u. a. auch abhängig vom Messprinzip des Laserscanners (inkl. genutzte Laserwellenlänge, Strahldivergenz) und den Einstellungen am Instrument (Messfrequenz, Mittelung etc.).

Die Abweichungen, die aufgrund von atmosphärischen Bedingungen, der Messkonfiguration und der Objektoberfläche wirken, hängen in erheblichem Maße von der beim Laserscan vorliegenden Messsituation ab: Wie groß sind die Messdistanzen, wie groß der Einfallswinkel des Laserstahls auf die Messoberfläche, welche Lufttemperatur und -feuchte liegt vor, aus welchem Material (Beton, Holz, Kunststoff, ...) besteht die Reflexionsfläche und wie ist sie beschaffen (Rauigkeit, Temperatur, Feuchte, ...)? Diese Größen beeinflussen fast ausschließlich die vom Laserscanner durchgeführte Distanzmessung. Die Winkelmessungen sind kaum vom Zielobjekt und seiner Ausrichtung beeinflusst; sie werden vom TLS in einem festen Raster eingestellt und zeitlich interpoliert und nicht im herkömmlichen Sinne gemessen, da keine Zielung erfolgt.

Dahingegen beschreiben scannerinterne Abweichungen die Messunsicherheit, die sich allein durch die hardware- und softwarebedingte Konstruktion des Laserscanners ergibt. Die hier zugrundeliegenden Abweichungen sind aus der Tachymetrie größtenteils bekannt: Horizontal- und/oder Vertikalwinkelmessungen werden durch Achsabweichungen (vor allem Zielachsabweichung, Kippachsabweichung, Höhenindexabweichung) beeinflusst, die Distanzmessung durch die Nullpunktabweichung und den Maßstab. Weitere Einflüsse, wie z. B. Achsexzentritäten oder periodische Distanzabweichungen, sind bei geo-

däischen Laserscannern aufgrund ihrer geringen Beträge in der Regel nicht von Relevanz.

TLS-Prüffelder haben das Ziel, die Auswirkung dieser scannerinternen Abweichungen auf die Genauigkeit der Messpunkte oder daraus abgeleiteter Größen zu beschreiben und schlussendlich zu attestieren, ob das Instrument innerhalb seiner vom Hersteller beschriebenen Genauigkeit arbeitet. Die Notwendigkeit von TLS-Prüffeldern ergibt sich daraus, dass die Hersteller von terrestrischen Laserscannern unterschiedliche Kenngrößen angeben, um die Genauigkeit des Instruments näher zu spezifizieren. Dadurch ist die Vergleichbarkeit zwischen den Instrumenten verschiedener Hersteller erschwert, mitunter sogar nicht einmal zwischen verschiedenen Baureihen desselben Herstellers.

Die Messung und Auswertung im Rahmen einer TLS-Prüfung sollte möglichst standardisiert ablaufen, sodass Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Instrumenten vergleichbar sind. Prüfungen sollten auch weitestgehend ortsungebunden mit wenig Aufwand durchgeführt werden können. In diesem Zuge entstand z. B. das DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014), das ein standardisiertes Vorgehen als Feldprüfverfahren beschreibt, um zu ermitteln, ob der Laserscanner entsprechend seiner Genauigkeitsklasse funktionstüchtig ist oder nicht. Als mögliche Ursachen für zu hohe Abweichungen können gemäß des Prüffeldaufbaus Achsabweichungen oder die Nullpunktabweichung in Betracht kommen.

Bei den hier vorgestellten – überwiegend ortsungebundenen – Prüffeldern existieren hingegen Referenzpunkte, die bereits mit übergeordneter Genauigkeit koordiniert sind. Diese erlauben es zudem, große Maßstabsabweichungen und ggf. auch Abweichungen von der Lotrechten zu bestimmen. Diese Art von Prüffeldern, die vornehmlich auf der Berechnung von Abstandsabweichungen zwischen koordinierten Zielmarken im gesamten Messvolumen beruhen, sind beim ÖbVI Petersen, der HafenCity Universität Hamburg, der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, der Technischen Universität München, der Hochschule Mainz und der Universität Bonn installiert. Teilweise sind diese Prüfungen noch erweiterbar, um die Messgenauigkeit auch im Lokalen untersuchen zu können, z. B. mit Hilfe der Antastabweichung, Kugelradienabweichung und des Auflösungsvermögens. Diese Untersuchung im Lokalen wird im folgenden Beitrag jedoch nicht fokussiert.

Die o. g. Prüffelder existieren zum Teil erst wenige Jahre, mitunter aber auch seit ca. 15 Jahren. Teilweise wurden die TLS-Prüffelder aus kommerziellen Zwecken errichtet, teilweise aus wissenschaftlichen und teilweise auch aus Lehrzwecken, um Studierenden die Auswirkungen von Messabweichungen eingängiger erläutern zu können. Daraus ergibt sich, dass viele unterschiedliche Laserscanner einmalig, eine ganze Reihe von Scannern aber auch sehr oft geprüft wurde. Der vorliegende Artikel hat das Ziel, die aus diesen Prüfungen resultierenden

empirischen Ergebnisse gebündelt zu präsentieren. Damit verfolgen wir zwei Zwecke:

- Wir möchten die erreichbare Messgenauigkeit verschiedener Laserscanner miteinander vergleichen und beurteilen, ob die Herstellerangaben eingehalten werden bzw. ob sie gerechtfertigt sind.
- Wir möchten Auskunft geben, ob es zu Auffälligkeiten bei einzelnen Herstellern oder Baureihen gekommen ist.

Die für diese Analysen verwendeten empirischen Ergebnisse wurden nicht unmittelbar für diesen Beitrag erzeugt, sodass einzelne Hersteller und Baureihen überproportional oft geprüft wurden und manche gar nicht. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass einzelne Baureihen im Hochschulwesen und Ingenieurbüros häufiger im Einsatz sind als andere. Dennoch geben die in den folgenden Kapiteln diskutierten Ergebnisse einen guten Anhaltspunkt über das Genauigkeitspotenzial terrestrischer Laserscanner.

2 Beschreibung und empirische Ergebnisse der TLS-Prüffelder

2.1 Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation

2.1.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das TLS-Prüffeld der Uni Bonn ist an das im DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014) beschriebene Feldprüfverfahren angelehnt. Demnach werden mehrere Zielzeichen von verschiedenen Standpunkten gescannt, die Strecken zwischen verschiedenen Zielzeichenkoordinaten berechnet und standpunktabhängige Abweichungen dieser Strecken herausgearbeitet. Als Erweiterung werden im vorliegenden Feldprüfverfahren

- eine größere Anzahl an Zielzeichen verwendet, was zu einer besseren räumlichen Verteilung führt,
- Sollstrecken eingebunden und
- es findet eine Zwei-Lagen-Messung und Auswertung statt, wenn der Scanner eine Zwei-Lagen-Messung zulässt.

Detailliertere Angaben zum Prüffeld sind in Tab. 1 gegeben, Abb. 1 zeigt das Prüffeld in der Aufsicht. Hierbei sind die TLS-Standpunkte mit SP1 und SP2 bezeichnet, die Zielpunkte ZP4 bis ZP6 sind Bolzen im Boden, über denen ein Zielzeichen zentriert wird und die Zielpunkte ZP1 bis ZP3 und ZP7 werden über Bolzen in der Häuserwand zentriert. Die Zielpunkte HP1 und HP2 sind Höhenpunkte mit einer Höhe von ca. 16 m über Boden; diese werden ebenfalls über

Tab. 1: Steckbrief Prüffeld Uni Bonn

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Additionskonstante ▪ Zielachs-, Kippachs-, Höhenindex-abweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Strecken zwischen Zielpunkten ▪ SP1 vs. SP2 bei Strecken zwischen Zielpunkten (pro Lage) ▪ Ist vs. Soll bei Strecken zwischen Zielpunkten (pro SP und Lage)
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	schwarz-weiße Tilt & Turn Targets
Anzahl an Zielpunkten	9
Vermarkungsart	Bolzen in Boden oder Wand
Referenzwerte vorhanden?	Ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	2
Geprüfte Zielweiten	5 m bis 45 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	30 gon bis 100 gon (Horizont)
Maximaler Höhenunterschied	15 m

Bolzen in der Häuserwand zentriert. Die Zielpunkte werden jeweils mit den beim Hersteller käuflichen schwarz-weißen Tilt & Turn Targets bestückt und die Zielzeichenzentren werden mit der Herstellersoftware geschätzt.

2.1.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Zur Prüfung, ob der Laserscanner die Genauigkeitsspezifikationen einhält oder nicht, werden die neun Zielzeichen von den zwei Standpunkten SP1 und SP2 in mehreren Vollsätzen gescannt und die Zielzeichenkoordinaten jeweils geschätzt. Anschließend werden die Raumstrecken zwischen verschiedenen Zielzeichen berechnet – insgesamt 36 Stück – und es wird herausgearbeitet, wie stark sich diese Raumstrecken unterscheiden, wenn sie

- von SP1 oder SP2 gemessen werden,
- in erster oder zweiter Lage gemessen werden oder
- mit einem Referenzinstrument (hier: Tachymeter) verglichen werden.

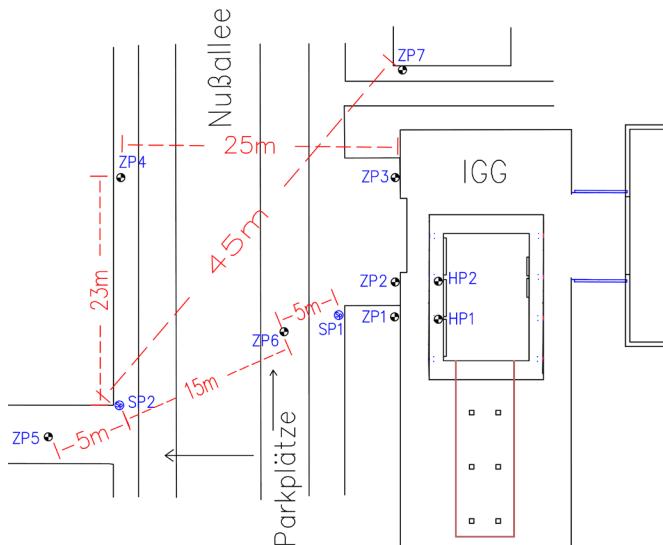


Abb. 1:
Skizze Prüffeld
Uni Bonn

Außerdem werden die Koordinaten des Zielpunktes zwischen einer Messung in erster und zweiter Lage unmittelbar miteinander verglichen. Zur Beurteilung, ob Abweichungen jeweils signifikant sind, wird jeweils eine Varianzfortpflanzung ausgehend von der Unsicherheit der Zielzeichenbestimmung berechnet und es wird von einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % ausgegangen. Die zugehörigen Gleichungen sind dem DVW-Merkblatt 7-2014 (Neitzel et al. 2014) zu entnehmen.

2.1.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Das Institut für Geodäsie und Geoinformation besitzt von Leica Geosystems einen HDS6100, eine ScanStation P20 und einen BLK360. Diese drei Geräte wurden in einem Praktikum des Studiengangs B. Sc. Geodäsie und Geoinformation insgesamt 30-mal auf dem o. g. TLS-Prüffeld untersucht (8-mal HDS6100, 16-mal P20, 6-mal BLK360). Tab. 2 beschreibt die Ergebnisse, wobei wir uns der Übersicht halber jeweils auf eine der in Tab. 1 genannten Prüfgrößen beschränken.

Aus Tab. 1 geht hervor, dass die ausgewählten Prüfgrößen beim geprüften HDS6100 in den Jahren 2016/2017 im Mittel eingehalten werden (siehe auch Abb. 2), nur einzelne Prüfungen aus diesen Jahren zeigen hin und wieder eine Abweichung auf, die zu hoch ist. Daher sollte eine Prüfung bei Auffälligkeiten immer wiederholt werden. Im Jahr 2018 ist der Laserscanner gestürzt, was an den Prüfergebnissen aus 2018 auch ersichtlich wird: Diese Ergebnisse deuten

darauf hin, dass erhebliche Achsabweichungen vorliegen, sodass die Messgenauigkeit des Laserscanners signifikant schlechter als vom Hersteller spezifiziert ist. Der Laserscanner sollte zur Qualitätssicherung kalibriert werden.

Die ScanStation P20 weist zwischen den Jahren keine unterschiedlichen Ergebnisse auf (Abb. 3) und alle Werte – auch die der einzelnen Prüfungen – liegen innerhalb der erlaubten Messgenauigkeit. Der Laserscanner ist somit funktions-tüchtig.

Gleches gilt für den BLK360 (Abb. 4). Da der BLK360 nicht in zwei Lagen messen kann, stellen wir hier die Differenz zwischen den Zielzeichenstrecken dar, die durch das Scannen von unterschiedlichen Standpunkten entstehen. Zwar sind diese Differenzen deutlich höher als bei den vorherigen Scannern, sie streuen aber zufällig. Dies deutet also darauf hin, dass der Scanner generell eine niedrigere Genauigkeit als die ScanStation P20 und der HDS6100 hat, was einerseits vom Hersteller auch angegeben wird und was andererseits aufgrund seines Verkaufspreises und seiner vorgesehenen Einsatzbestimmung nicht verwundert.

Tab. 2: Ergebnisse Prüffeld Uni Bonn

Prüfling	Leica HDS6100	Leica ScanStation P20	Leica BLK360
# Prüfungen	8	16	6
Ausgewählte Prüfgröße	Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten (Abb. 2)	Lage 1 vs. Lage 2 bei Zielpunkten (Abb. 3)	SP1 vs. SP2 bei Strecken zwischen Zielpunkten (Abb. 4)
Mittlere absolute Abweichung	0,5 bis 8 mm (2016/17) 1 bis 13 mm (2018)	0,5 bis 4,5 mm	2 bis 11 mm
Höchste absolute Abweichung	12 mm (2016/17) 15 mm (2018)	5 mm	19 mm
Zulässige Abweichung	5 mm	5 mm	> 20 mm
Ergebnis (grün, gelb, rot)	gelb (2016/17) rot (2018)	grün	grün
Hinweise auf systematische Abweichungen	Achsabweichungen seit 2018 nach Sturz	Nein	Nein

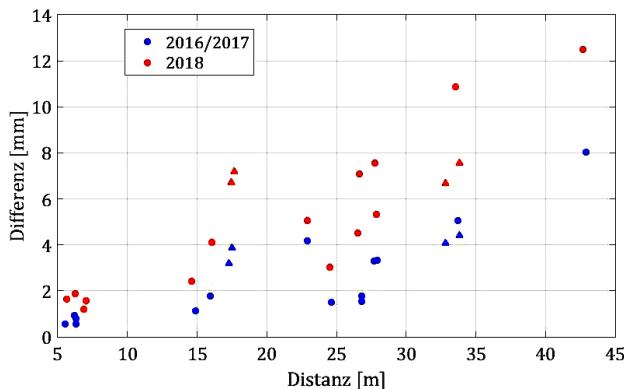


Abb. 2:
Differenz zwischen der Zielzeichenkoordinate aus erster und zweiter Lage beim HDS6100, sortiert nach der gemessenen Distanz. Hochpunkte sind als Dreiecke gekennzeichnet.

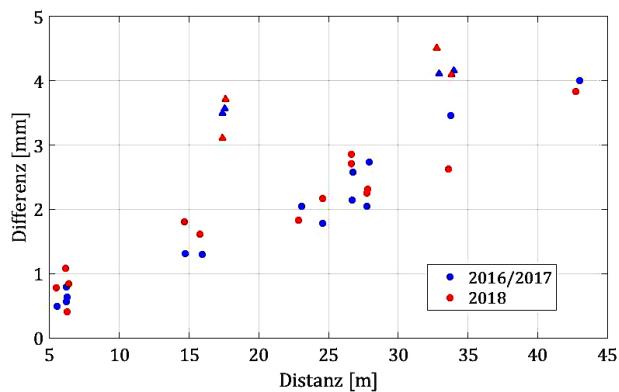


Abb. 3:
Differenz zwischen der Zielzeichenkoordinate aus erster und zweiter Lage bei der P20, sortiert nach der gemessenen Distanz. Hochpunkte sind als Dreiecke gekennzeichnet.

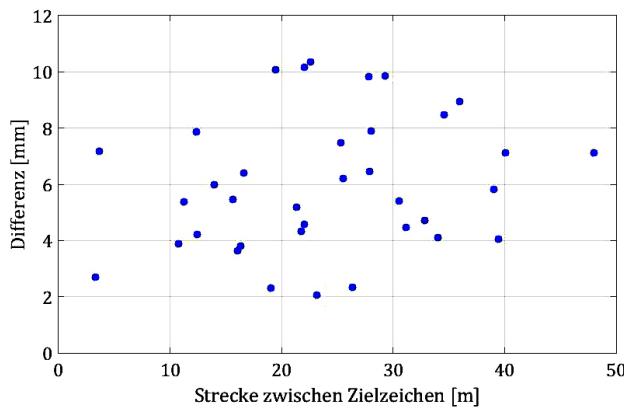


Abb. 4:
Differenzen zwischen den Zielzeichenstrecken, aufgenommen von SP1 und SP2, gemittelt über sechs Prüfungen

2.1.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Aus den dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass die drei getesteten Scanner innerhalb der vom Hersteller proklamierten Genauigkeit arbeiten. Für den Leica HDS6100 gilt dies nur bis zum Jahr 2018, da er zu diesem Zeitpunkt durch einen Sturz beschädigt wurde. Dies konnte mit Hilfe des TLS-Prüffeldes zuverlässig aufgedeckt werden. Wir gehen von erheblichen Achsabweichungen aus, die zu kalibrieren sind. Für die Leica P20 konnten wir durch eine große Anzahl an Prüfungen Differenzen zwischen erster und zweiter Lage von im Mittel maximal 5 mm bei Distanzen bis 45 m feststellen, was sicher innerhalb der Spezifikationen des Herstellers liegt. Auch der BLK360 zeigt keine Auffälligkeiten auf, bei Streckendifferenzen von im Mittel maximal 11 mm.

2.2 ÖbVI Petersen, Gelsenkirchen

2.2.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das Prüffeld (Abb. 5) der Firma ÖbVI Petersen befindet sich auf dem Innenhofparkplatz der Firma und wurde im Zuge der Diplomarbeit von Eva Feldmann 2011 aufgebaut. Es besteht aus fünf bodennahen Zielpunkten (ZP1–ZP6),

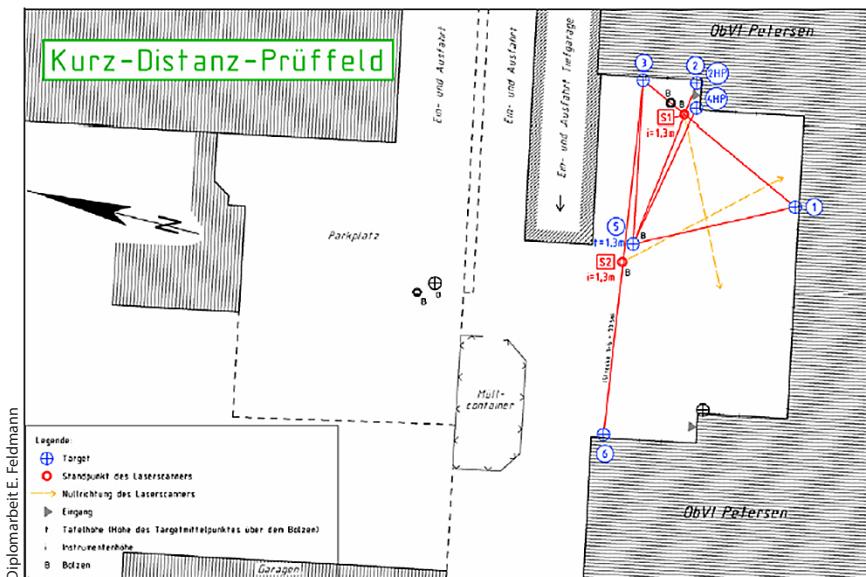


Abb. 5: Skizze Prüffeld

Tab. 3: Steckbrief Prüffeld ÖbVI Petersen

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maßstabsabweichung ▪ Additionskonstante ▪ Zielachsabweichung ▪ Kippachsabweichung ▪ Höhenindexabweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lage 1 vs. Lage 2 bei Strecken zwischen Zielpunkten ▪ Schrägstreckenvergleich 1. und 2. Lage vs. Sollstrecke
Berechnung von Kalibrierparametern	nein
Zieldefinition	schwarz-weiße Tilt & Turn Targets
Anzahl an Zielpunkten	7
Vermarkungsart	Bolzen für Adapter in Hauswand
Referenzwerte vorhanden?	Ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	2
Geprüfte Zielweiten	1,9 m bis 20 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	ca. 100 gon und 190 gon
Maximaler Höhenunterschied	ca. 8,5 m

zwei hochgelegenen Zielen (2HP und 4HP, ca. 8,5 m hoch) und zwei Scannerstandpunkten SP1 und SP2. Die Zielpunkte werden mit Tilt & Turn Targets signalisiert, welche mit Hilfe entsprechender Bolzen in der Hausfassade für die Zielpunkte ZP1 bis 4 und 6 befestigt werden. Der ZP5 ist ein Bodenpunkt, der mit Hilfe eines Stativs über einem Bolzen aufgebaut wird. Das Prüffeld verfügt über ein Referenznetz, wodurch neben der Zwei-Lagen-Prüfung auch noch ein Soll-Ist-Streckenvergleich möglich ist ([Tab. 3](#)).

2.2.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Vor der Prüfung wird der zu prüfende Scanner aufgewärmt. Anschließend werden von den beiden Scannerstandpunkten SP1 und SP2 mindestens zwei Vollscans von 360° (Zwei-Lagen-Messung) durchgeführt. Die ermittelten Koordinaten der Zielpunkte von beiden Lagen werden danach in ein vba-basiertes Prüfprogramm eingelesen. In diesem Programm werden die Streckendifferenzen zwischen erster und zweiter Lage und die Streckendifferenzen zur Sollstrecke

berechnet. Die Beurteilung, ob der Scanner die Anforderungen erfüllt, wird in einer GRÜN und ROT Klassifizierung angegeben (Feldmann 2011). Dabei gibt der Prüfer die höchstzulässige Streckendifferenz an. Das Ergebnis wird als ROT detektiert, sobald die höchstzulässige Differenz überschritten wird. Zusätzlich wird zur besseren Beurteilung noch die Ober-/Unterkonfidenzintervallgrenze berechnet. Eine detailliertere Beschreibung des Prüfprogramms befindet sich in Feldmann et al. (2011).

2.2.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

IMAGER 5006

Der firmeneigene IMAGER 5006h ist der am häufigsten geprüften Scanner. Insgesamt wurde dieser Scanner siebenmal geprüft. Bei allen Prüfungen erfüllte der Scanner die gestellten Anforderungen. Die maximale Abweichung lag nur ein einziges Mal über der vorgegebenen maximalen Abweichung; im Mittel wurde eine Abweichung von 1,7 mm im Vergleich von der ersten zur zweiten Lage erreicht. Beim Vergleich zu den Sollstrecken lag die mittlere absolute Abweichung bei 1,2 mm (Abb. 6 und Tab. 4).

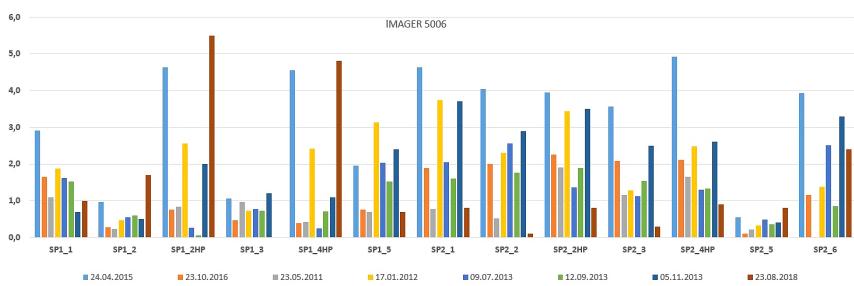


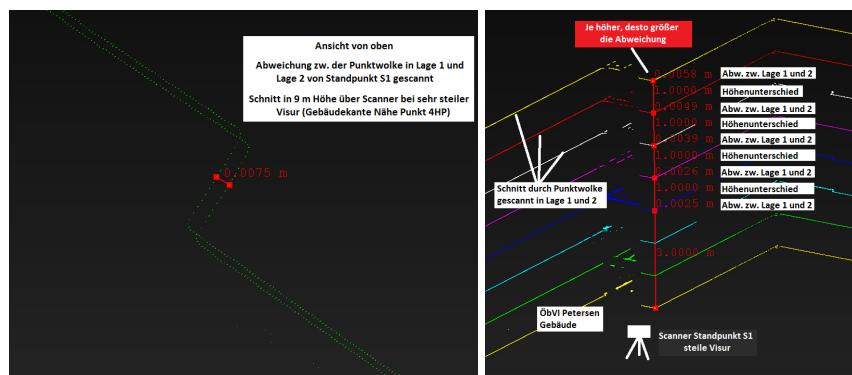
Abb. 6: Schrägstreckendifferenz zwischen erster und zweiter Lage des IMAGER 5006

IMAGER 5010

Die firmeneigenen IMAGER 5010 wurden insgesamt dreimal geprüft. Bei den ersten beiden Prüfungen erreichten sie die vorgegebenen Anforderungen. Die absolute mittlere Abweichung lag bei 2,3 mm bzw. 1,4 mm. Bei der dritten Prüfung waren die Abweichungen bis zu 11,9 mm groß. Bei genauerer Betrachtung der Messungen in LaserControl (vgl. Abb. 7 und Tab. 4) zeigte sich, dass der Scanner nicht mehr innerhalb der Vorgaben misst und wurde demzufolge zur Überprüfung zum Hersteller geschickt.

Tab. 4: Ergebnisse Prüffeld ÖbVI Petersen

Prüfling	IMAGER 5006h	IMAGER 5010 (3057)	IMAGER 5010 (3370)	IMAGER 5010 div. 5 Prüflinge
# Prüfungen	7-mal	3-mal	1-mal	1-mal
Ausgewählte Prüfgröße	Differenz zwi- schen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwi- schen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwi- schen Lage 1 und Lage 2	Differenz zwi- schen Lage 1 und Lage 2
	Schräg- strecken- differenzen	Schräg- strecken- differenzen	Schräg- strecken- differenzen	Schräg- strecken- differenzen
Mittlere absolute Abweichung	1,7 mm	2,3 mm	1,4 mm	2,5 mm
Höchste absolute Abweichung	1,2 mm	1,4 mm	0,9 mm	1,1 mm
Zulässige Abweichung	5 mm	11,9 mm (letzte Prüfung – Scanner defekt)	3 mm	5 mm
Ergebnis (grün, gelb, rot)	grün	rot	grün	
Hinweise auf systema- tische Ab- weichungen	Keine	Fehler – Scan- ner nicht mehr Arbeitsbereich (vgl. Bild)	Keine	

**Abb. 7:** Messungen in LaserControl

Scanner der IMAGER 5010 Serie

Insgesamt wurden auf dem Prüffeld weitere sechs Prüfungen mit „Fremd“-Scannern – also nicht firmeneigenen Instrumenten – der IMAGER 5010 Serie durchgeführt. Bei der nachfolgenden Betrachtung wurden alle Messungen bzw. Auswertungen berücksichtigt. Die durchschnittliche Distanzabweichung bei der Zwei-Lagen-Messung liegt bei 2,5 mm und beim Vergleich zu den Sollstrecken liegt die Abweichung im Mittel bei 1,1 mm ([Tab. 4](#)).

2.2.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Unsere Erfahrungen als Anwender zeigen, dass Prüfungen auch „Zeit“ kosten! Vor allem in der letzten Zeit konnten daher leider nicht mehr allzu viele Prüfungen auf dem firmeneigenen Prüffeld durchgeführt werden. Dieses hat hauptsächlich mit der hohen Auslastung zu tun, die sich darin zeigt, dass die Scanner während der normalen Arbeitszeit nicht für Prüfungen zur Verfügung stehen und wenig Zeit für neues Personal in die Einarbeitung der Prüfroutinen zur Verfügung steht. Eine Prüfung außerhalb der normalen Arbeitszeit ist bei unserem Prüffeld leider deutlich aufwendiger, da der Innenhof dann seine eigentliche Funktion als Parkplatz zu erfüllen hat und demgemäß mit den firmeneigenen Fahrzeugen vollgestellt ist und die Sichten auf die Zielpunkte verdeckt sind!

Dennoch sind wir fest der Überzeugung, dass sich unsere Prüfstrecke bereits vielfach bewährt hat. Neben den „GRÜN“-getesteten Instrumenten, die ein sicheres Gefühl verbreiten, haben allein die – bereits bei zwei Instrumenten – festgestellten Abweichungen bzw. nicht-erfüllten Anforderungen dazu geführt, dass diese beiden Scanner zur Überprüfung zum Hersteller geschickt und dort auch repariert und kalibriert werden mussten. Dieses zeigt, wie wichtig Prüfungen sind, denn die Instrumente führten ohne besondere Vorkommnisse oder Auffälligkeiten zu fehlerbehafteten Messungen. Der wirtschaftliche Schaden hätte groß werden können!

2.3 HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

2.3.1 Beschreibung des Prüffeldes

Geometrische Untersuchungen verschiedener terrestrischer Laserscanner wurden in der HafenCity Universität Hamburg seit 2004 durchgeführt. Die umfangreichen Ergebnisse sind in zahlreichen Publikationen veröffentlicht worden (Kersten et al. 2004, Kersten et al. 2005, Sternberg et al. 2005, Mechelke et al. 2007, Mechelke et al. 2008, Kersten et al. 2009, Lindstaedt et al. 2009, Lindstaedt

et al. 2011, Lindstaedt et al. 2012). Am alten Standort der HCU Hamburg in der Hebebrandstraße 1 (City Nord) wurden neben einem fest installierten 3D-Testfeld ($30\text{ m} \times 20\text{ m} \times 12\text{ m}$) als Prüffeld für Raumstrecken auch eine 20 m-Komparatorbahn im Labor für Distanzen verwendet. Zusätzlich wurden Untersuchungen auf einer fest installierten (amtliche) Vergleichsstrecke im Friedhof Hamburg-Ohlsdorf (für Distanzen bis 500 m) und auf verschiedenen temporär eingerichteten Vergleichsstrecken auf dem Campus für die Streckenmessgenauigkeit von Laserscannern durchgeführt. Außerdem wurden die Laserscanner in zwei weiteren Szenarien geprüft: (a) Einfluss des Auftreffwinkels auf die Streckenmessgenauigkeit durch Messung auf eine ebene schwenkbare Steinplatte (regelmäßige Untersuchung) und (b) Einfluss und Genauigkeit des Neigungssensors terrestrischer Laserscanner (einmalige Untersuchung, siehe Kersten et al. 2009).

Nach dem Umzug der Hochschule in das neue Gebäude in der HafenCity wurde im Geodätischen Labor (Raum 3.002) ein neues 3D-Testfeld mit neuen Zielzeichen installiert (siehe Blaskow et al. 2018), das für die aktuellen TLS-Untersuchungen (auch im Rahmen des Masterstudienganges Geodäsie & Geoinformatik) eingesetzt wird. Im alten 3D-Testfeld (Abb. 8) wurden schwenkbare Zielzeichen, Kugeln unterschiedlicher Größe ($d = 76 - 199\text{ mm}$) und drehbare

Tab. 5: Steckbrief Prüffeld HCU Hamburg (altes 3D-Testfeld, Abb. 2)

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	▪ Raumstrecken
Prüfgrößen	▪ Streckenabweichung Soll/Ist, Kenngrößen nach Heister (2007) und Kern (2008)
Berechnung von Kalibrierparametern	keine
Zieldefinition ($d = \text{Durchmesser}$)	schwenkbare b/w-Zielzeichen, Kugeln ($d = 76 - 199\text{ mm}$) und schwenkbare Targets mit Reflexfolie ($d = 60\text{ mm}$)
Anzahl an Zielpunkten	variabel, 19 bis 53
Vermarkungsart	M8-Gewinde im Boden und an der Wand
Referenzwerte vorhanden?	ja
Anzahl Scannerstandpunkte	5 auf verschiedenen Stockwerken
Geprüfte Zielweiten	1,5 m bis 33,0 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	–
Maximaler Höhenunterschied	12,40 m

Targets mit Reflexfolie ($d = 60$ mm) verwendet, während im neuen Testfeld (Größe $35\text{ m} \times 7\text{ m} \times 3\text{ m}$) ausschließlich ebene, mit einem Magnet fixierte Schwarz-weiß-Targets (Punktnester) benutzt werden, die mit einem sehr genauen Lasertracker eingemessen werden. Die 20 m-Komparatorbahn und die ebene schwenkbare Steinplatte wurden auch im neuen Laborraum eingerichtet und werden auch weiterhin für TLS-Untersuchungen verwendet.

Im Folgenden werden nur Ergebnisse von Untersuchungen im alten 3D-Testfeld aus den Jahren 2004 bis 2012 präsentiert. Dabei ist die Genauigkeit eines 3D-Laserscannersystems durch eine Kombination von folgenden Fehlern beeinflusst, die nicht separat bestimmt wurden: Distanz- und Winkelmessung, Einpassung der Kugeln in die Punktwolke oder Messung der Zielzeichen in der Punktwolke und Zentrierfehler der Kugeln bzw. Targets.

In Tab. 5 sind die technischen Spezifikationen des alten 3D-Testfeldes auf dem Campus City Nord zusammengefasst.

2.3.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

In der Halle des Gebäudes D am alten Hochschul-Campus der City Nord wurde das 3D-Testfeld 2003 dauerhaft angelegt. Dazu wurden 53 Referenzpunkte, die sowohl mit Prismen als auch mit Kugeln oder Zieltafeln signalisiert werden konnten, über drei Ebenen (siehe Abb. 8) auf dem Boden, in den Wänden oder an Betonpfeilern in Form von Gewinden (M8) verankert. Für die Signalisierung der Referenzpunkte wurden spezielle Adapter gebaut, um eine genaue, stabile und wiederholbare Einpassung der Kugeln oder Zieltafeln zu garantieren.

Die Referenzpunkte wurden vor der Messkampagne mit einem Präzisions-tachymeter von fünf Standpunkten aus gemessen und in einer zwangsfreien



Abb. 8: Altes 3D-Testfeld der HafenCity Universität Hamburg für geometrische Untersuchungen terrestrischer Laserscanner (Campus City Nord)

3D-Netzausgleichung mit PANDA mit einer Standardabweichung von kleiner als 1 mm in einem lokalen Netz bestimmt.

Gemäß der Richtlinie VDI/VDE 2634 (Blatt 2 und 3) erfolgen die Abnahme und Überwachung von flächenhaft messenden optischen 3D-Messsystemen durch die Messung kalibrierter Prüfkörper in regelmäßigen Intervallen. Ein wichtiger Qualitätsparameter stellt die Kugelabstandsabweichung, ähnlich wie in der ISO 10360 definiert, dar. Anstelle von kalibrierten Prüfkörpern im Objektraum wurden an der HCU Hamburg Referenzdistanzen zwischen den Kugeln für die Genauigkeitsuntersuchung von terrestrischen Laserscannern verwendet.

Im Rahmen der verschiedenen durchgeführten Messkampagnen im 3D-Testfeld wurden für alle untersuchten Instrumente von fünf Scannerstandpunkten auf drei Etagen Kugeln mit einem Durchmesser von 199 mm (einmal auch 145 mm) je nach Messkampagne auf 29 bis 53 Referenzpunkten gescannt. Die Punktwolken aller Kugeln wurden in RealWorks Survey manuell segmentiert, so dass in der bereinigten Punktwolke der Kugelmittelpunkt jeweils mit definiertem Radius bestimmt wurde. Alle Kugelkoordinaten der fünf Scannerstandpunkte wurden in RealWorks Survey in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Anschließend wurden aus den bestimmten Kugelkoordinaten und den Referenzkoordinaten in allen möglichen Kombinationen Strecken berechnet und miteinander verglichen. In einigen Untersuchungen wurden zusätzlich sieben Strecken, die in Anlehnung der Richtlinie VDI/VDE 2634 im Testfeld definiert wurden, für den Vergleich mit der Referenz herangezogen. Diese Ergebnisse sind aber nicht in [Tab. 4](#) enthalten, sondern müssen den in Kap. 2.1 aufgeführten Publikationen entnommen werden.

2.3.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Seit 2004 wurden folgende terrestrische Laserscanner an der HCU Hamburg getestet: Trimble (Mensi) GS100 und GS200, Trimble GX und FX, Leica Scanstation 1/2, HDS6000, C10 und BLK360, FARO LS 880 HE und Photon 80/120, Z+F IMAGER 5006/5006i/5006h und 5010, Riegl LMS-Z420i, VZ-400 und VZ-1000. Die Ergebnisse der im alten 3D-Testfeld untersuchten Scanner sind in [Tab. 6](#) zusammengefasst, wobei manche Scanner mehrfach geprüft wurden, jedoch nur maximal zwei Ergebnisse in [Tab. 6](#) dargestellt sind. Die Scanner von Riegl hatte im Testfeld sowohl auf Kugeln als auch die Reflexfolien (Goecke-Target) gescannt, was in [Tab. 6](#) auch gekennzeichnet ist.

2.3.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Aus den Untersuchungen leiten sich folgende Rückschlüsse ab: (a) Die terrestrischen Laserscanner haben sich in ihrer technischen Entwicklung hinsicht-

lich Streckenmessgenauigkeit verbessert, so dass das Testfeld auf dem Campus City Nord letztendlich nicht mehr den gesteigerten Ansprüchen genügte, (b) die Wiederholbarkeit ist bei den meisten Scanner sehr gut, d. h. die Untersuchungsergebnisse konnten in der Wiederholung sehr oft bestätigt werden, (c) es soll-

Tab. 6: Ergebnisse 3D-Testfeld HCU Hamburg [in mm]

Prüfling	Trimble GS100	Leica ScanSt 1	Z+F 5006	FARO LS 880	Riegl Z420i ²
# Prüfungen	2	2	2	1	1
Prüfgröße	Raumstreckenvergleich (Soll/Ist)				
Mittlere absolute Abweichung	3,1 2,4 6,5 4,6	3,6/1,8 2,6 6,7/2,3 1,3/2,2	1,8/2,1 1,2/2,8 2,3 2,4	5,0 2,3/2,8 2,8 2,9/2,9	6,5 1,4 2,9/2,9
Höchste absolute Abweichung	14,2/xx 8,6 1 23,0	9,2/6,4 8,6 27,7/9,0 6,1/8,4	7,5/7,7 5,4/9,0 9,2 8,5	41,1 9,8/10,5 6,9 11,9/8,8	19,8 4,8 11,9/8,8
Zulässige Abweichung ³	n/a n/a 7 n/a	4 4 5 4	7,5 1,8–6,5 0,4–6,8 0,3–2,7	3 (@ 25 m) 2 (@ 25 m) 4 5	10 5 5
Spanne ($\Delta L_{\max} - \Delta L_{\min}$)	17,4 n/a 43,6 30,8	11,5/11,8 13,4 13,0/16,2 9,7/15,1	14,0/13,4 8,7/17,2 16,3 15,6	71,8 15,0/17,6 8,4 18,1/16,1	26,3 8,3 18,1/16,1
Systematische Abweichungen	-2,7 n/a 5,5 -3,8	-3,6/-0,7 -2,2 0,2/-0,5 0,8/0,8	0,3/-0,4 0,5/1,4 0,1 0,0	0,1 1,5/1,5 1,5 1,5/1,7	6,3 1,0 1,5/1,7

¹ Scans von Zielzeichen mit Reflexfolie² Scans von Kugeln ($d = 199$ mm)³ Streckenmessgenauigkeit auf 50 m

ten die herstellereigenen Zielzeichen verwendet werden, was insbesondere beim Riegl-Scanner in den Ergebnissen deutlich wurde, da das Zielzeichen mit Reflexfolie deutlich besser abschnitt als die verwendeten Kugeln.

Beim Riegl VZ-400 der HCU wurde bei mehreren Untersuchungen (Juli und Dezember 2011) festgestellt, dass bei kurzen Strecken bis max. 15 m signifikant höhere Differenzen in den Strecken gegenüber der Referenz aufgetreten sind. Nach Rücksprache mit der Firma Riegl war dieser Fehler auf eine fehlerhafte Nahbereichskorrektur dieses speziellen Gerätes zurückzuführen, was durch einen Geräteservice behoben wurde.

Bei einem Scanner eines anderen Herstellers trat bei der Distanz 50 m eine signifikante Abweichung zur Referenz auf, was an einem falschen Kalibrierungsfile lag. Die Untersuchungen in den verschiedenen Hochschulen tragen zu einem besseren Verständnis der Systeme bei und ermöglichen die Aufdeckung von Kalibrierungsfehlern, was im praktischen Projekteinsatz eher nicht möglich ist.

2.4 Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation

2.4.1 Beschreibung des Prüffelds

Das TLS-Prüffeld der HTW Dresden beruht auf einem Soll-Ist-Vergleich zu koordinatenmäßig sehr genau bekannten Zielmarken. Dazu wurde im Laborgebäude LGS der HTW Dresden ein festes Prüffeld installiert. Dieses Testfeld befindet sich in einer geschlossenen Halle im Laborgebäude Schnorrstraße (LGS-Halle). Das Gebäude ist eine ca. 70 m lange, 25 m breite und 12 m hohe



Abb. 9: Übersicht über das Passpunktnetz der HTW Dresden für Scanner der Firma FARO

doppelwandige klimatisierte Industriehalle, in der sich mehrere Labore der HTWD mit zahlreichen bodennahen Einbauten befinden. Das Testfeld wurde als hierarchisches Netz in drei Stufen so angelegt, dass es jederzeit erweiterbar und für Scanner unterschiedlicher Hersteller nutzbar ist. Aufbauend auf einem Basisnetz aus sechs stabil vermarkten Bodenpunkten mit einer 3D-Koordinatengenauigkeit von besser als 1,0 mm im Hallenboden existiert als zweite Ordnung ein Festpunktfeld für Scanner der Firma Trimble (weiße Trimble-Kugeln vor einem dunklen Hintergrund), RIEGL (Passmarken aus Reflexfolie des Typs RIEGL Flat), Leica (HDS- und Black & White-Zielmarken) Zoller + Fröhlich sowie FARO (überwiegend Schachbrett-Zielmarken). Diese Ziele wurden in unterschiedlichen Höhen von 1 m bis 10 m über dem Hallenboden signalisiert (siehe Abb. 9 und Tab. 7). Die 3D-Genauigkeit dieser insgesamt 166 stabilen Festpunkte, die noch einmal in Passpunkt und Prüfpunkte unterteilt werden, ist

Tab. 7: Steckbrief Prüffeld HTW Dresden

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Koordinatenabweichungen ▪ Höhenabweichungen ▪ Streckengenauigkeit (bis 60 m) ▪ Additionskonstante ▪ Winkelabweichungen ▪ Höhenindexabweichung ▪ Einfluss unterschiedlicher Targets ▪ Auflösungsvermögen
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soll-Ist-Koordinatenvergleich ▪ Koordinatenunterschiede bei Scannen in 2 Lagen für unterschiedliche Prüfpunkte ▪ Referenzierungsgenauigkeit
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	7 unterschiedliche Targets
Anzahl an Zielpunkten	insgesamt 187
Vermarkungsart	Klebemarken oder Bolzen in der Wand
Referenzwerte vorhanden?	Ja (hochgenau)
Anzahl Instrumentenstandpunkte	3 jedoch beliebig erweiterbar
Geprüfte Zielweiten	5 m bis 63 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	50 gon bis 130 gon
Maximaler Höhenunterschied	10,5 m

stets besser als 2 mm. Alle Punkte wurden im Abstand von zwei bis drei Jahren insgesamt fünfmal jeweils doppelt im Abstand von 3 bis 4 Wochen bestimmt, um die Unveränderlichkeit zu garantieren.

Zusätzlich gibt es ein Netz sogenannter natürlicher Punkte in der gleichen Halle, um realistische Ergebnisse über die erreichbaren Genauigkeiten von schwieriger erfassbaren topographischen Detailpunkten zu erhalten. Es besteht aus 21 markanten Schrauben, Nieten oder Metallecken, die alle mit einer räumlichen Punktgenauigkeit von besser als 4 mm tachymetrisch bestimmt wurden. Sie sind bedingt durch ihre unterschiedliche Form ungenauer anzielbar und können von den Scannern nicht automatisch als Zielmarken extrahiert, sondern nur als Punktwolkenobjekte erfasst werden.

2.4.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Prüfung besteht darin, dass man den Scanner nach Aufbau auf einer Metallplattform in ca. 6 m Höhe über dem Hallenboden oder auf einem anderen Punkt durch Scannen von sechs Prüfmarken stationiert und die Referenzierungsgenauigkeit überprüft. Danach werden 10 bis 30 Prüfpunkte hoher Genauigkeit ebenfalls hochauflösend gescannt, die sich in unterschiedlichen Entfernung, Höhen, bzw. Richtungen befinden, wobei im Regelfall auch unterschiedliche Zielmarken genutzt werden. Damit ist es im TLS-Prüffeld der HTW Dresden möglich, aus den Soll-Ist-Koordinatenvergleichen Lage-, Höhen- und 3D-Punktgenauigkeiten sowie daraus abgeleitet Strecken- und Winkelgenauigkeiten für die zu untersuchenden Scanner und somit gerätebezogene Systemgenauigkeiten zu ermitteln ([Abb. 10](#)).

Zusätzlich besteht die Möglichkeit zu weiteren Spezialuntersuchungen im gleichen Prüffeld einschließlich der Kalibrierung der Mounting von Spiegelreflexkameras auf entsprechenden Scannern der Firma RIEGL. So kann beispielsweise das Auflösungsvermögen eines Scanners in unterschiedlichen Entfernungen durch Scannen eines 3D-Siemenssterns bestimmt werden.

2.4.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

An der HTW Dresden wurden seit Einrichtung des TLS-Prüffeldes 2006 mehr als 150 Scannerprüfungen von etwa 45 unterschiedlichen Geräten bzw. 17 Gerätetypen von sieben verschiedenen Herstellern (RIEGL, Leica, Trimble, FARO, Z&F, Callidus, Surphaser) durchgeführt. Das betraf Prototypen, Nullseriengeräte, Scanner im Zusammenhang mit Abschluss- oder Projektarbeiten aber auch kommerzielle Geräteprüfungen von defekten oder Problemgeräten (z. B. Geräte mit Sturzschäden). Aufgrund dieses breiten Spektrums ist es nicht möglich, hier einzelne Ergebnisse zu veröffentlichen. Verallgemeinert kann lediglich werden,

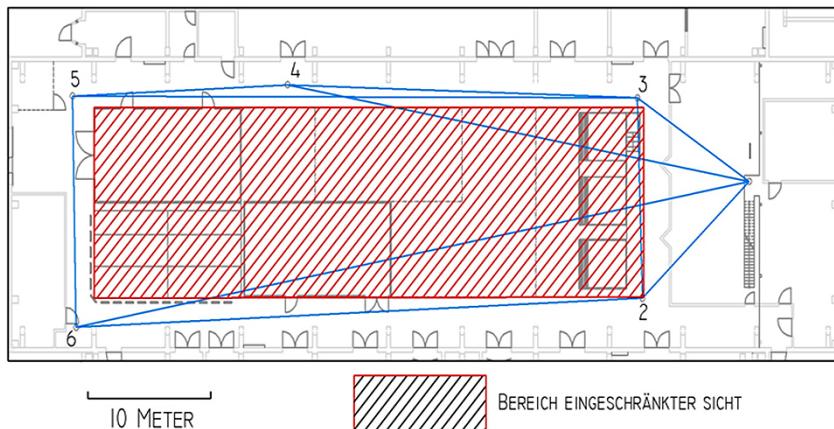


Abb. 10: Skizze des Basisnetzes zur Prüfmarkenbestimmung des Prüffeldes der HTW Dresden. Anmerkung: Die Punkte 1 bis 6 sind im Stahlbeton vermarkte Bolzen des Basisnetzes mit einer 3D-Genauigkeit von $\leq 1,0$ mm, auf die sich die Koordinaten der übrigen 166 Prüfmarken beziehen, wobei sich der Punkt 1 ca. 6 m über dem Hallenboden befindet. Im rot schraffierten Bereich befinden sich nur Punkte an der Decke, im übrigen Bereich an den Seitenwänden, wo die Prüfmarken mittels Verklebungen fest vermarkt sind.

dass mehrheitlich besonders gute Ergebnisse bei TLS-Prüfungen von Scannern der Firmen Z&F und Leica festgestellt wurden. Einzelne Ergebnisse können Wehmann et al. (2007, 2008, 2009a, b, 2012, 2013) entnommen werden.

Neben den Geräteprüfungen in unserem TLS-Prüffeld erfolgen weiterhin Geräteuntersuchungen nach dem DVW-Prüfverfahren sowie dem Triangle-Verfahren nach Tüxsen und Gottwald, die Bestandteile der Praktika im Lehrgebiet „Terrestrisches Laserscanning“ im 6. Semesters der Bachelorausbildung im Studiengang Vermessung/Geoinformatik sind sowie vereinzelt auch Untersuchungen in unserem Reichweitentestfeld auf dem Dach des Zentralgebäudes der HTW (für Reichweiten bis 1200 m).

2.5 Technische Universität München, Geodätisches Prüflabor

2.5.1 Beschreibung des Prüffeldes

Das Testfeld der TU München ist im Rahmen einer Diplomarbeit im Jahr 2012 (Reidl 2012) als Prüffeld für Instrumentenabweichungen (Achsabweichungen) und zur Systemkalibrierung erstellt worden. Es ist installiert in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft und als 3D-Testfeld

Tab. 8: Steckbrief Prüffeld TU München

Kriterium	Realisierung
Geprüfte Abweichungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zielachsabweichung ▪ Zielachsexzentrizität ▪ Kippachsabweichung ▪ Höhenindexabweichung
Prüfgrößen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messgrößen in Lage 1 und Lage 2 vs. Werte aus ausgeglichenen Koordinaten
Berechnung von Kalibrierparametern	Achsabweichungen
Zieldefinition	Herstellerspezifisch beliebig
Anzahl an Zielpunkten	12
Vermarktsart	Schraubbolzen
Referenzwerte vorhanden?	Nein
Anzahl Instrumentenstandpunkte	5
Geprüfte Zielweiten	3 m bis 29 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	0 gon bis 160 gon

mit einem Kalibriervolumen von $29 \times 5 \times 10 \text{ m}^3$ konzipiert. Es besteht aus fünf Standpunkten sowie bis zu 12 als Schraubbolzen vermarkten Zielpunkten, die im gesamten Messvolumen der Scanner (inkl. der Zenitrichtung, in die einzelne Achsabweichungen besonders stark wirken) verteilt sind und mit beliebigen Herstellertargets bestückt werden können. Die Messungen finden in zwei Lagen statt und werden im Rahmen einer freien Netzausgleichung ohne Kenntnis von Sollkoordinaten kombiniert (Abb. 11 und Tab. 8).



Abb. 11:
Das Prüffeld nutzt den freien Raum in der Hallenmitte. Als Standpunkte dienen Stativpunkte auf verschiedenen Ebenen auf den Umläufen und zentralen Konsole.

2.5.2 Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Zielpunkte werden von den Standpunkten in beiden Lagen aufgenommen. Die Auswertung der Targets erfolgt in der jeweiligen Herstellersoftware. Aus den lokalen Standpunktkoordinaten werden polare Messgrößen für eine freie Ausgleichung rückgerechnet. Die Auswertung erfolgt in mehreren Stufen:

- Freie Netzausgleichung ohne Zenitpunkte
- Bei Abweichungen:
 - Kalibrierung von Ziel-, Kippachsabweichung und Zielachsexzentrizität mit Hz-Ablesungen mit Zenitpunkten
 - Kalibrierung der Höhenindexabweichung aus V-Ablesungen ohne Zenitpunkte

Tab. 9: Ergebnisse Prüffeld TU München

Prüfling	ScanStation P20	Leica HDS7000 / Z+F Imager 5010 (1 Prüfling)	ScanStation P20	Leica HDS7000 / Z+F Imager 5010 (1 Prüfling)
# Prüfungen	2	2	2	2
Ausgewählte Prüfgröße	Std. Abw. der Strecken- messung	Std. Abw. der Strecken- messung	Std. Abw. der Richtungs- messung	Std. Abw. der Richtungs- messung
Mittlere absolute Abweichung	0,57 mm	1,07 mm	1,30 mgon	2,97 mgon
Höchste absolute Abweichung	–	–	–	–
Zulässige Abweichung	2 mm / 10 m	1,6 mm / 10 m	2,47 mgon	7,96 mgon
Ergebnis (grün, gelb, rot)	grün	grün	grün	grün
Hinweise auf systemati- sche Abwei- chungen	–	–	Kipp- (4,2 mgon) und Höhenindex- abweichung (1,24 mgon)	Kipp- (11,99 mgon) und Höhenindex- abweichung (-4,47 mgon)

- Erneute freie Netzausgleichung im korrigierten Modell ohne Zenitpunkte
- Ableitung von Genauigkeiten aus den ausgeglichenen Koordinaten der Zielpunkte

Zur Beurteilung signifikanter Instrumentenfehler wird ein *t*-Test durchgeführt.

2.5.3 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

Bisher sind im Labor der TUM keine umfangreichen Prüfmessungen durchgeführt worden. Die existierenden vollständigen Prüfungen stammen aus der Anlage des Kalibrierfelds ([Tab. 9](#)).

2.5.4 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Die Werte der polaren Messgrößen liegen deutlich unter den spezifizierten Genauigkeiten. Ein direkter Vergleich mit den Spezifikationen des Messrauschens eines Einzelpunkts ist jedoch aus der Gruppenverbesserung des Ausgleichungsmodells nicht möglich, so dass die Resultate lediglich einen Anhaltspunkt liefern.

2.6 Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – i3mainz

2.6.1 Prüfkonzept, Beschreibung des Prüffelds und Beschreibung des Prüfvorgangs

Die Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laser-scannersystemen wurde in den Jahren 2008 bis 2011 am i3mainz erarbeitet und an verschiedenen TLS angewendet, wobei verschiedene Realisierungen von Prüffeldern genutzt wurden. Ziel und Zweck sind wie folgt festgelegt: „*Die ... Richtlinie enthält praxisnahe Abnahme- und Überwachungsverfahren zur Beurteilung von terrestrischen Laserscannern (Impulslaufzeitverfahren und Phasenvergleichsverfahren) hinsichtlich ihrer Genauigkeit. ... Die Kenngrößen dienen der Spezifikation der TLS-Systeme sowie dem Vergleich unterschiedlicher Messsysteme.*“ (Kern 2010)

Mit der Prüfung soll also ausschließlich die Leistungsfähigkeit der TLS objektiv quantifiziert werden. Etwaige Instrumentenabweichungen können nicht damit nicht aufgedeckt werden. In den Kenngrößen fließt bewusst eine Vielzahl der (unbekannten) systematischen und zufälligen Einflüssen des TLS-Systems ein und liefern so Orientierungsparameter darüber, welche Qualität die Punktwolken im Rahmen eines konkreten Dokumentationsprojektes haben/haben

werden. Werden die Kenngrößen mit den Herstellerangaben verglichen kann mit den Kenngrößen auch die Gebrauchsfähigkeit bzw. der Justierungszustand des TLS beurteilt werden. Wobei hier das Problem der „Umrechnung“ von Standardabweichung in Kenngrößen besteht, da in den Datenblättern die Kenngrößen nicht explizit aufgeführt werden. Das Prüfverfahren steht somit in der Philosophie der VDI/VDE-Richtlinien, wie sie auch für bildbasierte Messsysteme (VDI/VDE 2634), existieren und regelmäßig angewendet werden.

Die TLS-Prüfrichtlinie definiert die Kenngrößen Abstandsabweichung, Antastabweichung, Kugelradienabweichung und Auflösungsvermögen, welche allesamt als abhängig von der Messentfernung, den Betriebs- und Umweltbedingungen sowie im Besonderen von den Reflektionseigenschaften der Zielobjekte angesehen werden müssen. Zu ihrer Bestimmung sind Prüfkörper notwendig. Die Abstandabweichung wird aus dem Vergleich von Soll- zu Ist-Positionen von Zielmarken in einem 3D-Prüffeld abgeleitet. Die Antastabweichung beschreibt das Rauschen der Messpunkte an einer Objektoberfläche. Hier bieten sich als Prüfkörper Referenzkugeln (z. B. TLS-Passkugeln) und Referenzebenen (z. B. Kodak-Grauwertkarte) an. Anhand der Referenzkugeln kann auch die Kugelradienabweichung berechnet werden. Mit einem Böhler-Stern, der ein beliebig orientiertes Mauerfugenbild verschiedener Fugenbreiten und -tiefen abstrahieren soll, kann das Auflösungsvermögen bewertet werden. Das Auflösungsvermögen wird u. a. davon beeinflusst, wie gut die Fähigkeit des TLS ist, Tiefensprünge an Kanten zu erfassen und wie „fein“ der Messstrahl (Strahldivergenz, Verarbeitung von Mischsignalen) ist.

Das am i3mainz im Labor „Instrumentenkunde“ ($L \times B \times H: 20\text{ m} \times 7\text{ m} \times 4,6\text{ m}$) dauerhaft eingerichtete Prüffeld zur Bestimmung der Kenngrößen besteht aus ca. 20 räumlich verteilten Zielmarken („Schachbrett“ und „Weißer Kreis“). Von drei bis fünf Standpunkten aus (Messpfeiler) werden diese gescannt. Zeitgleich wird der Böhler-Stern in Kippachshöhe und orthogonal zur Messrichtung aufgestellt sowie ca. 10 Passkugeln (FARO, $r = 73,1\text{ mm}$) räumlich verteilt. Pro Standpunkt werden Vollpanorama-Scans gemessen. Mit diesem Aufbau lassen sich die Kenngrößen für einen Messbereich von 1 m bis 15 m ableiten. Zusätzliche Messungen über größere Messentfernungen werden im Außenbereich des Campus der Hochschule Mainz durchgeführt. An die TLS werden keine besonderen Anforderungen wie z. B. gesonderte Messung in zwei Lagen gestellt. Die Auswertung der Punktwolken erfolgt in der Regel mit der Software des Hardware-Herstellers, soweit diese die Bestimmung der Kennwerte erlaubt. Ansonsten kommen Eigenentwicklungen des i3mainz zum Einsatz, die das PTG-Format für den Austausch der Punktwolken verwenden ([Tab. 10](#)).

Tab. 10: Steckbrief Prüfverfahren i3mainz

Kriterium	Realisierung
Abstandsabweichung	Zielmarken mit Soll-Koordinaten
Antastabweichung	Prüfkörper Kugel Prüfkörper Ebene
Kugelradienabweichung	Prüfkörper Kugel mit bekanntem Radius
Antastabweichung	Prüfkörper Böhler-Stern (bekannte Spaltenbreite und -tiefe)
Berechnung von Kalibrierparametern	Nein
Zieldefinition	Schachbrett, Weißer Kreis
Anzahl an Zielpunkten	ca. 20 Zielmarken ca. 10 Kugeln ca. 10 Ebenen 1 Böhler-Stern
Referenzwerte notwendig?	ja
Anzahl Instrumentenstandpunkte	3 bis 5
Geprüfte Zielweiten/Messvolumen	1 m bis 15 m / 20 m × 7 m × 4 m
Geprüfter Vertikalwinkelbereich	gesamter Messbereich des TLS (theoretisch)
Maximaler Höhenunterschied	4,60 m
Messdauer, gesamt	ca. 2 h (inkl. Auf-/Abbau)
Auswertung	6-Parameter-Transformation Hersteller-Software, Eigenentwicklungen

2.6.2 Geprüfte Instrumente und Ergebnisse

In den letzten Jahren sind für institutseigene und andere TLS der Hersteller Leica (HDS 3000, HDS 6000, HDS 7000, C10, P20, P40), Zoller + Fröhlich (Imager 5010) und FARO (LS 880, Photon 80, Focus 3D, Focus X130) Prüfungen – meist im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten – durchgeführt worden. Aktuell wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Baumann 2018) parallel für die Leica Scanstation P20 und Leica Scanstation P40 des i3mainz die Kenngrößen der TLS-Prüfungsrichtlinie bestimmt. Hinsichtlich des Auflösungsvermögens konnten dabei keine praxisrelevanten Unterschiede festgestellt werden. Beide Geräte liefern erst bei „Fugen“ mit einer Breite resp. Tiefe von mehr als 10 mm realitätsnahe Werte. Auch die Kugelradienabweichungen sind für P20 und P40

Tab. 11: Abstandsabweichung für P20 und P40

Standpunkt	Anzahl Zielmarken „Schachbrett“	Abstandsabweichung ΔL [mm]	
		P20	P40
1	8	3,393	4,017
2	8	3,161	3,226
3	8	3,063	3,399
4	8	3,186	2,845
1 bis 4	32	3,020	3,398
Herstellerangaben: Leica 2013, Hexagon 2017		3D-Position: 3 mm @ 50 m 6 mm @ 100 m	3D-Lagegenauigkeit: 3 mm bei 50 m 6 mm bei 100 m
Zielmarkenerfassung: Standardabweichung von 2 mm bei 50 m		Zielmarkenerfassung: Standardabweichung von 2 mm bei 50 m	Zielmarkenerfassung: Standardabweichung von 2 mm bei 50 m

nahezu gleich mit $R_K < 1$ mm und im untersuchten Messbereich von 1 m bis 14 m entfernungsunabhängig.

Interessant ist der Vergleich der Abstandsabweichungen (Tab. 11) zwischen den Geräten und mit den Herstellerangaben. Die P20 und P40 haben im Nahbereich ein ΔL von etwas mehr als 3 mm, wobei die P40 schlechter ist als die P20. Der Hersteller gibt für beide Geräte eine Zielmarkenerfassungs-Standabweichung von 2 mm (@ 50 m) für „Schwarz-weiß-Zielmarken“ an. Dies kann als Untergrenze für die zu erwartende Abstandsabweichung interpretiert werden, da damit nur die „Zielgenauigkeit“ des TLS bewertet wird. Da die Abstandsabweichung durch eine 6-Parameter-Transformation zu mehreren im Raum verteilten Referenzpunkten berechnet wird sind darin noch weitere Einflüsse enthalten (Instrumentenabweichungen wie z. B. Achsabweichungen). Mit der 3D-Positionsgenauigkeit 3 mm @ 50 m gibt der Hersteller hier ein vergleichbares Maß an.

In der Abb. 12 sind die Antastabweichungen R_{Ebene} gemessen auf eine 20 cm × 20 cm große Kodak-Grauwertkarte über einen Messbereich von 5 m bis 120 m dargestellt. Der Wert für die P20 bei 120 m entstammt einer sehr kleinen Stichprobe ($n < 10$) und ist daher mit Vorsicht zu beurteilen. Hier zeigt sich für die P40 ein deutlich geringes „Rauschen“ – Faktor 2,5 gegenüber der P20. In dünner Linienbreite sind zum Vergleich die Herstellerangaben eingezzeichnet. Wie man sieht konnten die Herstellerangaben nicht reproduziert werden. Dies könnte daran liegen, dass die benutzte Grauwertkarte andere Reflektionseigenschaften hat als die vom Hersteller genutzten Referenzmaterialien.

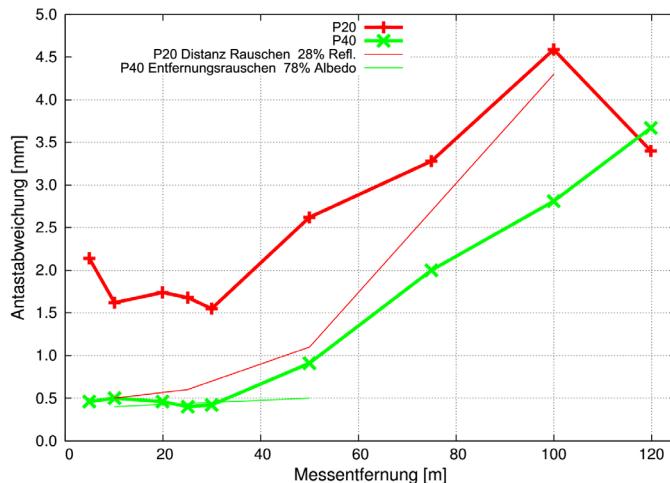


Abb. 12:
Antastabweichung an einer Kodak-Grauwertkarte für P20 und P40 sowie Herstellerangaben

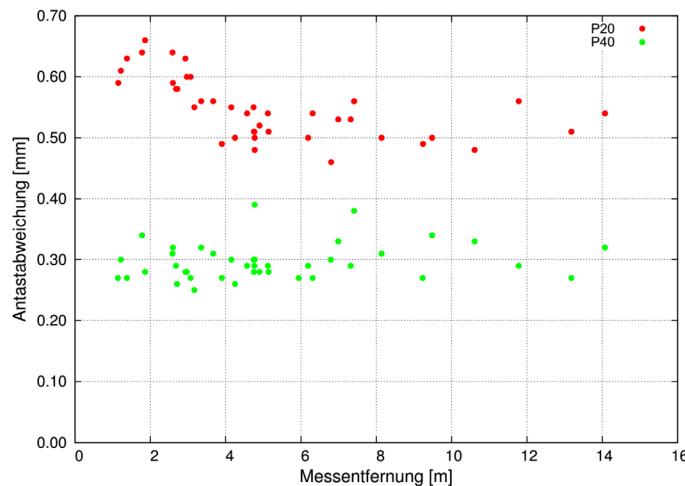


Abb. 13:
Antastabweichung an Referenzkugeln für P20 und P40

Die Antastabweichungen R_{Kugel} gemessen auf Kugeloberflächen ist bei der P40 deutlich geringer als bei der P20. Die Abb. 13 zeigt für die P40 ein um den Faktor 2 geringeres Rauschen im Messbereich von 1 m bis 14 m.

2.6.3 Rückschlüsse und Auffälligkeiten

Die Bestimmung eines Maßes für das Auflösungsvermögen ist ein schweres Unterfangen (Kern 2011). Zuverlässige Werte konnten bislang nur bei älteren Impulsscannern bestimmen werden. Auch wenn die Qualitätsangaben (Dis-

tanz-, Positionsgenauigkeit und Rauschen) der Hersteller allesamt im niedrigen mm-Bereich liegen, so sind die TLS meist nicht dazu geeignet, feine Detailstrukturen mit einer hoch dynamischen Tiefenvariation unterhalb von 10 mm maßgetreu wiederzugeben. Ein Fugenbild einer Fassadenaufnahme zum Beispiel ist daher optisch sauber – geringes Oberflächenrauschen – aber geometrisch systematisch verzerrt. Über die Entwicklungsgeschichte der TLS-Geräte hinweg wurden die Reichweite, die Messgeschwindigkeit und das Messrauschen erfolgreich optimiert. Modernere Geräte haben auch eine bessere Abstandabweichung. Das Problem der geringen Kantenschärfe besteht leider weiterhin.

3 Zusammenstellung der empirischen Ergebnisse

Kap. 2 beschreibt sechs verschiedene Prüffelder und die empirischen Ergebnisse von einer Vielzahl getesteter terrestrischer Laserscanner. Diese Analyse betrachtet die empirischen Ergebnisse von ca. 35 Prüflingen, wobei sich diese in der Regel auf einmalige Prüfmessungen beziehen, teilweise aber auch auf Mittelwerte von insgesamt 16 Prüfmessungen. Die bei der Prüfung verwendeten TLS-Prüffelder unterscheiden sich erheblich in ihrer Realisierung: Sie reichen

- von sieben fest installierten Zielpunkten bis hin zu mehr 150 Zielpunkten,
- von zwei TLS-Standpunkten bis hin zu fünf TLS-Standpunkten,
- von 20 m geprüfter Maximaldistanz bis hin zu mehr als 60 m geprüfter Maximaldistanz,
- von 4 m Höhenunterschied bis zu mehr als 12 m Höhenunterschied,
- von dem reinen Vergleich zwischen Zielzeichenkoordinaten bis hin zu zusätzlichen Analysen wie z. B. dem Auflösungsvermögen.

Aus dieser Variation wird ersichtlich, dass TLS-Prüffelder zwar alle zum Ziel haben, die erreichbare Messgenauigkeit terrestrischer Laserscanner in einem gewissen Messbereich zu analysieren, aber dennoch unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Dahingegen teilen alle TLS-Prüffelder das Vorgehen zur Ermittlung der Prüfgrößen: Die Auswirkung möglicher systematischer Abweichungen wird offenbart, indem die Messungen des Laserscanners verglichen werden, entweder mit einem Sollwert, der Messung in anderer Lage oder der Messung von einem anderen Standpunkt.

Aufgrund dieser Tatsache lassen sich die Ergebnisse der Prüflinge, ermittelt an unterschiedlichen TLS-Prüffeldern, auch in ihrer Aussage vergleichen, wenn auch nicht unbedingt anhand exakter Zahlenwerte zu empirisch bestimmten Messabweichungen. Übereinstimmend können wir daher auf Basis der Prüflinge der sechs TLS-Prüffelder festhalten:

- In der Regel deuten die Ergebnisse der geprüften Laserscanner darauf hin, dass die Spezifikationen des Herstellers eingehalten werden.
- Die Genauigkeit ist in der Regel sogar besser als angegeben.
- Weder einzelne Baureihen noch einzelne Hersteller fallen bei den Prüfmes-sungen negativ auf. Vielmehr sind die erzielten Genauigkeiten in vielen Fällen deutlich höher, als spezifiziert.
- Vereinzelt sind Teilergebnisse außerhalb der spezifizierten Größen. Dies kann in einigen Fällen auch auf die Ungenauigkeit der Messdurchführung – die nicht exakt abgeschätzt wurde – oder die immer vorhandene Irrtumswahr-scheinlichkeit zurückzuführen sein. Daher sollte im Fall einer Ablehnung des Laserscanners immer eine erneute Prüfung stattfinden. In den meisten Fällen bestätigt diese Wiederholungsprüfung die Funktionstüchtigkeit des Laser-scanners.
- Von den 35 Prüflingen wurden vier Prüflinge in verschiedenen TLS-Prüffel-dern auffällig. Ursächlich hierfür waren ein Sturz, eine fehlerhafte Nahbe-reichskorrektur und ein falsches Kalibrierfile im Laserscanner. In einem Fall ist die Ursache unbekannt und evtl. auf eine lange Nutzungsdauer zurückzu-führen.

4 Fazit und Ausblick

Im Gesamten zeigen diese Ergebnisse, dass die geprüften terrestrischen Laser-scanner in der Regel mindestens so genau messen, wie in den Spezifikationen angegeben. Hierbei beziehen wir uns – wie im gesamten Artikel – immer nur auf die instrumentelle Unsicherheit, die bei einer Messung auf die o.g. Zielpunkt-definitions in den o.g. Messvolumina wirkt. Im Rahmen dieser Einschränkung können sich Nutzer der hier beschriebenen Baureihen terrestrischen Laserscan-ner daher mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit darauf verlassen, dass ihr Instru-ment mindestens entsprechend der spezifizierten Genauigkeit arbeitet. Nur in begründeten Ausnahmefällen liegen geringere Genauigkeiten vor, hierbei gibt es jedoch weder auffällige Hersteller noch auffällige Baureihen.

Die Aufgabe von TLS-Prüffeldern sollte daher weiter sein, diese auffälligen Laserscanner vor einem Messjob zu identifizieren, um während der Messauf-gabe im Feld nicht von einer schlechten Messgenauigkeit überrascht zu werden.

Die Universitäten und Hochschulen bieten sich auch weiterhin an, neue Ge-nerationen von terrestrischen Laserscanner in ihren Einrichtungen und Prüffel-dern geometrisch zu untersuchen, um die Ergebnisse (u. a. mit den Herstellern) zu diskutieren und anschließend zu veröffentlichen.

In Zukunft könnte sich anbieten, einen Ringversuch mit den unterschiedli-chen TLS-Prüffeldern und mehreren terrestrischen Laserscannern, ähnlich wie

bereits 2011 an der HCU Hamburg erfolgt (Lindstaedt et al. 2012), durchzuführen. So könnten die aus den Prüffeldern ermittelten empirischen Ergebnisse zwischen den verschiedenen Standorten vergleichbarer werden. Des Weiteren ließen sich Stärken und Schwächen einzelner TLS-Prüffelder besser aufdecken.

Literatur

- Baumann, P. (2018): Genauigkeitsuntersuchungen von terrestrischen Laserscannern. Hochschule Mainz, Bachelorarbeit, Standnummer B300, unveröffentlicht.
- Blaskow, R.; Lindstaedt, M.; Schneider, D.; Kersten, T. (2018): Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 284–295.
- Feldmann, E. (2011): Entwicklung und Erprobung eines praxisnahen Feldverfahrens zur Prüfung terrestrischer Laserscanner. Diplomarbeit, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik, unveröffentlicht.
- 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, 77–94.
- Heister, H. (2006): Zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TSL 2006). DVW-Schriftenreihe, Band 51, Wißner-Verlag, Augsburg, 35–44.
- Hexagon (2017): Leica ScanStation P30/P40. (Technische Daten).
- Kern, F. (2008): Prüfen und Kalibrieren von terrestrischen Laserscannern. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 306–316.
- Kern, F. (2010): Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von terrestrischen Laserscanner-Systemen (Entwurf V.1.0.1). Offenes Forum Terrestrisches Laserscanning. www.laserscanning.org/documents/TLSRichtlinie_07.pdf.
- Kern, F. (2015): Qualitätssicherung beim TLS mittels Prüfkörper und Kenngrößen. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 – TLS 2015. DVW-Schriftenreihe. Band 81, Wißner-Verlag, Augsburg, 107–122.
- Kern, F.; Mehlig, S.; Siegrist, B. (2011): Geometrische Qualität von aus Einzelphotos zusammengesetzten Panoramen. In: Seyfert, E. (Hrsg.): 29. Wissenschaftliche Jahrestagung der DGPF – Mainz – Geodaten – Eine Ressource des 21. Jahrhunderts. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 20, 129–136.
- Kersten, T.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.; Sternberg, H. (2009): Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geo-information, Heft 4, 301–316.
- Kersten, T.; Sternberg, H.; Mechelke, K. (2005): Investigations into the Accuracy Behaviour of the Terrestrial Laser Scanning System Mensi GS100. Optical 3-D Measurement Techniques VII, Gruen/Kahmen (Eds.), Vienna 2005, Vol. I, 122–131.

- Kersten, T.; Sternberg, H.; Mechelke, K.; Acevedo Pardo, C. (2004): Terrestrischer Laser-scanner Mensi GS100/GS200 – Untersuchungen und Projekte an der HAW Hamburg. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004. Wichmann, Heidelberg, 98–107.
- Kuhlmann, H.; Holst, C. (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Freedon, W.; Rummel, R. (Hrsg.): Handbuch der Geodäsie: 5 Bände, Springer, Berlin Heidelberg.
- Leica (2013): Leica ScanStation P20. (Technische Daten). Leica Geosystems AG.
- Lindstaedt, M.; Graeger, T.; Mechelke, K.; Kersten, T. (2011): Terrestrische Laserscanner im Prüfstand – Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen der terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-400, Leica C10 und Faro Photon 120. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 4–14.
- Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 264–275.
- Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T.; Sternberg, H. (2009): Phasen im Vergleich – Erste Untersuchungsergebnisse der Phasenvergleichsscanner FARO Photon und Trimble FX. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, 53–64.
- Mechelke, K.; Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2007): Comparative Investigations into the Accuracy Behaviour of the New Generation of Terrestrial Laser Scanning Systems. 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Gruen/Kahmen (Eds.), Zürich, July 9–12, Vol. I, 319–327.
- Mechelke, K.; Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2008): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 317–328.
- Neitzel, F.; Gordon, B.; Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. www.dvw.de/merkblatt, letzter Zugriff 10/2018.
- Reidl, F. (2012): Konzept und Durchführung einer Systemkalibrierung von terrestrischen Laserscannern. Master's Thesis an der TU München, unveröffentlicht.
- Sternberg, H.; Kersten, T.; Conseil, N. (2005): Untersuchungen des terrestrischen Laser-scanners Mensi GS100 – Einfluss unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften auf die Punktbestimmung. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Wichmann, Heidelberg, 56–65.
- Wehmamn, W.; Kramer, H.; van Zyl, C.; Widiger, D.; Zimmermann, R. (2007): Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2007, 132. Jg., 175–180.

- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Kramer, H.; Heyne C.; Koschemann, D. (2008): Untersuchungen des Laserscanners GX von Trimble in den Prüffeldern der HTW Dresden. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, Heidelberg, 337–344.
- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Schmiedel, M.; Träbert, M. (2009a): Erste Untersuchungen des neuen Phasenvergleichscanners PHOTON 120 von FARO. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2009). Yes, we Scan! DVW-Schriftenreihe, Band 60, Wißner-Verlag, Augsburg, 31–47.
- Wehmann, W.; van Zyl, C.; Ullrich, J.; Richardt, A.; Staech, C.; Voss, S. (2009b): Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Laserscanner ScanStation 2 und HDS 6000 von Leica sowie LMS-Z420i von Riegl und Erarbeitung einfacher Prüfroutinen für diese Scanner. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009. Wichmann, Heidelberg, 31–44.
- Wehmann, W.; Freitag, J.; Kruschwitz, T. (2012): Vergleichende Untersuchungen zur effektiven Erfassung von Gebäudeteilen und Innenräumen mittels Laserscanning und Videotachymetrie. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, Heidelberg, 276–285.
- Wehmann, W.; Attrodt, A.; Kanters, M.; Vogel, A. (2013): Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes des FARO Focus 3D 120 im Terrestrischen Laserscanning. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013. Wichmann, Heidelberg, 46–55.

Kontakt

Dr.-Ing. Christoph Holst | Tobias Jurek | Martin Blome | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation, Nußallee 17, 53115 Bonn
c.holst@igg.uni-bonn.de | t.jurek@igg.uni-bonn.de | m.blome@igg.uni-bonn.de |
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Lars Marschel | Michael Petersen
ÖbVI Petersen, Hagenstraße 7, 45894 Gelsenkirchen
lars.marschel@oebvi-petersen.de | michael.petersen@oebvi-petersen.de

Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten | Klaus Mechelke | Maren Lindstaedt
HafenCity Universität Hamburg, Überseeallee 16, 20457 Hamburg
thomas.kersten@hcu-hamburg.de | klaus.mechelke@hcu-hamburg.de |
maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

Prof. Dr.-Ing. Wolffried Wehmann
HTW Dresden, Fakultät GeoInformation, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
wolffried.wehmann@htw-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich | Dr.-Ing. Peter Wasmeier | Wolfgang Wiedemann
Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie, Arcisstraße 21, 80333 München
th.wunderlich@tum.de | p.wasmeier@tum.de | w.wiedemann@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Fredie Kern
Hochschule Mainz – i3mainz, Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55 128 Mainz
fredie.kern@hs-mainz.de

Genauigkeitsbeurteilung von Laserscannern anhand realer Messobjekte

Erik Heinz | Tomislav Medić | Christoph Holst | Heiner Kuhlmann

1 Einleitung

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist mittlerweile ein fester Bestandteil des geodätischen Werkzeugkastens. Das Spektrum an möglichen Anwendungen ist breit gefächert und hat ausgehend von reinen Bestandsaufnahmen inzwischen auch den herausfordernden Bereich der Deformationsanalysen erreicht. Durch die Erweiterung des Portfolios um immer anspruchsvollere Messaufgaben und die ständige Weiterentwicklung der Sensortechnologie ist die Frage nach der mit TLS erreichbaren Genauigkeit noch stärker in den Fokus gerückt. Für viele Anwendungen ist die exakte Kenntnis über die Genauigkeit der Messung bzw. der daraus abgeleiteten Produkte von substanzialer Bedeutung. So muss bei Deformationsanalysen beispielsweise bewertet werden, ob eine Verschiebung signifikant ist oder nicht. Im Wesentlichen entscheiden drei Faktoren über die Genauigkeit des Ergebnisses:

1. *Genauigkeit der Messung* (abhängig von: Instrument, Atmosphäre, Messkonfiguration und Oberflächenbeschaffenheit des Messobjektes)
2. *Genauigkeit der Registrierung* (abhängig von: Methode und Konfiguration, z. B. Verteilung von Zielzeichen, Struktur/Überlappung der Punktwolken)
3. *Wahl des Modellierungsansatzes*

Obwohl alle drei Faktoren wichtig für das Ergebnis sind, legt dieser Beitrag den Fokus hauptsächlich auf die Genauigkeit der Messung. Die Untersuchung der Genauigkeit erfolgt für verschiedene Laserscanner, die unterschiedlichen Qualitäts- bzw. Preisstufen angehören (Kap. 2). Im Rahmen der Arbeit wurden Messungen an für die Praxis typischen Messobjekten durchgeführt (Kap. 3), um eine möglichst realitätsnahe Beurteilung der Laserscanner zu ermöglichen. In der Auswertung (Kap. 4) wird zunächst auf die Präzision in Abhängigkeit von Instrument, Messkonfiguration und Oberflächenbeschaffenheit eingegangen. Danach werden instrumentelle Systematiken auf Grundlage von Zwei-Lagen-Messungen an einer großen Wandfläche analysiert. Dies erlaubt Aussagen zur Richtigkeit. Abschließend werden aus den Punktwolken abgeleitete Ebenenparameter für unterschiedliche Messkonfigurationen einander gegenübergestellt. Auch diese Untersuchung lässt Rückschlüsse auf die Richtigkeit der Ergebnisse zu. Der Beitrag schließt mit einem Fazit (Kap. 5).

2 Instrumentarium

In diesem Beitrag wurden insgesamt vier terrestrische Laserscanner untersucht. Dabei handelt es sich um drei Instrumente von Leica Geosystems (HDS6100, ScanStation P20, BLK360) sowie den FARO Focus^{3D} X130. Diese Auswahl deckt hinsichtlich der Preis- und Qualitätsstufen das breite am Markt verfügbare Spektrum ab (siehe Tab. 1 und Abb. 1). Mit Ausnahme des Leica BLK360, werden alle Laserscanner für ingenieurgeodätische Anwendungen beworben, bei denen neben einer hohen Messgenauigkeit auch eine entsprechend fundierte Kenntnis darüber notwendig ist.



Abb. 1: Terrestrische Laserscanner während der Messung in Klein-Altendorf, von links:
Leica HDS6100, Leica ScanStation P20, Leica BLK360, FARO Focus^{3D} X130

Tab. 1: Spezifikationen der verwendeten terrestrischen Laserscanner. Die Angaben für Reichweite, Scanrate, Auflösung und Genauigkeit beziehen sich auf Maximalwerte. Die Auflösung beschreibt den minimalen Punktabstand in 10 m Messdistanz. Die Angaben entstammen den Datenblättern (Leica Geosystems 2009, 2013, 2017 und FARO 2015).

Spezifikation	Leica HDS6100	Leica ScanStation P20	Leica BLK360	FARO Focus ^{3D} X130
Preisklasse	hoch	hoch	niedrig	mittel
Reichweite	79 m	120 m	60 m	130 m
Scanrate	508 kHz	1000 kHz	360 kHz	976 kHz
Auflösung	1,6 mm	0,8 mm	5 mm	1,6 mm
Genauigkeit	~ mm	~ mm	~ mm – cm	~ mm
Messverfahren	phasenbasiert	WFD	WFD	phasenbasiert

3 Messstrategie

Zur Untersuchung der Genauigkeit der in Kap. 2 vorgestellten Laserscanner wurden zwei Messobjekte ausgewählt, die bezüglich Größe und Oberflächenbeschaffenheit als typisch für die Praxis gelten. Beim ersten Messobjekt handelt es sich um eine Maschinenhalle in Klein-Altendorf in der Nähe von Bonn ([Abb. 2](#) links). Die Außenwand der Maschinenhalle besteht aus einer porigen, ansonsten jedoch eher glatten Sichtbetonoberfläche. Das zweite Messobjekt ist ein mit Rauputz verkleidetes Vorlesungsgebäude in Bonn ([Abb. 2](#) rechts). Bei der Wahl der Messobjekte wurde darauf geachtet, möglichst praxisnahe Messbedingungen zu

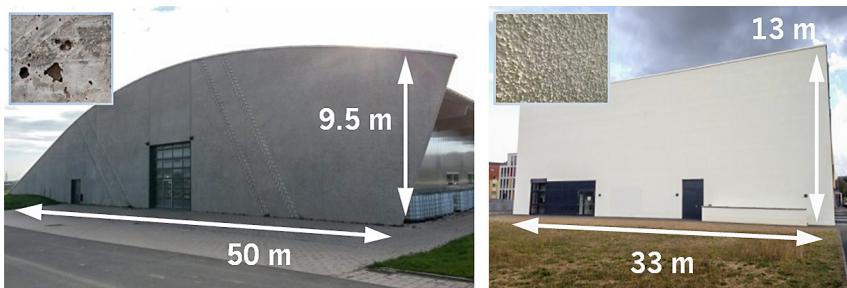


Abb. 2: Messobjekte: Maschinenhalle in Klein-Altendorf (links) und Vorlesungsgebäude in Bonn (rechts). Das verkleinerte Abbild in der Ecke zeigt jeweils einen typischen Ausschnitt der Wandoberfläche (links: poriger Sichtbeton, rechts: Rauputz).

schaffen, um den Aussagewert der Untersuchungen für Nutzer zu steigern. Genauigkeitsanalysen von Laserscannern erfolgen sonst meist in Laborumgebungen bzw. unter kontrollierten Bedingungen (z. B. Lindstaedt et al. 2012, Wunderlich et al. 2013 oder Stenz et al. 2017). Auf diese Herangehensweise wurde hier bewusst verzichtet.

Die Außenwand der Maschinenhalle in Klein-Altendorf wurde mit jedem der vier Laserscanner (Leica HDS6100, Leica ScanStation P20, Leica BLK360 sowie FARO Focus^{3D} X130) von jeweils neun unterschiedlichen Standpunkten aus abgescannt ([Abb. 3](#) links). Für die späteren Genauigkeitsuntersuchungen wurde immer der gleiche Wandausschnitt mit einer Fläche von rund 2 m² betrachtet. Die Standpunkte für die Laserscanner wurden so gewählt, dass der Wandausschnitt in Messdistanzen von 5 m, 10 m und 20 m mit einem Einfallswinkel von jeweils 0°, 30° und 60° abgescannt wurde. Aufgrund einer angrenzenden Scheune waren größeren Messdistanzen nicht realisierbar.

Für die Leica ScanStation P20 wurden zusätzlich auf allen neun Standpunkten Messungen in zwei Lagen durchgeführt. Anders als beim FARO Focus^{3D} X130 und beim Leica BLK360 ist eine Messung in zwei Lagen auch beim

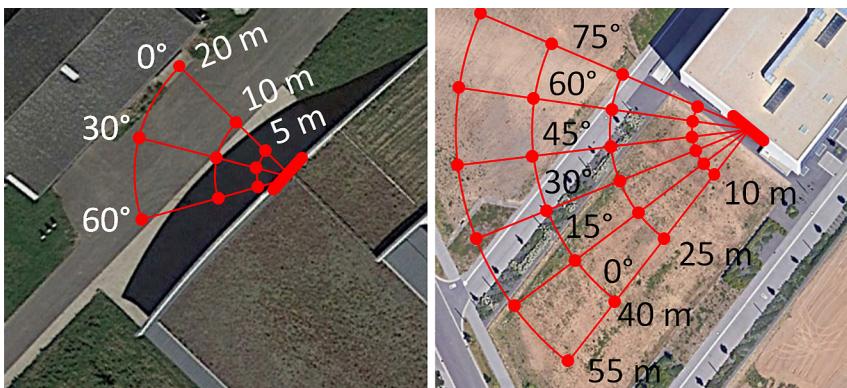


Abb. 3: Erfassung der beiden Messobjekte mit einem engmaschigen Raster an Standpunkten (links: Klein-Altendorf, rechts: Bonn). Bei den Genauigkeitsanalysen wurden die rot markierten Wandbereiche verwendet. (Quelle: GoogleEarth, modifiziert)

Leica HDS6100 prinzipiell möglich. Aus Zeitgründen konnte eine derartige Messung allerdings nur mit einem Laserscanner durchgeführt werden.

Eine Zwei-Lagen-Messung beim TLS kann ähnlich wie eine tachymetrische Zwei-Lagen-Messung verstanden werden, bei der sich systematische Abweichungen des Instruments zum Teil mit unterschiedlichem Vorzeichen auf die Messung auswirken (z.B. Zielachs-, Kippachs- und Höhenindexabweichung). Davon ausgenommen sind Abweichungen in der Distanzmessung (Nullpunkt- und Maßstabsabweichung), die sich aber z.B. in einem zielzeichenbasierten TLS-Prüffeld eingehender analysieren lassen (Neitzel et al. 2014, Holst et al. 2018). Eine solche Untersuchung sollte idealerweise unter Nutzung von Referenzwerten für die Abstände der Zielzeichen erfolgen. Nichtsdestotrotz können durch die Überlagerung der Punktwolken aus beiden Lagen instrumentell bedingte systematische Abweichungen deutlich reduziert werden (Holst et al. 2017b, Medić et al. 2017).

Um auch längere Distanzen analysieren zu können, wurde als zweites Messobjekt ein Vorlesungsgebäude in Bonn (Abb. 2 rechts) in die Untersuchungen eingebunden. Aufgrund einer großen Freifläche vor der Fassade des Gebäudes konnten an diesem Objekt Messdistanzen zwischen 10 m und 55 m mit einer Schrittweite von 15 m und Einfallswinkel von 0° bis 75° mit einer Schrittweite von 15° realisiert werden. Daraus ergeben sich 24 Standpunkte (Abb. 3 rechts). Im Zuge der Genauigkeitsuntersuchungen wurde auch bei diesem Messobjekt stets der gleiche Wandausschnitt (Fläche rund 2 m²) betrachtet. Aus zeitlichen Gründen erfolgte diese Messung nur mit der Leica ScanStation P20.

Um die Scans der Wandoberflächen auch direkt miteinander vergleichen zu können, wurde bei allen Messungen auf eine genaue und zuverlässige Registrie-

rung geachtet (Abb. 4). Die Registrierung erfolgte bei beiden Messobjekten zielzeichenbasiert mit je 15 Zielzeichen, die in nahezu jedem Scan vollständig sichtbar waren. Zur Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Registrierung, wurden Anzahl und Verteilung der Zielzeichen unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten im Vorfeld mithilfe einer Simulation soweit optimiert, dass die Transformationsparameter zwischen den Standpunkten mit hoher Zuverlässigkeit (Redundanzanteile zwischen 0,3 und 0,7, Bedingungsdichte bei 0,6) und Genauigkeit ($\sigma_{\text{Trans}} < 1 \text{ mm}$ und $\sigma_{\text{Rot}} < 0,5 \text{ mgon}$) bestimmt werden konnten. Die Simulation basierte auf der Qualitätstheorie der geodätischen Netzausgleichung (Niemeier 2008, Förstner und Wrobel 2016).

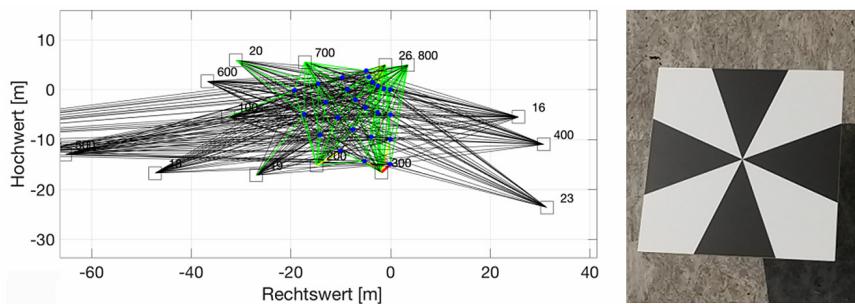


Abb. 4: Simulation der zielzeichenbasierten Registrierung unter Nutzung der geodätischen Zuverlässigkeit- und Genauigkeitstheorie (links). Spezielles am IGG Bonn entwickeltes Zielzeichen zur hochgenauen TLS-Registrierung (rechts).

Für die genaue Registrierung wurden spezielle, am Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG) der Universität Bonn entwickelte Zielzeichen verwendet (Abb. 4 rechts). Die Registrierung auf Basis dieser Zielzeichen und einem verbesserten Algorithmus zur Schätzung der Mittelpunkte der Zielzeichen sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten am IGG Bonn (Janßen et al. 2018).

4 Auswertung und Ergebnisse

Bei der Auswertung der Messungen wird im Rahmen dieses Beitrags der Fokus auf drei Teiluntersuchungen gelegt. Bei der ersten Untersuchung wird die Präzision der Messung in Abhängigkeit von Distanz und Einfallsinkel analysiert. Zu diesem Zweck wird das Rauschen der Distanzmessung herangezogen (Kap. 4.1). Die zweite Untersuchung analysiert die Zwei-Lagen-Messungen der Leica ScanStation P20 an der Maschinenhalle in Klein-Altendorf mithilfe der Software CloudCompare über einen M3C2-Punktwolkenvergleich. Dabei kann

der Einfluss von systematischen Abweichungen des Instruments bzw. der Kalibrierung auf die Messung analysiert werden (Kap. 4.2). Bei der dritten Untersuchung werden nach der Registrierung der Scans Ebenenmodelle durch die betrachteten Wandausschnitte geschätzt und die ausgeglichenen Ebenenparameter in Abhängigkeit von Distanz und Einfallswinkel verglichen.

Das Ziel der drei Untersuchungen besteht darin, Aussagen zur Präzision und Richtigkeit der Messung zu machen. Basierend darauf können Handlungsempfehlungen für die Praxis – insbesondere die Messplanung – abgeleitet werden.

4.1 Analyse der Präzision

Kürzlich publizierte Arbeiten belegen, dass die Präzision einer TLS-Messung, genauer gesagt die Präzision der Distanzmessung, im Wesentlichen eine Funktion der Intensität des zurückgestreuten Laserlichts ist. Basierend auf bisherigen Studien (Wujanz et al. 2017, Wujanz et al. 2018, Lambertus et al. 2018, Heinz et al. 2018a) gilt dies unabhängig davon, ob es sich um einen phasenbasierten oder gepulsten Laserscanner handelt und ob das Instrument im 1D-, 2D- oder 3D-Messmodus betrieben wird. Die daraus abgeleiteten intensitätsbasierten stochastischen Modelle erlauben es, in der Auswertung das Messrauschen für jeden Punkt individuell zu quantifizieren.

Im Vorfeld einer Messung helfen derartige Modelle aber nur bedingt weiter, da das Rückstreuverhalten einer Oberfläche in Abhängigkeit der Messkonfiguration und ihrer Beschaffenheit *a priori* nur eingeschränkt bekannt ist. Für die Planung wäre es hilfreich zu wissen, welche maximalen Messdistanzen und Einfallswinkel bei typischen Oberflächen zulässig sind, um eine vorgegebene Genauigkeit gewährleisten zu können. Der Beitrag von Bolkas und Martinez (2018) stellt dahingehend einen Versuch dar, eine solche Richtlinie für die Messplanung aufzustellen.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung, wird die Präzision der Messung in diesem Beitrag als Funktion von Distanz und Einfallswinkel für in der Praxis typischerweise vorkommende Objektoberflächen analysiert, ohne die Intensität gesondert zu betrachten. Zu diesem Zweck wurde aus allen Scans eines Messobjekts ein identischer Wandausschnitt mit einer Größe von rund 2 m² manuell extrahiert. Die kartesischen Koordinaten der Punkte wurden in Polarkoordinaten umgerechnet und einer Ebenenausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate zugeführt. Im Rahmen der Ausgleichung erfolgte zudem eine Varianzkomponentenschätzung (Förstner und Wrobel 2016). Auf diese Weise kann für jede Beobachtungsgruppe (Distanz, Horizontalrichtung und Zenitwinkel) ein empirischer Varianzfaktor aus den Verbesserungen der Beobachtungen zum Ebenenmodell abgeleitet werden. Diese Varianzfaktoren können als Maß für die

Präzision der Messung aufgefasst werden. Ferner lässt sich durch die Varianzkomponentenschätzung ein angepasstes stochastisches Modell für die Schätzung der Ebenenparameter und ihrer Genauigkeit aufstellen. Dies führt laut Theorie zu einer Verbesserung die Erwartungstreue der Schätzung und ermöglicht es, die Genauigkeit der Parameter bei unterschiedlichen Messbedingungen objektiver zu bewerten (Heinz et al. 2018b).

Die mittels Varianzkomponentenschätzung bestimmten Varianzfaktoren der Distanzmessung für die Messungen an der Maschinenhalle in Klein-Altendorf sind für den Leica BLK360, den FARO Focus^{3D} X130, den Leica HDS6100 und die Leica ScanStation P20 in Abb. 5 bis Abb. 8 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Präzision bei allen Laserscannern mit zunehmendem Einfallswinkel schlechter wird. Während die Präzision im Bereich zwischen 0° und 30° praktisch konstant ist, sinkt sie zwischen 30° und 60° deutlich ab. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass die Werte zwischen 30° und 60° aufgrund fehlender Messungen interpoliert sind. Der Bruchpunkt, ab welchem die Präzision merklich schlechter wird, kann folglich anhand der Daten nicht zweifelsfrei identifiziert werden. Eine Entfernungsabhängigkeit der Präzision lässt sich auf Basis der Messungen nicht verifizieren. Dies ist vermutlich auf die kurzen Distanzen von maximal 20 m zurückzuführen. Theoretisch sinkt die Genauigkeit jedoch mit dem Quadrat der Entfernung (Mettenleiter et al. 2015).

Bei näherer Betrachtung der Größenordnung der Werte stellt man fest, dass die Varianzfaktoren des Leica BLK360 mit 3 mm bis 7 mm (Abb. 5) den Spezifikationen des Herstellers entsprechen (Leica Geosystems 2017). Auffallend ist jedoch, dass die Varianzfaktoren des Leica BLK360 bei kleineren Einfallwinkeln identisch mit denen der hochwertigeren Laserscanner sind und auch bei größeren Einfallwinkeln die Unterschiede gering ausfallen. So liegen die Werte beim Leica HDS6100, der ScanStation P20 und dem FARO Focus^{3D} X130 sehr ähnlich im Bereich von 3 mm bis 5,5 mm. Ein Blick auf die Spezifikationen der drei zuletzt genannten Laserscanner verdeutlicht, dass die empirisch bestimmten Werte aus Abb. 6 bis Abb. 8 größer sind als die Werte, die in den Datenblättern der Hersteller für die Präzision angegeben sind (Leica Geosystems 2009, Leica Geosystems 2013, FARO 2015).

Eine Erklärung hierfür liefert eine tiefergehende Untersuchung der Ebenenschätzung. Bei Betrachtung der Verbesserungen der Ebenenschätzung fällt auf, dass auf dem Messobjekt mehr oder weniger große Unebenheiten erkennbar sind, die dazu führen, dass das Modell der Ebene nicht zu 100 % zutrifft; eine Situation, die bei der Modellierung von Oberflächen in der Praxis wohl eher den Regelfall darstellt. Insofern repräsentieren die Werte in Abb. 5 bis Abb. 8 nicht nur das Messrauschen, sondern darüber hinaus auch die Ungenauigkeit der Modellierung. Beim Leica HDS6100, der Leica Scan Station P20 und dem FARO Focus^{3D} X130 übersteigt die Ungenauigkeit der Modellierung größtenteils

das Messrauschen, was dazu führt, dass es bei guten Messkonfigurationen (kürzere Distanzen, kleinere Einfallswinkel) kaum Unterschiede sowohl untereinander als auch zum Leica BLK360 gibt. Erst bei schlechten Messkonfigurationen (längere Distanzen, größere Einfallswinkel) kommt das instrumentell bedingt stärkere Messrauschen des Leica BLK360 zum Tragen.

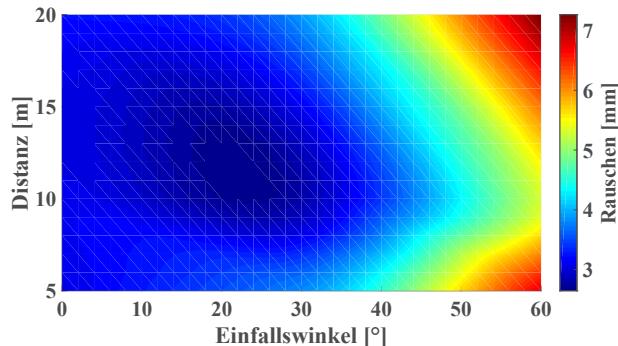


Abb. 5:
Varianzfaktoren der
Distanzmessung in
Abhängigkeit der
Messkonfiguration
(Klein-Altendorf,
Leica BLK360)

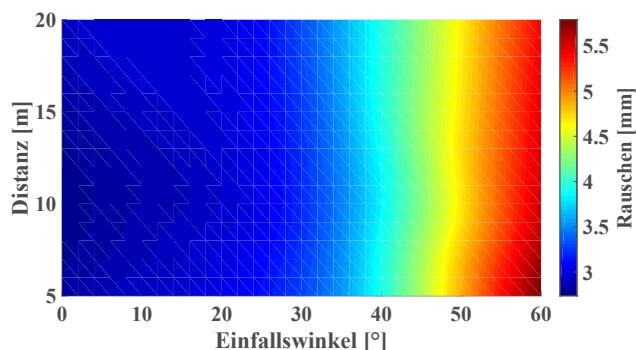


Abb. 6:
Varianzfaktoren der
Distanzmessung in
Abhängigkeit der
Messkonfiguration
(Klein-Altendorf,
FARO Focus^{3D} X130)

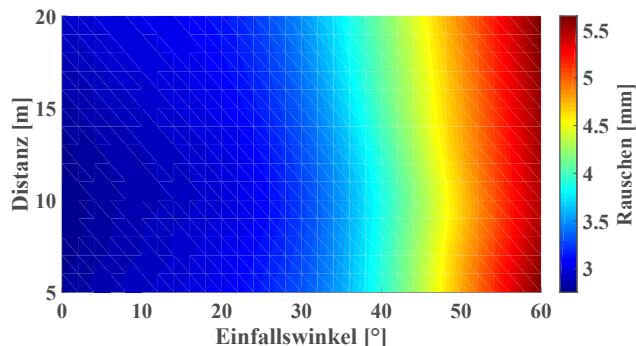


Abb. 7:
Varianzfaktoren der
Distanzmessung in
Abhängigkeit der
Messkonfiguration
(Klein-Altendorf,
Leica HDS6100)

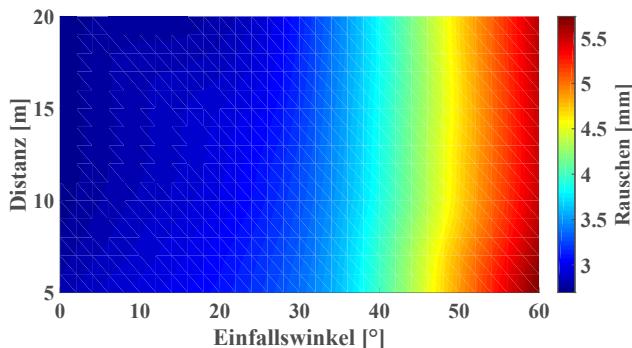


Abb. 8:
Varianzfaktoren der
Distanzmessung in
Abhängigkeit der
Messkonfiguration
(Klein-Altendorf,
Leica ScanStation
P20)

In Ergänzung zu den Ergebnissen an der Maschinenhalle in Klein-Altendorf zeigt Abb. 9 die geschätzten Varianzfaktoren für die Leica ScanStation P20 am Vorlesungsgebäude in Bonn. Es ergibt sich ein ähnliches Muster wie in Klein-Altendorf. Die Varianzfaktoren steigen hier ab einem Einfallsinkel von etwa 50° stark an. Vergleicht man die Größenordnung im Bereich bis 20 m und 60° Einfallsinkel für Klein-Altendorf (ca. 3–5,5 mm) mit dem für Bonn (ca. 1,5–2,5 mm) wird klar, dass diese für die Messung in Bonn wesentlich geringer ist, obwohl das gleiche Instrument verwendet wurde. Beim Blick auf die Verbesserungen der Ebenenausgleichung sind in Bonn anders als in Klein-Altendorf keine starken Unebenheiten zu erkennen, wodurch das Modell der Ebene deutlich besser passt und die Werte in Abb. 9 eher dem Messrauschen und weniger der Modellierungsgenauigkeit entsprechen.

Bemerkenswert ist dennoch, dass es auch bei der Messung in Bonn trotz der längeren Distanzen bis 55 m praktisch keine Distanzabhängigkeit der Varianzfaktoren gibt. Eine mögliche Ursache liegt in der Rauputzschicht, deren Körnung oberhalb des Messrauschens liegen könnte, auch wenn die Wand an sich einer Ebene entspricht. In Klein-Altendorf liegt das Problem eher

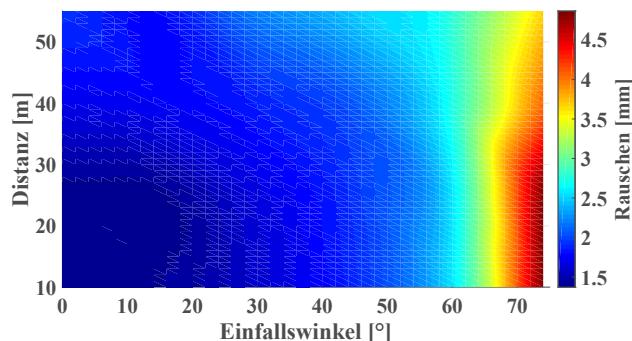


Abb. 9:
Varianzfaktoren
der Distanzmes-
sung in Abhängig-
keit der Messkon-
figuration (Bonn,
Leica Scan Station
P20)

darin, dass die Wand der Maschinenhalle zwar lokal glatt ist, aber insgesamt uneben.

Für die Praxis bedeuten die hier gezeigten Analysen, dass es bei sehr rauen Oberflächen bzw. Oberflächen, die mit einfachen – aber gängigen – Modellsätzen nicht exakt modellierbar sind, der Fall sein kann, dass die Präzision der Messung eine untergeordnete Rolle spielt und von der Ungenauigkeit der Modellierung überlagert wird. Für die Messplanung bedeutet dies, dass hochpreisige Laserscanner ggf. auch durch weniger teure Laserscanner ersetzt werden können. Ferner scheint in diesen Fällen auch die Bedeutung der Messkonfiguration in den Hintergrund zu rücken. So ist in den untersuchten Szenarien die Abhängigkeit der Präzision vom Abstand zum Objekt kaum nachweisbar. Im Gegensatz dazu spielt der Einfallswinkel jedoch weiterhin eine wichtige Rolle. Der kritische Wert wird grob auf 50° festgesetzt, was sich mit anderer Quellen deckt (Lindstaedt et al. 2012). Dies führt zur These, dass der Einfallswinkel für die Qualität der Messung schwerer wiegt als der Abstand zum Objekt.

4.2 Analyse der Zwei-Lagen-Messungen

An der Maschinenhalle in Klein-Altendorf wurden mit der Leica ScanStation P20 Zwei-Lagen-Messungen durchgeführt. Unter der Annahme eines stabilen Standpunktes während der Messung, liegen die Scans der beiden Lagen im gleichen lokalen Bezugssystem vor, sodass sie sich ohne Registrierung direkt miteinander vergleichen lassen. Abweichungen zwischen den Scans resultieren theoretisch nur aus dem Messrauschen und den systematischen Abweichungen des Laserscanners, welche sich in den beiden Lagen teilweise mit unterschiedlichem Vorzeichen äußern.

Die Sans der beiden Lagen wurden in der Software CloudCompare über einen M3C2-Punktwolkenvergleich miteinander verglichen (Lague et al. 2013). Der M3C2-Algorithmus ist gemäß Holst et al. (2017a) für den Vergleich von Punktwolken geeignet. Der Vergleich erfolgte zunächst für die im Laserscanner hinterlegte Werkskalibrierung. Im Anschluss daran wurde eine nutzerseitig bestimmte Kalibrierung an die Messungen angebracht und der Punktwolkenvergleich wiederholt. Diese Kalibrierung wurde in der Kalibrierhalle des IGG Bonn auf Basis von Zielzeichen bestimmt. Der Aufbau und die Entwicklung der Kalibrierhalle sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten (Medić et al. 2017). Auf diese Weise soll getestet werden, ob die vom IGG Bonn bestimmte Kalibrierung zu einer Reduzierung von Restsystematiken führt.

Hinsichtlich der Zwei-Lagen-Messungen wird beispielhaft das Ergebnis der Messung für eine Distanz von 20 m mit einem Einfallswinkel von 60° dargestellt ([Abb. 3](#) links). Anders als in Kap. 4.1 wird die ganze Wandoberfläche betrachtet, sodass sich variierende Distanzen und Einfallswinkel ergeben.

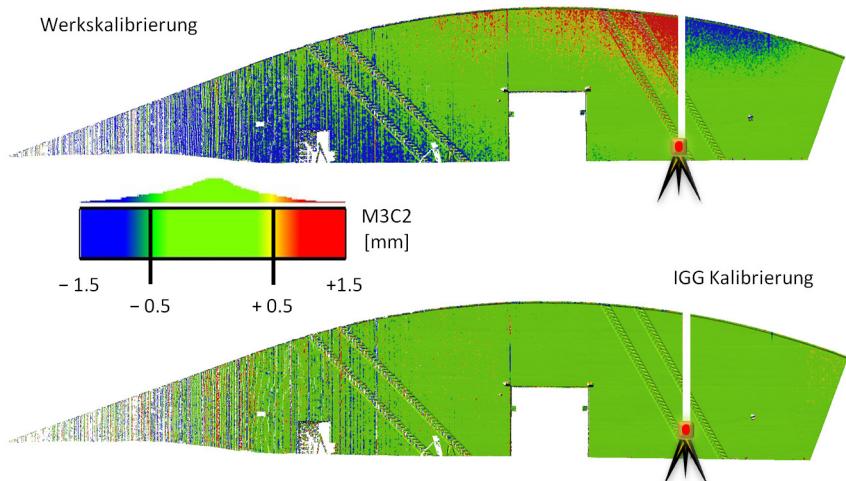


Abb. 10: M3C2-Punktwolkenvergleich zwischen Lage I und Lage II für die Messung mit der Leica ScanStation P20 an der Maschinenhalle in Klein-Altendorf. Der Vergleich der beiden Lagen wurde zunächst mit der Werkskalibrierung (oben) und danach mit einer nutzerseitig bestimmen Kalibrierung des IGG Bonn (unten) durchgeführt.

Die M3C2-Differenzen zwischen den beiden Lagen sind für die Werkskalibrierung und die IGG Kalibrierung in Abb. 10 visualisiert. Man erkennt, dass bei Verwendung der Werkskalibrierung Abweichungen von $\pm 1,5$ mm auf der Wandoberfläche sichtbar sind, die hauptsächlich bei größeren Einfallswinkeln und steileren Visuren auftreten. Nach der IGG Kalibrierung sind diese Abweichungen fast vollständig eliminiert. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der M3C2-Algorithmus lediglich Abweichungen orthogonal zur Wandoberfläche – nicht aber parallel dazu – aufdecken kann.

Obwohl die IGG Kalibrierung zu einer Reduzierung der Systematiken führt, muss die Frage aufgeworfen werden, ob diese Verbesserung eine Relevanz für die Praxis hat. Dazu wird das Messrauschen herangezogen. In Abb. 8 lässt sich ablesen, dass der geschätzte Varianzfaktor der Leica ScanStation P20 in Klein-Altendorf in einer Distanz von 20 m und einem Einfallsinkel von 60° ungefähr 5 mm beträgt. Laut Kap. 4.1 sind in diesem Wert das Messrauschen und die Modellierungsgenauigkeit enthalten. Die Herstellerangabe für das Messrauschen beträgt für eine graue Oberfläche in 10 m bis 25 m Entfernung (unter Beachtung der gewählten Qualitätsstufe 1 und Auflösungsstufe von 1,6 mm in 10 m Distanz) rund 1,5 mm (Leica Geosystems 2013). Für beide Werte liegen die Abweichungen in Abb. 10 in einer zu vernachlässigenden Größenordnung. Folglich kann bei der vorliegenden typischen Messaufgabe der Werkskalibrierung vertraut werden. Als typisch kann in diesem Zusammenhang die einfache

Gebäudeaufnahme mit Genauigkeitsanforderungen von mehreren Millimetern verstanden werden, bei der die Messungen im nahen bis mittleren Entfernungsbereich und vornehmlich im Horizont ohne steile Visuren liegen.

Kritischer ist dies bei anspruchsvollen Anwendungen wie Deformationsanalysen zu sehen, bei denen hohe Genauigkeitsanforderungen bestehen. Wäre die Außenwand der Maschinenhalle beispielsweise mit der höchsten Qualitätsstufe 4 der Leica ScanStation P20 abgescannt worden, läge das laut Hersteller zu erwartete Messrauschen bei rund 0,5 mm, sodass systematische Abweichungen von $\pm 1,5$ mm, wie sie in Abb. 10 zu sehen sind, signifikant wären (vorausgesetzt, dass eine geeignetere Modellierung als die der Ebene gewählt wird).

Da der Einfluss von instrumentellen Abweichungen meist mit zunehmender Distanz bzw. steiler werdender Visur anwächst, sind auch Anwendungen kritisch, bei denen situationsbedingt ungünstige Messkonfigurationen nicht vermeidbar sind. Ferner kann es passieren, dass die Werkskalibrierung aufgrund äußerer Einflüsse (z. B. Erschütterungen des Laserscanners) keine Gültigkeit mehr besitzt. Ist das Instrument dennoch in der Lage Messungen auszuführen, sollten diese – wenn möglich – stets in zwei Lagen erfolgen.

4.3 Analyse von Ebenenparameter

Die Schätzung der Ebenenmodelle in Kap. 4.1 liefert neben den Varianzfaktoren auch ausgeglichene Parameter für die Ebenenmodelle. Um die Parameter der unterschiedlichen Standpunkte miteinander vergleichen zu können, müssen diese in ein gemeinsames Bezugssystem überführt werden. Die Bestimmung der zugehörigen Registrierparameter erfolgte, wie in Kap. 3 beschrieben, auf Basis von Zielzeichen im Rahmen einer Netzlösung (Abb. 4).

Es sei angemerkt, dass die Ebenenmodelle zunächst im lokalen Bezugssystem des jeweiligen Standpunktes bestimmt wurden. Nur so kann die Ausgleichung auf Basis der Polarbeobachtungen mit dem auf das tatsächlich vorhandene Genauigkeitsniveau angepassten stochastischen Modell der Varianzkomponentenschätzung erfolgen. Die Festsetzung des stochastischen Modells auf Basis von kartesischen Koordinaten ist wenig aussagekräftig, da nur ein indirekter Bezug zur Genauigkeit der Beobachtungen besteht. Das stochastische Modell nimmt jedoch Einfluss auf die Erwartungstreue der Modellschätzung und kann auf Basis von Polarkoordinaten wesentlich sachgemäßer aufgestellt werden. Erst danach wurden die ausgeglichenen Ebenenparameter registriert. Die in der Netzlösung geschätzte Genauigkeit der Registrierparameter kann im Zuge dessen varianzfort gepflanzt werden, sodass sowohl die Messung als auch die Registrierung im Unsicherheitshaushalt enthalten sind.

Die Auswertung der Registrierung dauerte zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Beitrags noch an, sodass die Resultate nur exemplarisch gezeigt werden

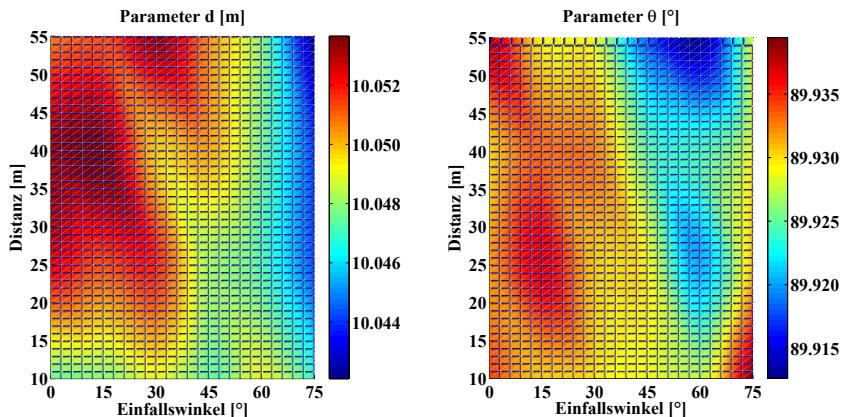


Abb. 11: Beispielhafte Ergebnisse der Ebenenschätzung für die Messung mit der Leica ScanStation P20 in Bonn: orthogonaler Abstand d der Ebene zum Koordinatenursprung (links) und die aus der Normale abgeleitete vertikale Orientierung θ der Ebene (rechts).

können. Abb. 11 zeigt das vorläufige Ergebnis für die Leica ScanStation P20 für die Messung am Vorlesungsgebäude in Bonn. Dargestellt ist der Abstand d des Ebenenmodells zum Koordinatenursprung und die vertikale Orientierung θ der Ebene, die aus der Ebenennormale abgeleitet wurde. Anhand der Plots ist kein Trend erkennbar, der auf eine Abhängigkeit der Parameter von der Messkonfiguration hindeutet würde. Die Variation der Parameter liegt für den Parameter d bei etwa 11 mm und für die Orientierung θ bei etwa $0,027^\circ$, was bei einem Sicherheitsniveau von 95 % einer Standardabweichung von rund 3 mm bzw. $0,007^\circ$ entspricht. Die zugehörigen Varianzfaktoren in Abb. 10 mit Maximalwerten von bis zu 5 mm sowie die noch fehlende Registrierunsicherheit deuten darauf hin, dass sich die Streuung der Parameter durch Mess- und Registrierunsicherheiten erklären lässt. Dies würde auch den nicht vorhandenen Trend begründen. Diese Hypothese könnte nach Abschluss der Auswertungen durch die varianzfortgepflanzten Parametergenauigkeiten verifiziert werden.

5 Fazit

In diesem Beitrag wurde die Genauigkeit mehrerer terrestrischer Laserscanner unter realen Mess- und Auswerterebenbedingungen untersucht. Dazu wurden zwei für die Praxis typische Objektoberflächen – Sichtbeton bzw. Rauputzschicht – unter variierenden Messdistanzen und Einfallswinkeln abgescannt.

Die im Zuge einer Ebenenausgleichung mittels einer Varianzkomponentenschätzung abgeleiteten Varianzfaktoren für die Distanzmessung zeigen, dass es

bei rauen bzw. mit einfachen Ansätzen schwer zu modellierenden Oberflächen der Fall sein kann, dass die Präzision der Messung eine untergeordnete Rolle spielt. So kann das Messrauschen durch die Rauigkeit der Oberfläche bzw. von der Ungenauigkeit der Modellierung überlagert werden. Für Anwendungsfälle, bei denen nicht die höchsten Genauigkeitsanforderungen gelten und bei denen eine einfache Modellierung der Punktwolken erfolgen soll, kann demnach ggf. auf hochwertige Laserscanner verzichtet werden. Gleichwohl hat sich gezeigt, dass ein zu großer Einfallswinkel von mehr als 50° auch in diesen Fällen kritisch sein kann. Der Abstand zum Objekt spielt eine untergeordnete Rolle.

Die Ergebnisse der Zwei-Lagen-Messungen mit der Leica ScanStation P20 belegen, dass bei typischen Messaufgaben der Werkskalibrierung des Herstellers vertraut werden kann. Als typisch gelten hierbei z. B. Gebäudeaufnahmen mit geforderten Genauigkeiten im Bereich von Millimeter bis Zentimeter, bei denen die Messungen im mittleren Entfernungsbereich und in Horizontnähe stattfinden. Sind diese Voraussetzungen allerdings nicht erfüllt, können instrumentelle Systematiken durchaus einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben. Da eine Kalibrierung durch den Nutzer in der Regel nicht möglich ist, besteht die Möglichkeit durch eine Zwei-Lagen-Messung in Teilen Abhilfe zu schaffen.

Die Untersuchung der Ebenenparameter war zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Beitrags noch nicht vollständig abgeschlossen, sodass an dieser Stelle kein abschließendes Resümee gezogen werden kann.

Dank

Ein besonderer Dank gilt Tobias Jurek, Robin Steffens, Tony Tallak und Volker Zupan für die Unterstützung bei den Messungen und der Auswertung.

Literatur

- Bolkas, D.; Martinez, A. (2018): Effect of target color and scanning geometry on terrestrial LiDAR point-cloud noise and plane fitting. In: Journal of Applied Geodesy, 12(1), 109–127. DOI: [10.1515/jag-2017-0034](https://doi.org/10.1515/jag-2017-0034).
- FARO (2015): FARO Focus^{3D} X130 Datasheet. Produktspezifikationen, Westminster, Colorado, USA.
- Förstner, W.; Wrobel, B. P. (2016): Photogrammetric Computer Vision – Statistics, Geometry, Orientation und Reconstruction. Springer International Publishing, Cham, Schweiz.
- Heinz, E.; Mettenleiter, M.; Kuhlmann, H.; Holst, C. (2018a): Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z+F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. In: Sensors 2018, 18(7), 2253. DOI: [10.3390/s18072253](https://doi.org/10.3390/s18072253).

- Heinz, E.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2018b): Erhöhung der räumlichen Auflösung oder Steigerung der Einzelpunktgenauigkeit beim Laserscanning? – Analyse der Modellierungsgenauigkeit am Beispiel einer Ebene. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 167–179.
- Holst, C.; Schmitz, B.; Schraven, A.; Kuhlmann, H. (2017a): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2017, 142. Jg., 98–110.
- Holst, C.; Schunck, D.; Nothnagel, A.; Haas, R.; Wennerbäck, L.; Olofsson, H.; Hammargren, R.; Kuhlmann, H. (2017b): Terrestrial laser scanner two-face measurements for analyzing the elevation-dependent deformation of the Onsala Space Observatory 20-m radio telescope's main reflector in a bundle adjustment. In: Sensors 2017, 17(8), 1833. DOI: [10.3390/s17081833](https://doi.org/10.3390/s17081833).
- Holst, C.; Jurek, T.; Blome M.; et al. (2018): Empirische Ergebnisse von TLS-Prüffeldern: Gibt es Auffälligkeiten? In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). DVW-Schriftenreihe, Bd. 93, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Janßen, J.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2018): Registrierung mit Targets: Wie genau ist das? In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018). DVW-Schriftenreihe, Bd. 93, Wißner-Verlag, Augsburg. (Dieser Tagungsband).
- Lague, D.; Brodu, N.; Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2013, 82, 10–26. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009).
- Lambertus T.; Belton D.; Helmholtz P. (2018): Empirical investigation of a stochastic model based on intensity values for terrestrial laser scanning. In: AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 125(3), 43–52.
- Leica Geosystems (2009): Leica HDS6100 – Latest generation of ultra-high speed laser scanner. Produktspezifikationen, Heerbrugg, Schweiz.
- Leica Geosystems (2013): Leica ScanStation P20 – Industry's Best Performing Ultra-High Speed Scanner. Produktspezifikationen, Heerbrugg, Schweiz.
- Leica Geosystems (2017): Leica BLK360 – User Manual. Produktspezifikationen, Heerbrugg, Schweiz.
- Lindstaedt, M.; Kersten, T.; Mechelke, K.; Graeger, T. (2012): Prüfverfahren für terrestrische Laserscanner – Gemeinsame geometrische Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Laserscanner an der HCU Hamburg. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012. Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 264–275.
- Medić, T.; Holst, C.; Kuhlmann, H. (2017): Towards System Calibration of Panoramic Laser Scanners from a Single Station. In: Sensors 2017, 17(5), 1145. DOI: [10.3390/s17051145](https://doi.org/10.3390/s17051145).
- Mettenleiter, M.; Härtl, F.; Kresser, S.; Fröhlich, C. (2015): Laserscanning – Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungs erfassung. In: Die Bibliothek der Technik, Band 371, Süddeutscher Verlag onpac GmbH, München.

- Neitzel, F.; Gordon, B.; Wujanz, D. (2014): Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS). DVW-Merkblatt 7-2014. www.dvw.de/merkblatt, letzter Zugriff 10/2018.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichungsrechnung – Statistische Auswertemethoden. (2., überarbeitete und erweiterte Auflage), de Gruyter Verlag, Berlin, New York.
- Stenz, U.; Hartmann, J.; Paffenholz, J.-A.; Neumann, I. (2017): A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. In: Sensors 2017, 17(8), 1886. DOI: [10.3390/s17081886](https://doi.org/10.3390/s17081886).
- Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2017, 125, 146–155.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Tschirschwitz, F.; Nietzschmann, T.; Neitzel, F.; Kersten, T.P. (2018): Determination of Intensity-Based Stochastic Models for Terrestrial Laser Scanners Utilising 3D-Point Clouds. In: Sensors 2018, 18(7), 2187. DOI: [10.3390/s18072187](https://doi.org/10.3390/s18072187).
- Wunderlich, T.; Wasmeier, P.; Ohlmann-Lauber, J.; Schäfer, T.; Reidl, F. (2013): Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner – Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München. In: Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Technische Universität München, Heft 20, 02/2013.

Kontakt

Erik Heinz | Tomislav Medić | Dr.-Ing. Christoph Holst | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG), Universität Bonn
Nussallee 17, 53115 Bonn
e.heinz@igg.uni-bonn.de | t.medic@igg.uni-bonn.de |
c.holst@igg.uni-bonn.de | heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Session 2: Wie modellierte und registrierte ich meine Laserscans?

Modellierung – Strategien zur Interpretation von 3D-Punktwolken

Michael Geist | Frank Niemeyer | Fabian Gierschner

1 Einleitung

Die moderne Geodäsie bietet ein breites Spektrum von Vermessungssystemen zur Erfassung von Punktwolken. Von Low cost-Sensoren wie der Microsoft Kinect, über Dense-Matching-Verfahren und terrestrische Laserscanner bis hin zu hochgenauen Streifenlichtprojektoren für kleinvolmige Messungen stehen flächenhafte Messsysteme für unterschiedlichste Anwendungen zur Verfügung. Ergebnis ist eine dreidimensionale diskretisierte Oberflächendarstellung, die in den seltensten Fällen das vermarktungsfähige Endprodukt einer Dienstleistung ist (Bringmann und Pfliegner 2005). Der Anspruch des Endkunden besteht in einer auf das wesentliche reduzierte, leicht zu interpretierenden, modellhaften und eindeutigen Ergebnisdarstellung. Um diese Anforderungen zu erfüllen gilt es, die Punktwolke in geeigneter Weise zu interpretieren bzw. zu veredeln. Die Modellierung ist dabei ein sehr breites Anwendungsfeld, bei dem es vor allem auf die Frage- bzw. Problemstellung ankommt.

So werden gemessene Punktwolken im Bereich der Navigation von Drohnen oder bei autonomen Fahrzeugen mit großen Toleranzen und abgeleiteten großen Sicherheitsabständen ausgewertet. Die Prozessierung der Daten erfolgt dabei in sehr kurzen Zeitintervallen. Dabei liegen hinter diesen dynamischen Prozessen sehr einfache Auswertemodelle. Der Focus liegt einer schnellen Vermessung mit hohen Wiederholungsraten. Die geometrische Genauigkeit tritt dabei in den Hintergrund und wird durch angepasste Sicherheitsprotokolle kompensiert. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Oberflächenvermessung von Fassaden eher auf die geometrische Genauigkeit und die Verknüpfung von Teilmessbereichen an. Mit unterschiedlichen Problemstellungen lassen sich aus demselben Messdatenbestand verschiedenen Ergebnisse ableiten. Zu erkennen ist, dass bei der Modellierung von Messdaten immer zusätzliche Informationen mit einfließen.

An der Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen wird zusammen mit Partnern aus der Wirtschaft an Modellierungsmethoden geforscht, um den Kunden anwendungsspezifische Lösungen für die Veredelung von flächenhaften Sensordaten anbieten zu können. Es wird eine Unterteilung in Abhängigkeit von Modellierungsziel vorgenommen und der Weg zu einem 3D-Modell skizziert. Abschließend werden Beispiele für die vorgenommene Unterteilung gegeben.

2 Interpretation von Punktwolken

Grundsätzlich kann die Interpretation von Punktwolken anhand der Zielstellung der Modellierung (Zielsystem) sowie zunehmender Generalisierung (von der elementbasierten Betrachtung bis hin zur funktionellen Semantik) eingeteilt werden (siehe Abb. 1). Die eigentliche Notwendigkeit Modelle aus Punktwolke zu erzeugen, leitet sich aus der Verwendbarkeit des Modells ab. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass das Modell Grundlage für mindestens noch einen weiterer

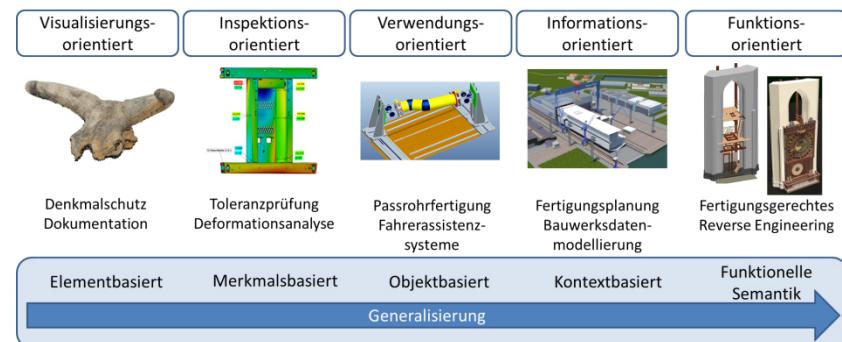


Abb. 1: Interpretation von 3D-Punktwolken

Prozessschritt ist. Modelle lassen sich wesentlich effizienter und schneller verarbeiten, wenn z. B. auf dem Ergebnis konstruktive Änderungen vorgenommen werden sollen. Abb. 1 zeigt eine mögliche Einteilung verschiedener Anwendungsfälle im Zusammenhang mit den Modellierungsstufen.

Eine einfache Variante ist dabei die **Visualisierung** der eigentlichen Messwerte (elementbasiert), z. B. einer Punktwolke. Wird weit genug aus der Punktwolke raus gezoomt, erscheint die Punktwolke bildhaft, da die Abstände zwischen den Punkten durch die Größe der dargestellten Punkte überlagert wird (Böhm 2009). Der Betrachter bekommt schnell einen Eindruck der Gesamtsituation. Robuste Fragestellungen, z. B. nach der Vollständigkeit der abgebildeten Objekte ohne Focus auf die jeweiligen geometrischen Formen, lassen sich hiermit sehr schnell beantworten.

Bei einer **Inspektion** von Messobjekten stehen die geometrischen Eigenschaften im Vordergrund (merkmalsbasiert), z. B. bei Verformungen von Oberflächen. Das Messobjekt wird durch eine Punktwolke diskretisiert, die somit die Basis für weitere Untersuchungen und Verarbeitungen bildet. Oft werden lediglich einzelne Punkte oder übergeordnete und einfach zu beschreibende geometrische Objekte, sogenannte regelgeometrische Merkmale, wie z. B. Kugeln, Ebenen etc. für weitere messtechnische Auswerteschritte genutzt. Darauf basierend können

Soll-Ist-Vergleiche abgeleitet werden, z. B. durch Falschfarbendarstellungen der Abstände der Einzelpunkte zur Form.

In anderen Bereichen liegt der Focus der Modellierung auf der schnellen Verarbeitung von sich wiederholenden Messungen. So werden Roboter oder autonome Fahrzeuge mit Scansystemen ausgestattet, die lediglich den Abstand von Objekten im Sichtbereich sehr schnell bestimmen sollen. Sowie diese Abstände während des Messprozesses unterschritten werden, leitet das System Gegenmaßnahmen ein. Der Übergang zu einer **verwendungsorientierten Modellierung** (objektbasiert) erfolgt dann für autonome Positionierungssysteme, die ihre Umgebung in einem breiteren Raster scannen, um ihre Umgebung zu kartieren und sich selbst darin zu positionieren (SLAM siehe Nüchter et al. 2007, Reid 2016). Es entsteht neben der eigentlichen Navigationsaufgabe ein Produkt, eine Karte, die auch für weitere Anwendung verwendet werden kann.

Hat man aus den Messdaten Formparameter abgeleitet, können durch Verschneidung (vollständige) Objekte abgeleitet werden, die wiederum als Informationen in einem **Informationssystem** abgelegt werden können. Informationssysteme haben dabei die Aufgabe Daten zu sammeln und in einem übergeordneten Zusammenhang zur Verfügung zu stellen. So können Aufgaben, die einen Gesamtkontext (kontextbasiert) benötigen, gelöst werden. Das Building Information Modeling (BIM siehe Blankenbach 2015, Egger et al. 2013, DVW e.V./Runder Tisch GIS e. V. 2017) umschreibt beispielsweise ein solches Informationssystem. Die reinen Punktwolkendaten werden dabei nicht als Rohdaten abgelegt. Vielmehr definiert das System über seinen eigenen Zweck, wie Daten bzw. Informationen abgelegt werden sollen. Entsprechend müssen Modellierungsmethoden vorhanden sein, die aus den Messdaten verwendbare Daten ableiten.

Ein sehr hoher Grad der Modellierung wird gefordert, wenn es nicht nur um die Form von Objekten geht, sondern wenn zudem diese Objekte in einem funktionalen Zusammenhang stehen (funktionelle Semantik) oder die Charakteristik nachgelagerter Prozesse, z. B. Fertigungsmöglichkeiten, beachtet werden muss. Ein Beispiel für diese **funktionsgebundene Modellierung** ist die Erfassung der Astronomischen Uhr der St. Marienkirche zu Rostock. Mit dem gescannten Modell kann die Funktionsweise dieser Uhr virtuell nachgestellt werden (siehe Behrndt et al. 2013, Grewe 2014, Rohs 2012) und gleichzeitig ein funktionstreuer Nachbau erfolgen.

Es wird deutlich, dass zu jeder Modellierung zusätzliche Informationen gehören. Dabei werden die Informationen zunehmend komplex, von elementbasiert hin zur funktionellen Semantik, eingestuft.

3 Modellierungsverfahren

Das übergeordnete Zielsystem der Modellierung ist eine digitale Repräsentation in einem Computersystem. Die Punktwolke selbst ist bereits ein Modell, da lediglich eine diskretisierte Darstellungsform als Basis für die Objektrekonstruktion zur Verfügung stellt. Das spezifische Ziel der Verarbeitung von 3D-Vermessungsdaten ist die Erfassung und Beschreibung geometrischer Objekte und ihrer charakteristischen Eigenschaften. Bei der Wahl einer geeigneten Strategie ist die grundsätzliche Frage nach den zur Verfügung stehenden Vorräten von Informationen. Je mehr und je spezifischer (definierter) Informationen zum Verwendungszweck vorliegen, desto leichter fällt die Auswahl der Strategie und der zu verwendenden Modellierungswerkzeuge.

3.1 Grundlagen der Modellierung

Die Wahl eines geeigneten Modellierungsverfahrens ist ein grundlegender Teil bei der Interpretation von Punktwolken. Dabei kann unterschieden werden in (Roth-Koch 1996)

- berechnende Methoden – geometrische Modellierung (z. B. Approximation regelgeometrischer Elemente) und
- erklärende Methoden – semantische Modellierung (z. B. Rekonstruktion von Objekten aus gegebenen Randbedingungen).

Vor der eigentlichen Modellierung sollte die Festlegung und Verifikation von formbeschreibenden Elementen zu erfolgen. Dabei wird der Übergang von einer rein elementbasierten Abbildung in Form von Einzelpunkten oder deren flächenhafte Darstellung als Dreiecksvermaschung zu einer parametrischen/merkmalsbasierten Modellierung vollzogen. Diese Form der formalen geometrischen Modellbildung beinhaltet das Erfassen, Prüfen und Verbessern auf Basis von differenzierten Eingabeinformationen (Roth-Koch 1996). Für einen einfachen Inspektionsprozess z. B. einer Rundheitsprüfung legt der Nutzer die Wertemenge also die Messdaten und die gewünschten Eigenschaften (Approximationsverfahren, Kreis/Zylinder) fest. Es werden also erklärende Informationen dem Modellierungsprozess zur Verfügung gestellt. Diese Überführung in eine andere Darstellungsform (Modell) zumeist eines höheren Abstraktionsgrades wird als semantische Modellierung bezeichnet (Boochs et al. 2009). Der Übergang zwischen geometrischer und semantischer Modellierung erfolgt mit steigender Generalisierung (von elementbasierter Modellierung bis hin zur funktionellen Semantik) fließend ([Abb. 2](#)).

Für die eigentliche Modellierung stehen verschiedene grundsätzliche Techniken aus dem (computer-aided design) CAD-Bereich zur Verfügung. Die Daten-



Abb. 2: Zusammenhang geometrische und semantische Modellierung

strukturen eines CAD-System basieren auf indirekten Schemata (Drahtgitter-, Kanten-, Oberflächenmodelle) oder direkten Schemata sogenannte konstruktive Festkörpergeometrien (einfache Volumenkörper Zylinder, Kugel etc.) (Vajna et al. 2009). Volumenmodelle besitzen einen höheren Informationsgehalt als Drahtmodelle oder Ansichten, und reduzieren dadurch die Mehrdeutigkeiten der Interpretation (Kohlhepp 1993). In den meisten CAD-Programmen werden Verknüpfungsmodelle beider Techniken verwendet, um beispielsweise die Entstehungsgeschichte eines Bauteils (den Konstruktionsprozess) digital zu repräsentieren (Generatives Modell).

Erst diese Anreicherung mit Informationen zu topologischen sinnvollen Objekten, Objektbeziehungen oder Zuordnung von Geometrien zu einem Bauteil also die Anreicherung mit semantischen Informationen schaffen ein Modell auf dem nachfolgende Prozessschritte mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden können.

Das Zielsystem (Datenstruktur, nachfolgende Prozesse, Verarbeitungswerzeuge) stellt die Anforderungen an den Modellierungsprozess aus Modellsicht.

Im Gegensatz zur digitalen geometrischen Modellierung in einen Konstruktionsprozess sind die Punktwolken einer TLS-Messung als Eingangsinformationen nicht frei von Unvollkommenheiten. Die Diskretisierung der Oberfläche, Lücken in den Scandaten, sich überlappende Punktwolken, irrelevante Punkte und Messrauschen können zu Fehlinterpretationen führen und stellen zusätzliche Anforderungen an die Datenbasis. Je weniger semantische Informationen

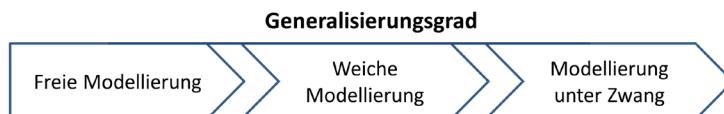


Abb. 3: Generalisierungsgrad

im Modellierungsprozess berücksichtigt werden desto höher ist die Anzahl der Freiheitsgrade. Werden jedoch aufgrund der Anforderungen aus Modellsicht komplexe funktionelle Zusammenhänge zwischen den geometrischen Elementen gefordert sind, steigt der Grad der Generalisierung (siehe [Abb. 3](#)).

Eine Modellierung ist somit immer ein Kompromiss zwischen Datentreue und der Abbildung komplexer Zusammenhänge.

Anforderungen an die Datenbasis

Die Abschätzung der Messunsicherheit bei der Datenerfassung spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Wahl der Strategie. Ist das Ziel der Modellierung auftretende Unsicherheiten bei der Erfassung innerhalb gewissen Grenzen zu reduzieren, um z. B. lokale Datenauswertungen im Rahmen einer Inspektion durchzuführen, sollten die Unsicherheitsanteile frei von jeglichen systematischen Abweichungen sein. Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass die Messdaten normalverteilt sind. Daher sollten bei Ansätzen zur Reduzierung der Abweichungen die Messpunkte im Rahmen der Ausgleichsrechnung auf das Vorhandensein einer Normalverteilung getestet werden (Teutsch 2007). Insbesondere bei Mobile Mapping und Dense-Matching-Verfahren sind Normalverteilungen eher die Ausnahme. Wichtige Kriterien in Bezug auf die Datenbasis sind:

- Oberflächengüte einer einzelnen Aufnahme (Messrauschen und oberflächenbedingte Unsicherheiten)
- Anzahl der Punktwolken
- Qualität der Registrierung der Punktwolken (wenn mehr als eine)
- Segmentierungslevel

Je freier eine Modellierung durchgeführt werden soll desto, gravierender sind die Auswirkungen von Messunsicherheiten in der Punktwolke. Verformungstreue Oberflächenbeschreibungen erfordern eine genaue analytische Beschreibung, die mit einer Vielzahl an Freiheitsgraden einhergeht. Messrauschen, ungleichmäßige Abtastung, Verschattungen, Oberflächen- und Messprinzip bedingte Abweichungen stellen hohe Anforderungen an die Robustheit der Approximationsverfahren (Teutsch 2007).

Anforderungen aus Modellsicht

Nur ein Modell zu erstellen, das richtig ist, aber keinen Zweck erfüllt ist nicht zielführend. Die Nutzanforderungen definieren die passenden Grenzen des Modells, den Detaillierungsgrad, die Modellierungsnotation und weiter Parameter. Bei vielen Diskussionen um das „Wie wird modelliert?“ kommt die Frage des Nutzens oftmals zu kurz. Erst die Frage nach dem Verwendungszweck eines Modells schafft ein vermarktungsfähiges Produkt bzw. eine Dienstleistung. Sie bestimmt auch die Wahl der Modellierungsmethode. Kriterien für die Wahl einer Methode sind (Schallehn 2018):

- Ausdrucksfähigkeit: Können alle geometrischen Objekte mit der Methode beschrieben werden?
- Korrektheit: Sind die dargestellten Geometrien eindeutig interpretierbar bzw. kann überprüft werden, ob sie überhaupt realisierbar sind?
- Effizienz: Können Operationen auf dem Modell eine Transformation in ein anderes Modell so erfolgen, dass sie Nutzanforderungen gerecht wird?

Wie in vielen anderen Bereichen hängt die beste Strategie von den gewünschten Ergebnissen und von den zur Verfügung stehenden Ressourcen ab. Die wichtigsten Parameter zur Wahl einer Modellierungsstrategie sind:

- Für welche Anwendung ist das Modell bestimmt (vgl. Abb. 1)?
- Welche Ressourcen stehen zur Verfügung (Zeit, Personal, Software)?
- Grad der gewünschten Komplexität und Generalisierung.
- A-priori geschätzte Genauigkeit der Repräsentation.

Aus dem Ziel der Modellierung und den zur Verfügung stehenden Werkzeugen ergibt sich die Herangehensweise bei der Modellierung. Es stehen einige grundlegend verschiedene Ansätze zur Verfügung. Welche Repräsentation am geeignetsten ist, hängt davon ab, auf welche Weise die Modellobjekte erstellt werden. Die Art der Modellverwendung im Zielsystem definiert die Datenstrukturen und Operationen, die für die Modellierung zur Verfügung stehen. Mit steigender Semantik bzw. dem Grad des formulierten Vorwissens kann die Modellierung geeignet unterstützt und beschleunigt werden.

3.2 Vorgehensweise bei der Modellierung

Die Wahl der Modellierungsmethode und der Strategie zur Erfüllung der Anforderungen aus Modellsicht ist Aufgabe der Ingenieurvermessung. Basierend auf der Aufgabenbeschreibung gilt es sowohl ein mess- als auch ein auswertetechnisches Lösungskonzept unter den Gesichtspunkten der geforderten Genauigkeit, erforderliche Zuverlässigkeit und vertretbarer Aufwand zu entwickeln. Diese genannten Optimierungsziele schließen sich gegenseitig aus, insbesondere stehen Genauigkeit und Zuverlässigkeit (Kontrollierbarkeit) reziprok zueinander (Heunecke 2009). Die Interpretation von Punktwolken ist Teil eines aufgaben-spezifisch zu entwickelnden Lösungskonzeptes für das nur grundlegende Handlungsempfehlungen gegeben werden können.

3.2.1 Prozessablauf von den Daten zum Modell

Nach der Akquisition der Daten erfolgt die Vorverarbeitung der Punktwolken, also Filterung, Löschen unnötiger, unerwünschter oder ausreißerbehafteter Bereiche, Ausdünnen (Down-Sampling) und Segmentierung. Dies erfolgt zumeist abhängig vom verwendeten Laserscannersystem aber unabhängig von der Anwendung. Scannerspezifische Softwarelösungen zur Datenauswertung bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten die Rohdaten zu bearbeiten. Durch den Einsatz von Filter-, Mess- und Registrierungstools werden der eigentlichen Modellierung bereinigte, registrierte, segmentierte und ggf. kolorierte 3D-Punktwolken zugeführt.

Abb. 4 zeigt den verallgemeinerten Prozessablauf von der Punktwolke zum Modell. Insbesondere die Segmentierung kann bereits modellgestützt erfolgen. Softwarepakete wie z. B. Polyworks bieten die Möglichkeit CAD-Modelle und Messdaten nicht nur zu überlagern, sondern die vorhandenen Planungsdaten

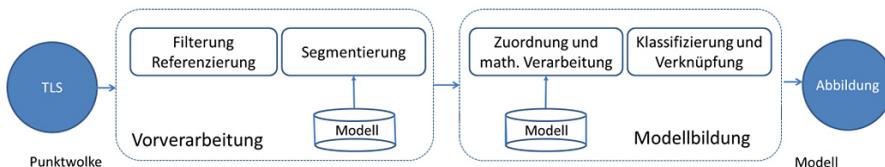


Abb. 4: Prozessablauf Modellierung

für die Einteilung der Punktwolke in Cluster zu nutzen. Dadurch können Punktwolken effektiv auf die relevanten Bereiche reduziert werden. Anschließend wird die eigentliche Modellierung durch Vorwissen aus der Anwendung, also Erwartungen gesteuert, welche Modellobjekte auftreten können und in welchen Beziehungen sie zueinander stehen. Es handelt sich um eine Art der Wissensverarbeitung, die auf überwiegend geometrischem oftmals in Verbindung mit semantischem Grundwissen, basiert (Kohlhepp 1993).

Mit wachsender Komplexität von Datenbasis und Zielsystem ist es notwendig, mehr Vorwissen in geeigneter Art und Weise zur Verfügung zu stellen. Grund ist, dass die Mehrdeutigkeiten in Bezug auf eine Bewertung zunehmen und die Grundlage für eindeutige Entscheidungen verloren geht (Boochs et al. 2009). Um diese Entscheidungsfindung zu unterstützen, werden Anwendern zunehmend halbautomatisierte Verfahren zur Verfügung gestellt. Diese basieren auf vordefinierten Modellkatalogen, die das Wiedererkennen von Objekten erleichtern. Am weitesten fortgeschritten in kommerziellen Softwareprodukten sind Auswertungen für spezifische Anwendungsszenarien z. B. im Bereich des Anlagenbaus und in der Gebäudemodellierung (FARO Pointsense, ClearEdge3D, Scalypso). Derzeit können Softwareprodukte jedoch noch nicht das Fachwissen und die Erfahrung eines Anwenders ersetzen. ClearEdge3D beispielweise gibt für eine automatische Detektion eine Erkennungsquote von ca. 80 % an (SKM 2018). Da jedoch aus Datensicht selten mit vergleichbaren Bedingungen zu rechnen ist, gilt es aufgaben-spezifisch abzuwägen, ob eine aufwendige Qualitätskontrolle oder automatische Modellierung effizienter ist. Hier bestehen Parallelen zu den Modellierungsprozessen, die z. B. nur auf einem virtuellen Design basieren. Die Erstellung qualitativ hochwertiger Konstruktionsmodelle, die den Ansprüchen an eine fertigungsrechte Datenbasis genügen, ist nach wie vor durch einen interaktiven und iterativen Entstehungsprozess geprägt, bei dem ein Kompromiss zwischen fertigungs-technischer Umsetzbarkeit und Modellanforderung gefunden werden muss.

3.2.2 Methodik bei der Modellierung

Ein wesentlicher Teil der Arbeitsweise bei der Modellierung von Punktwolken und beim Lösen von Aufgaben besteht in einem Vorgang der Analyse und in einem anschließenden Vorgang der Verknüpfung unterschiedlicher Arbeits- und Entscheidungsschritte. In Abb. 5 ist der wesentliche Ablauf eines Modellierungsprozesses grob strukturiert.

Das Schema basiert auf der für Konstruktionsprozesse, bei denen das Zielsystem ebenfalls ein CAD-Modell darstellt, geltenden VDI-Richtlinie 2221. Das Gesamtvorgehen wird in sechs Arbeitsschritte gegliedert, aus denen jeweils ein Arbeitsergebnis hervorgeht. Die Arbeitsschritte können je nach Aufgabenstellung komplett, teilweise oder mehrfach iterativ durchlaufen werden. Es lässt eine Vielzahl anwendungsspezifischer Vorgehensweisen zu und dient als Orientierung für die Strukturierung und Planung organisatorischer Abläufe einer Modellierungsaufgabe.

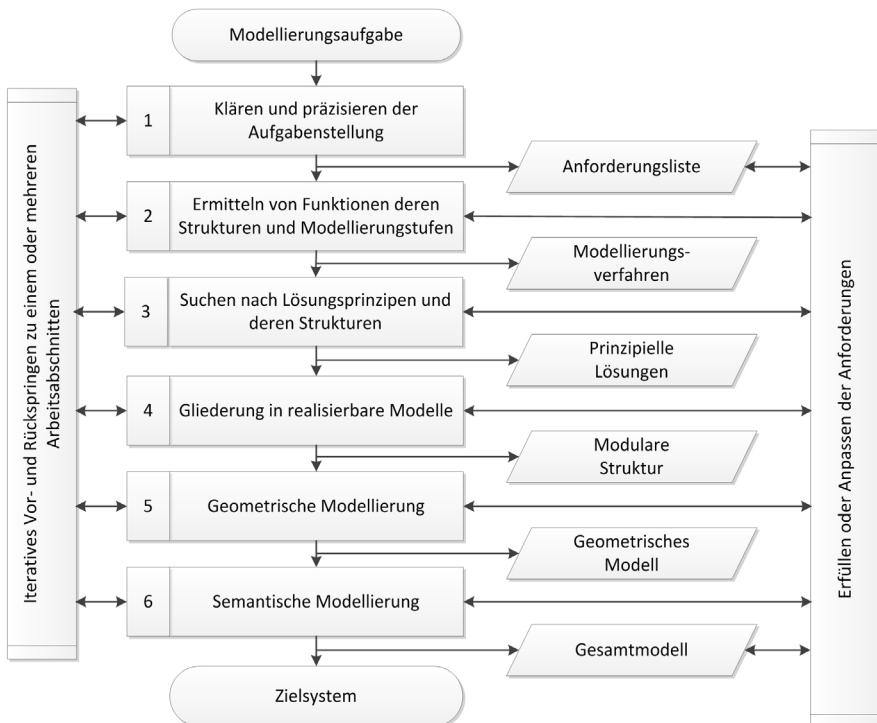


Abb. 5: Methodik bei der Modellierung

4 Modellierungsbeispiele

Das dargestellte Schema soll möglichst allgemein anwendbar den Ablauf des Modellierungsprozesses grob strukturieren und lässt dabei eine Vielzahl von software- und anwendungsspezifischen Vorgehensweisen zu. Deshalb sollen an dieser Stelle nur Anwendungsbeispiele in Anlehnung an die Einteilung in Kap. 2 gegeben werden.

Visuell

Gängige Softwarelösungen, wie AutoCAD Architecture, Autodesk Revit Architecture, 3D-Studio Max Design oder Bentley's Microstation erlauben heute bereits den direkten Import der Scandaten zur Überlagerung mit den Planungsdaten. Mit dem Übergang von der punktuellen zur flächenhaften Darstellung in

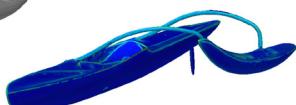


Abb. 6: Modellierung eines Kanus:
Foto (links), Polygonmodell (Mitte) und CAD-Modell (rechts)

Form einer Vermischung der Punktwolke kann zum einen eine visuelle ansprechendere Darstellung erreicht werden, zum anderen bieten leistungsstarke Vermischungsalgorithmen mittlerweile die Möglichkeit die Qualität des Modells entscheidend zu optimieren. Dabei werden die Punktwolken parametergesteuert ausgedünnt, geglättet und verschmolzen. In vielen Softwarepaketen wie Polyworks und Geomagic stellt das so entstandene Polygonmodell die Basis für den Inspektionsprozess dar. Neben der meistgenutzten Dreiecksvermaschung sind auch Quad-meshes möglich, die eine (numerische Strömungsmechanik, englisch: Computational Fluid Dynamics) CFD- oder (Finite-Elemente-Methode) FEM-Analyse zugeführt werden können. [Abb. 6](#) zeigt die Ergebnisse für eine Strömungsanalyse.

Inspektionsorientiert

Bei der inspektionsorientierten Herangehensweise liegt der Schwerpunkt auf der geometrischen Genauigkeit aus Punktwolke abgeleiteter Prüfmerkmale. Dazu zählen im industriellen Bereich die Inspektion von Form- und Lagetoleranzen oder die geodätische Deformationsanalyse. Viele Anwendungen benötigen keine so hohe Punktdichte, vielmehr ist das Ziel, die hohe Redundanz bei Laser-

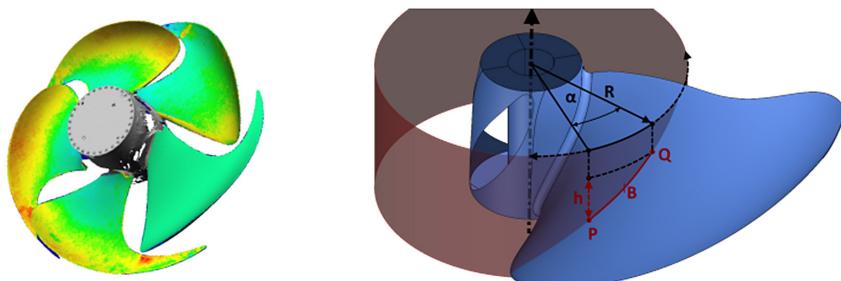


Abb. 7: Prüfung eines Propellers

scanning zu nutzen und durch ein geeignetes analytisches Modell den zufälligen Anteil der Messunsicherheit zu reduzieren. Die Herangehensweise ist dadurch gekennzeichnet, dass Approximationen zur Bestimmung von Modellparametern für einen lokalen Teil der Daten ohne semantische Verknüpfung zu den umgebenden Bereichen angewendet werden. Die Modellparameter sind oftmals Eingangsdaten für die Bestimmung der eigentlichen Prüfmerkmale. Abb. 7 stellt als Beispiel die flächenhafte Prüfung eines Propellers und den abgeleiteten Kennwert Steigung dar.

Die Kennwerte und Berechnungsmethoden für die Inspektion von Propellern sind in der ISO484 festgelegt. An definierten Prüfpunkten sind aus den Höhenunterschieden die Kennwerte zu berechnen. Da der Prüfpunkt mit einem scannenden System nicht direkt gemessen werden kann, können lokale Modellierungen mit analytischen Flächen zur Ermittlung der Höhenunterschiede genutzt werden. Je nach geforderter Genauigkeit, die sich aus den unterschiedlichen Propellerklassen ergibt, können Approximationsansätze mit lokalen Ebenen oder Freiformflächen genutzt werden (Geist 2017). Softwareprodukte wie Polyworks und Geomagic bieten sowohl die Möglichkeit Freiformflächen zu modellieren als auch die Verarbeitung in Form eines Inspektionsprozesses durchzuführen. Jedoch ist das zuverlässige Abschätzen des Messrauschens zur Ermittlung merkmalsspezifischer Unsicherheit bei diesen Anwendungen von besonderer Bedeutung. Ähnliche Herausforderungen bestehen bei der geodätischen Deformationsanalyse. Beispielsweise bietet die freie Software CloudCompare hier spezielle Auswertemethoden an (Holst 2017).

Verwendungsorientiert

Für die stark verwendungsorientierte Interpretation von Punktwolken eignen sich Ansätze auf einem hohen semantisch geprägten Grad der Formulierung von Vorwissen. Katalogbasierte Methoden existieren bereits für einige Anwendungen und bieten eine sehr effiziente Möglichkeit den Nutzer durch halb-automatische Verfahren zu unterstützen. In Abb. 8 ist eine eigens entwickelte

Softwarelösung für die Modellierung von Passrohrverbindungen im Schiffbau dargestellt.

Aus der Punktwolke werden halbautomatisch die relevanten Flanschverbindungen extrahiert. Für die Fertigung der Verbindungslücken sind insbesondere der Mittelpunkt, die Stellung der Lochleibungen und die Orientierung in Form von Isometrien zu übergeben. Aufgrund von Verschattungen und begrenzten Zugänglichkeiten wird der Modellierungsprozess unterstützt, durch auf Basis

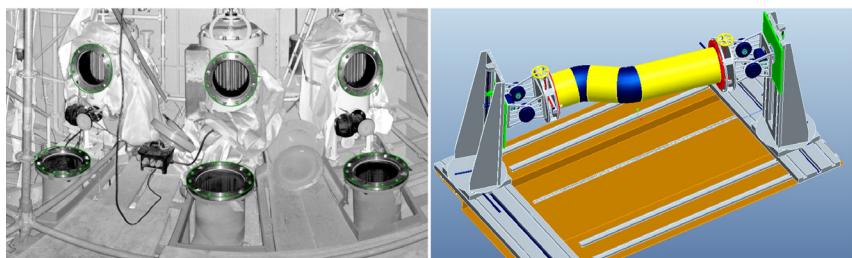


Abb. 8: Fertigung von Passrohrverbindungen: TLS-Messung (links) und datenbasierte Planung (rechts)

von Normenvorschriften definierten geometrischen Merkmalen. Durch dieses Vorgehen kann die semantische Vorinformation welche Bauteile und geometrischen Ausprägungen möglich sind bei der Modellierung genutzt und werden. Auf diesem Modellierungsverfahren basieren Softwareprodukt wie z. B. Clear-Edge3D für den Anlagenbau zur Verfolgung von Rohrverläufen und Modellierungswerzeuge für Gebäude.

Informationsorientiert

Für investitionsrelevante Entscheidungen bei Infrastrukturplanungen sind 3D-Modelle der vorhandenen Gegebenheiten von entschiedenem Vorteil. Basis für die Entscheidungsfindung sind dabei nicht nur die rein geometrischen Modelle sondern eine Vielzahl von Metainformationen die Elemente des Modells charakterisieren. Solche Systeme werden zunehmend zu Standardwerkzeugen bei der Planung von Infrastrukturprojekten. Im industriellen Bereich werden PLM (Product-Lifecycle-Management) Systeme verwendet, um ein digitales Modell eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus abbilden zu können. Im Bauwesen basieren BIM (Building Information Modelling)-Systeme auf geometrischen 3D-Modellen. Für die Planung und den Umbau von Fabriken werden ebenfalls 3D-Modelle benötigt, um möglichst auf Basis einer As-built-Beschreibung Kosten-Nutzen-Rechnungen, Materialflusssimulationen und Layoutplanungen durchführen zu können. **Abb. 9** zeigt die Reorganisation einer Werft, die erfassten Messdaten und das entstandene Planungsmodell.

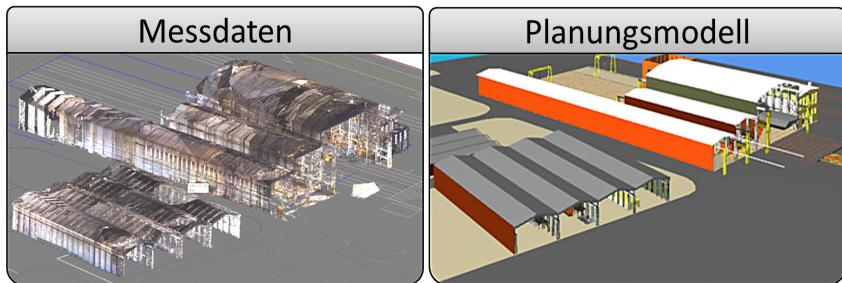


Abb. 9: Planung einer Werfanlage auf Basis einer TLS-Messung

Für die Datenmodellierung wurden verschiedene Modellierungsmethoden und Softwarereprodukte verwendet, um den unterschiedlichen Anforderungen einerseits des Hallenlayouts und andererseits der Erfassung der bestehenden Betriebsmittel gerecht zu werden. Die Softwarepalette reicht dabei von Verarbeitungsprogrammen für Messdaten (z. B. Polyworks, Rhinoceros) bis hin zu reinen Visualisierungsprogrammen (3DSMax). Nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Vermesser, Konstruktoren und Planer konnte die geometrische Modellierung mit notwendigen semantischen Informationen angereichert werden.

Funktionsorientiert

Die funktionsorientierte Modellierung, bei der von Objekten grundlegende Funktion digitalisiert werden soll, stellt eine besondere Herausforderung dar. Bei solchen Objekten ist es zumeist notwendig eine Vielzahl an Softwareprodukten einzusetzen. Entsprechend kommt der Gliederung in realisierbare Teilmodelle eine besondere Bedeutung zu. Bereits im Schritt der Datenerfassung werden unterschiedliche Erfassungsmethoden kombiniert. Am dargestellten Beispiel einer Astronomischen Großuhr wurden TLS-Daten mit photogrammetrischen Methoden und Handaufmaßen kombiniert (Abb. 10).

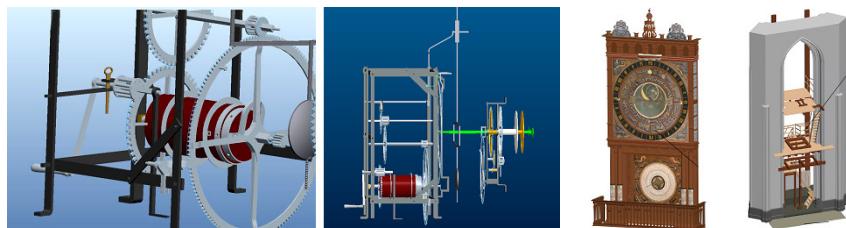


Abb. 10: Astronomische Uhr der Marienkirche in Rostock: animiertes funktionales Modell der Uhr (links) und Modellierung der Vorder- und Hinterseite (rechts)

Im Zuge der Ernennung der Uhr zum Weltkulturerbe wurde eine umfangreiche technische Dokumentation der Funktionsweise gefordert. Im Ergebnis entstand ein 3D-Modell, mit dem es möglich ist vom Uhrwerk bis zum Apostelgang sämtliche technische Funktionen digital nachzubilden, zu animieren und technische Zeichnungen abzuleiten, die es ermöglichen die Uhr im Maßstab 1:1 nachzubauen. Für die Modellierung wurden unterschiedliche Softwareprodukte aus dem Bereich Messdatenverarbeitung (Z+FLasercontrol, Polyworks), visuelle Modellierung/Design (StudioMax3D, Rhino) und Konstruktionsprogramme (Catia, SolidWorks, AutoCAD) eingesetzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Aufkommen terrestrischer Laserscanner hat die Art der Datenerfassung grundlegend geändert. Trotzdem sind TLS-System kein Allheilmittel sondern eine Erweiterung des Spektrums an Vermessungsdienstleistungen. Bei der Anwendung punktuell messender Verfahren erfolgen die Informationsreduktion, Geometriebildung und semantische Verknüpfung bereits während des Aufmaßes Vor-Ort. Diese Prozessschritte verlagern sich mit dem Nachteil, dass eine enorme Menge an implizit enthaltenen Informationen in geeigneter Art interpretiert werden muss. Für spezifische Anwendungsszenarien sind in den letzten Jahren sowohl im wissenschaftlichen als auch im kommerziellen Bereich Lösungen entstanden, die Nutzer teilautomatisiert durch einen Modellierungsprozess begleiten. Für eine weiterführende und vertiefende Darstellung sei auf (Kersten 2017) verwiesen. Nach Auffassung des Autors wird es in den nächsten zehn Jahren keine Lösungen geben, die eine automatische Generierung von CAD-basierten 3D-Volumenmodellen aus 3D-Punktwolken ermöglichen (Kersten 2017). Dies gilt insbesondere, für Modellanforderungen mit einem hohen geforderten Semantiklevel und ist bei stark differierenden Zielstellung und Aufnahmekonfigurationen unter dem Aspekt der Qualitätssicherung bzw. Zuverlässigkeit vermutlich nicht wünschenswert.

Literatur

- Behrndt, A.; Münzer, M.; Seidler, S. (2013): Visualisierung des as-built-Modells der Astronomischen Uhr der St.-Marien-Kirche zu Rostock. Projektarbeit. Universität Rostock, Rostock. Lehrstuhl für Fertigungstechnik.
- Blankenbach, J. (2015): Bauwerksvermessung für BIM. In: Borrman, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 343–362.

- Böhm, J. (2009): Übersicht über Ansätze zur automatischen Objektrekonstruktion aus Punktwolken. 3. Hamburger Anwenderforum Terrestrisches Laserscanning. HCU Hamburg. HafenCity Universität Hamburg, Geomatik, Hamburg, 2009.
- Boochs, F.; Kern, F.; Schütze, R.; Marbs A. (2009): Ansätze zur geometrischen und semantischen Modellierung von großen, unstrukturierten 3D-Punktmengen. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 1/2009, 65–77.
- Bringmann, O.; Pflieger, T. (2005): Punktwolken interpretieren. In: Luhmann, T. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005. Wichmann, Heidelberg, 258–265. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/15798818-Punktwolken-interpretieren.html>, letzter Zugriff 10/2018.
- DVW e. V.; Runder Tisch GIS e. V. (Hrsg.) (2017): Leitfaden Geodäsie und BIM. Unter Mitarbeit von Robert Kaden, Christian Clemen, Robert Seuß, Jörg Blankenbach, Ralf Becker, Andreas Eichhorn et al. 1. Aufl.: Wichmann Verlag. https://www.dvw.de/sites/default/files/news_termine/dateianhang/2017/Leitfaden%20Geod%C3%A4sie%20und%20BIM_2.pdf, letzter Zugriff 04/2018.
- Egger, M.; Hausknecht, K.; Liebich, T.; Rrzybylo, J. (2013): BIM-Leitfaden für Deutschland. Information und Ratgeber. Endbericht. Hrsg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff 03/2018.
- Geist, M. (2017): Flächenhafte Formabweichungen bei der Anwendung terrestrischer Laserscanner. Dissertation.
- Greve, O. (2014): Erläuterungen zur Laservermessung der Astronomischen Uhr durch das Fraunhofer Institut Rostock. In: Schukowski, M.; Jahnke, U.; Fehlberg, W. (Hrsg.): Mittelalterliche astronomische Großuhren. Internationales Symposium in Rostock 25. bis 28. Oktober 2012. 1. Aufl., neue Ausg. Leipzig: AVA (Acta Historica Astronomiae, 49), 353–366.
- Heunecke, O. (2009): Aufbau und Inhalt der neuen DIN 18710 „Ingenieurvermessung“ – Ingenieurvermessung im Bauwesen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, Koblenz.
- Holst, C.; Schmitz, B.; Schraven, A.; Kuhlmann, H. (2017a): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Staumauer. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2017, 142. Jg., 98–110.
- Kersten, T. (2017): Untersuchungen zur Qualität und Genauigkeit von 3D-Punktwolken für die 3D-Objektmodellierung auf der Grundlage von terrestrischem Laserscanning und bildbasierten Verfahren. Dissertation.
- Kohlhepp, P. (1993): Oberflächendarstellung zur Repräsentation und Erkennung von Objekten aus Abstandsbildern. KFK-Bericht Nr. 5167, Kernforschungsinstitut Karlsruhe.
- Meister, M.; Gierschner, F.; Geist, M.; Knaack, L.: Regelgeometriebasiertes Ist-Modell für den Innenausbau von Megayachten. AVN Nachrichten 3-2017.
- Nüchter, A.; Lingemann, K.; Hertzberg, J.; Surmann, H. (2007): 6D SLAM-3D mapping outdoor environments. In: J. Field Robotics 24 (8-9), 699–722. DOI: [10.1002/rob.20209](https://doi.org/10.1002/rob.20209).
- Reid, M. (2016): What is Geospatial SLAM? In: LIDAR Magazine 6 (4), 29–30. www.lidarmag.com, letzter Zugriff 06/2016.

- Rohs, M. (2012): Erstellung eines 3D-Modells der Astronomischen Uhr in St. Marien zu Rostock basierend auf Daten von terrestrischen Laserscanning. Projektarbeit. Universität Rostock, Rostock. Lehrstuhl für Fertigungstechnik.
- Roth-Koch, S. (1996): Merkmalsbasierte Definition von Freiformgeometrien auf der Basis räumlicher Punktwolken. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer (IPA-IAO-Forschung und -Praxis, Bd. 229).
- Schallehn, E. (2018): Grundlagen der Informatik für Ingenieure. OvG Universität Magdeburg, Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, Vorlesungsskript.
- SKM-Produktseite (2018): www.skm-informatik.com/skm/cad-pdm/edgewise-scansoftware.html, letzter Zugriff 09/2018.
- Teutsch, C. (2007): Model-based analysis and evaluation of point sets from optical 3D laser scanners. Magdeburger Schriften zur Visualisierung, Shaker Aachen.
- Vajna, S.; Bley, H.; Hohenberger, P.; Weber, C.; Zeman, K. (2009): CAx für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung. Berlin, Heidelberg.

Kontakt

Dr.-Ing. Michael Geist

Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik

Albert-Einstein-Straße 30, 18059 Rostock

michael.geist@igp.fraunhofer.de

Registrierung mit Targets: Wie genau ist das?

Jannik Janßen | Christoph Holst | Heiner Kuhlmann

1 Motivation

Das terrestrische Laserscanning hat sich in den letzten Jahren in der Ingenieurgeodäsie als hilfreiche Ergänzung herkömmlicher Messverfahren fest etabliert. Es wird beispielsweise zur Dokumentation von Bauwerken (Pilhatsch et al. 2015), von Kulturerbe (Held et al. 2017) oder zur Deformationsanalyse (Holst et al. 2017) eingesetzt. In vielen Anwendungsfällen ist es nicht möglich, das gesamte Messobjekt von nur einem Standpunkt zu scannen. Für die Erfassung des gesamten Objekts muss von mehreren Standpunkten gemessen werden. Die Einzelscans der verschiedenen Standpunkte beziehen sich zunächst auf das lokale Koordinatensystem des Laserscanners und müssen in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Diese Verknüpfung der Scans wird als Registrierung bezeichnet.

Zur Registrierung von Laserscans stehen dem Nutzer verschiedene Möglichkeiten offen. Die Scans können zum Beispiel über extra aufgestellte Zielzeichen ([Abb. 3](#)) registriert werden, welche mehrfach von unterschiedlichen Standpunkten gescannt werden. Alternativ zur zielzeichenbasierten Registrierung kann der Nutzer seine Einzelscans softwarebasiert oder hardwarebasiert registrieren (Kuhlmann und Holst 2016).

Trotz der steigenden Beliebtheit softwarebasierter Registrierung, kommen in vielen Anwendungsfällen weiterhin Zielzeichen zum Einsatz. Diese haben gegenüber den alternativen Registriermethoden die beiden Vorteile, dass ihre räumliche Verteilung (Messkonfiguration) vom Nutzer selbst beeinflusst werden kann, und dass die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten durch Berücksichtigung der in Kap. 2 erläuterten Einflussgrößen optimiert werden kann. Die Registrierung ist somit gegenüber softwarebasierten Lösungen unabhängig vom Messobjekt.

Dieser Beitrag untersucht die Genauigkeit der Registrierung mittels Zielzeichen. Diese ist von der Messkonfiguration, dem Laserscanner selbst, der Atmosphäre, dem Zielzeichendesign und dem Algorithmus zur Koordinatenabschätzung abhängig. Die Einflüsse des Zielzeichendesigns und des Algorithmus zur Koordinatenabschätzung werden in diesem Beitrag genauer analysiert und mit Standardabweichungen in Abhängigkeit der Messdistanz quantifiziert. Die

gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt um die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten zu verbessern.

Kap. 2 erläutert die Aufgabe der Registrierung, ihre methodischen Grundlagen sowie ihre Einflussgrößen genauer. In Kap. 3 wird der Genauigkeitseinfluss des gewählten Algorithmus und in Kap. 4 der Einfluss verschiedener Zielzeichendesigns untersucht. Kap. 5 zeigt anhand eines Anwendungsbeispiels, welche Genauigkeiten mit der zielzeichenbasierten Registrierung – zum einen in Verbindung mit Herstellerzielzeichen und -software, zum anderen mit der im Beitrag beschriebenen universitären Lösung – erreicht werden können. In Kap. 6 werden die Ergebnisse des Beitrags zusammengefasst.

2 Theoretische Überlegungen zur Registrierung

Als Registrierung wird die Verknüpfung mehrerer Einzelscans zu einem Gesamtscan bezeichnet. Die Grundlagen der Registrierung sind in Kap. 2.1 beschrieben. Kap. 2.2 befasst sich mit den Einflussgrößen auf die Genauigkeit der zielzeichenbasierten Registrierung.

2.1 Aufgabe der Registrierung von Laserscans

Das Ziel der Registrierung ist die Bestimmung der Transformationsparameter zwischen mehreren Einzelscans. Bei der Registrierung zweier Scans sind allgemein sieben Parameter zu bestimmen:

- 3 Translationen entlang der Koordinatenachsen (t_x, t_y, t_z)
- 3 Rotationen um die Koordinatenachsen (α, β, γ)
- 1 Maßstabsabweichung (Δm)

Da die einzelnen zu registrierenden Scans meist mit demselben Scanner aufgenommen werden, ist die Maßstabsabweichung vernachlässigen.

Um die so verbleibenden sechs Parameter (Abb. 1) zu bestimmen, existieren eine Vielzahl von Möglichkeiten. Zu den softwarebasierten Lösungsmöglichkeiten zählen beispielsweise der ICP-Algorithmus (Besl und McKay 1992) oder die

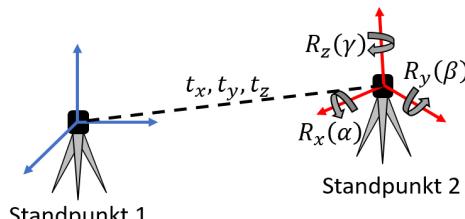


Abb. 1:
Veranschaulichung der drei translatorischen und rotatorischen Registrierparameter

Registrierung mittels korrespondierenden Ebenen (Gielsdorf 2013, Wujanz et al. 2018). Hardwarebasierte Optionen zur Registrierung werden in Paffenholz et al. (2010) und Ullrich und Fürst (2017) beschrieben.

Die Registrierung mit Hilfe von Zielzeichen schätzt mittels identischer Punkte, die durch die Laserscanning-Zielzeichen signalisiert werden, die sechs Transformationsparameter zwischen den Einzelscans. Im Gegensatz zur softwarebasierten Registrierung ist die zielzeichenbasierte Registrierung somit unabhängig von den Beobachtungen des Messobjekts.

Für die eindeutige Bestimmung der sechs Transformationsparameter müssen mindestens drei identische Zielzeichen von beiden Standpunkten gescannt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass alle Zielzeichen räumlich gut verteilt werden und nicht auf einer Linie liegen, da sonst die Rotation um diese Achse unbestimmt bleibt. Werden die Scans mit Horizontbezug aufgenommen (aktiver Kompensator), reduziert sich die Mindestanzahl der zur Registrierung benötigten Zielzeichen auf zwei, da die Rotationen α und β mit 0° angenommen werden können.

Um eine zuverlässigere und genauere Bestimmung der Registrierparameter zu erreichen, ist es sinnvoll, mehr als die Mindestanzahl an Zielzeichen im Messbereich zu verteilen. Die Transformationsparameter werden in einer Ausgleichung geschätzt. Wie im folgenden Kapitel zu sehen, hat die räumliche Verteilung der Zielzeichen sowie die Genauigkeit der Beobachtungen (hier Zielzeichenkoordinaten) direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Registrierung.

2.2 Einflussgrößen der zielzeichenbasierten Registrierung

Die Genauigkeit der Registrierung hängt, analog zur Analyse geodätischer Netze, von zwei Einflussgrößen ab:

Messkonfiguration

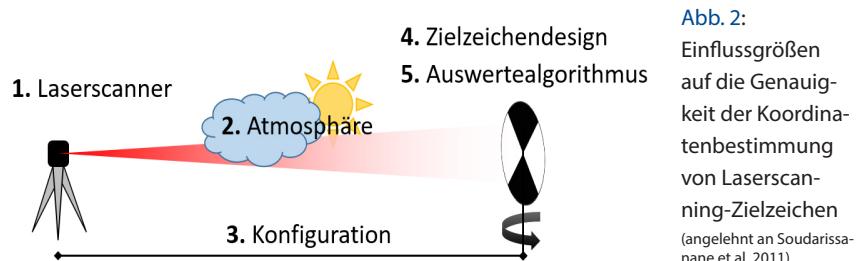
Die Verteilung der Zielzeichen beeinflusst die Genauigkeit der Registrierung direkt. Unterschiedliche Zielzeichenkonfigurationen können vorab simuliert werden und die Verteilung anhand geodätisch bekannter Qualitätskriterien, wie Standardabweichungen der Standpunkte oder Redundanzanteile, beurteilt werden. Dieses Vorgehen ist von der Analyse geodätischer, terrestrischer Netze bekannt (Pelzer 1980, Niemeier 2008). Aus diesem Grund wird auf den Einfluss der Messkonfiguration nicht weiter eingegangen.

Genauigkeit der Beobachtungen

Die Genauigkeit der Registrierung hängt wesentlich von der Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten ab, welche als Beobachtungen in den Ausgleich der Re-

gistierung eingehen. Die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten lassen sich analog zu den Einflussfaktoren der Einzelpunktmessung nach Soudarissanane et al. (2011) herleiten, wobei die vier Einflussgrößen um den Einfluss des Auswertealgorithmus erweitert werden (Abb. 2):

1. **Einfluss des Laserscanners:** Die Messunsicherheit des terrestrischen Laserscanners hat Einfluss auf die Qualität der gescannten Punktfolge. Da die Koordinaten der Zielzeichen aus der Punktfolge geschätzt werden, ist offensichtlich, dass die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen des Laserscanners auch die Genauigkeit der Koordinatenschätzung beeinflussen.



2. **Einfluss der Konfiguration:** Die Konfiguration beschreibt die Distanz und den Einfallswinkel des Scanners zum Zielzeichen. Durch längere Messdistanzen und steigende Einfallswinkel nimmt die Auflösung, mit der das Zielzeichen gescannt wird, ab und auch die zufälligen Messabweichungen werden größer. Dies führt zu einer schlechteren Qualität der Punktfolge, aus der die Koordinaten der Zielzeichen geschätzt werden, und hat somit Einfluss auf die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten.
3. **Einfluss der Atmosphäre:** Die Atmosphäre hat, wie bei allen elektrooptischen Distanzmessungen, Einfluss auf die Genauigkeit der Punkte. Aufgrund der üblichen Zielweiten von wenigen hundert Metern und den ausreichend genauen Korrekturmodellen spielt sie beim terrestrischen Laserscanning und somit auch für die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten eine eher untergeordnete Rolle.
4. **Einfluss des Zielzeichendesigns:** Für die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten ist anzunehmen, dass das Zielzeichen selbst einen entscheidenden Einfluss hat. Auf Grundlage der Literatur ist davon auszugehen, dass sowohl die Geometrie, das Material, die Oberflächenbeschaffenheit, die Farbe und der Reflexionsgrad des Zielzeichens Einfluss auf die geometrische Erfassung des Zielzeichens haben. Auch die gemessenen Intensitäten, die bei der Koordinatenbestimmung ebener Zielzeichen benutzt werden, sind von diesen Parametern beeinflusst.

Auf Grund der einseitigen Abtastung der Zielzeichen können bei der Verwendung von Kugelzielzeichen sogenannte „Quetsch“- und „Aufweitungs“-Effekte auftreten (Rachakonda et al. 2017). Daher werden im Folgenden nur ebene Schwarz-weiß-Zielzeichen betrachtet.

5. **Einfluss des Auswertealgoritmus:** Aus der vom Scanner aufgenommenen Punktwolke müssen mit Hilfe eines Auswerteverfahrens die Koordinaten der Zielzeichen geschätzt werden. Hierfür existiert eine Vielzahl von algorithmischen Lösungsmöglichkeiten, wobei anzunehmen ist, dass nicht alle Algorithmen gleich präzise Koordinaten liefern.

Zwischenfazit

Aus den Überlegungen zu den Genauigkeitseinflüssen der Registrierung wird deutlich, dass der Einfluss der Messkonfiguration hinreichend aus der Analyse geodätischer Netze bekannt ist. Der Einfluss der Genauigkeit der Beobachtungen hingegen ist nicht gut bekannt. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Einflüsse des Auswertealgoritmus (Kap. 3) und des Zielzeichendesigns (Kap. 4) für jeweils verschiedene Konfigurationen von Scanner und Zielzeichen untersucht. Der Einfluss verschiedener Laserscanner wird in diesem Beitrag nicht weiter analysiert.

3 Genauigkeitseinfluss des Zielzeichenalgoritmus

Mit Hilfe eines Auswertealgoritmus werden aus der aufgenommenen Punktwolke die Koordinaten der Zielzeichen geschätzt werden. Hierfür existieren eine mehrere Verfahren, welche in Kap. 3.1 kurz beschrieben werden. Kap. 3.2 untersucht die Präzision der verschiedenen Verfahren empirisch.

3.1 Verfahren zur Koordinatenschätzung von Zielzeichen

Um aus der Punktwolke eines Zielzeichens (Abb. 3) eine Koordinate des Zielzeichens zu schätzen, stehen verschiedene algorithmische Auswerteverfahren zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist die Nutzung der vom Hersteller mitgelieferten Standardsoftware des jeweiligen Scanners. Diese haben meist Möglichkeiten zur Koordinatenschätzung von Zielzeichen implementiert. Details zu diesen Algorithmen werden von den Herstellern in der Regel aus Wettbewerbsgründen nicht veröffentlicht.

In der Forschung hingegen lassen sich in verschiedenen Publikationen unterschiedliche Verfahren zur Koordinatenschätzung von Zielzeichen finden. Drei von ihnen sind im Folgenden beschrieben:

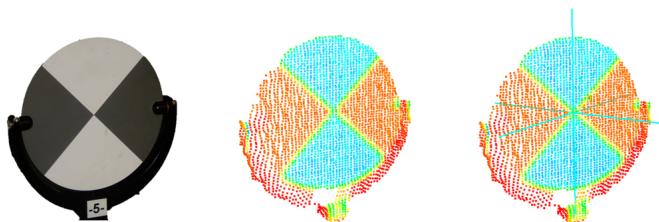


Abb. 3: Foto eines Zielzeichens der Fa. Leica Geosystems (links), Punkt-
wolke des gescannten Zielzeichens (Mitte) und Punktwolke mit der von
der Herstellersoftware geschätzten Koordinate (rechts)

Schätzung mittels Kantenextraktion

Der Algorithmus mittels Kantenextraktion basiert auf der Idee von Chow et al. (2011) und nutzt die Gradienten zwischen den schwarzen und weißen Teilflächen des Zielzeichens zur Schätzung der Zielzeichenkoordinate. Im ersten Schritt wird eine Ebene durch die Punkte des Zielzeichens geschätzt. Die Ebenenparameter werden genutzt um eine Verebnung der Punktwolke durchzuführen und so die dreidimensionale Aufgabe der Koordinatenschätzung auf eine zweidimensionale Aufgabe zu reduzieren. Als nächstes wird ein Raster über die 2D-Punktwolke gelegt und so ein Grauwertbild aus der Punktwolke abgeleitet. Jede Rasterzelle bildet hierbei ein Pixel, dem eine eindeutige x- und y-Koordinate zugeordnet werden kann. Der Grauwert des Pixels wird aus den Intensitäten der Punktwolke interpoliert. Mittels der Bildgradienten werden die Kantenpixel zwischen den schwarzen und weißen Teilflächen aus dem Grauwertbild extrahiert (Canny 1986). Durch diese Kanten werden anschließend zwei Geraden geschätzt. Der Schnittpunkt der beiden Geraden liefert den gesuchten Referenzpunkt des Zielzeichens im 2D-Raum. Mit Hilfe der Ebenenparameter kann der zweidimensionale Referenzpunkt auf den dreidimensionalen Referenzpunkt zurückgeführt werden.

Schätzung mittels Bildkorrelationen

Dieses Verfahren basiert auf der Idee von Kregar et al. (2013) und nutzt Bildkorrelationen zur Schätzung der Koordinate eines Zielzeichens. Analog zum vorherigen Algorithmus wird zuerst eine Ebene durch die Punktwolke des Zielzeichens geschätzt und anschließend ein Grauwertbild des Zielzeichens abgeleitet. Im nächsten Schritt wird ein ideales Schwarz-weiß-Zielzeichen (Template) erzeugt und anschließend die Kreuzkorrelationen zwischen dem Grauwertbild und dem Template berechnet. Die Stelle der höchsten Korrelation wird verwendet, um, zusammen mit den x- und y-Werten der Pixel, den 2D-Referenzpunkt des Zielzeichens zu bestimmen. Dieses Vorgehen kann auch als korrelationsbasierte Bildregistrierung bezeichnet werden. Mit Hilfe der Ebenenparameter

kann die geschätzte 2D-Koordinate in eine 3D-Koordinate des Zielzeichens umgerechnet werden.

Schätzung mittels „mittlerer“ Intensitäten

Dieser Ansatz zur Koordinatenschätzung von Zielzeichen ist in Ge und Wunderlich (2015) beschrieben und basiert auf der Idee der Kantenextraktion ohne Grauwertbild, sondern über die direkten Intensitäten. Auch bei diesem Verfahren wird zuerst eine Ebene durch die Punkte des Zielzeichens geschätzt und anschließend zur Verebung der Punktwolke genutzt. Es wird angenommen, dass die Intensitäten von Scanpunkten, die auf den Kanten zwischen schwarzen und weißen Teilflächen liegen, auch „mittlere“ Intensitätswerte besitzen. Durch diese Scanpunkte mit „mittleren“ Intensitäten werden, wie beim Verfahren mittels Bildgradienten, zwei Geraden geschätzt. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die beiden Geraden nicht durch Bildpixel, sondern durch die Messpunkte selbst geschätzt werden. Der Schnittpunkt der beiden Geraden liefert den 2D-Referenzpunkt, der ebenfalls mit den Ebenenparametern des Zielzeichens zurück in den 3D-Raum transformiert wird.

3.2 Empirische Präzision der Auswertealgorithmen

Es ist anzunehmen, dass die beschriebenen Algorithmen aus Kap. 3.1 zu unterschiedlich präzisen Koordinaten führen. Um dies zu überprüfen, werden Zielzeichen mehrfach gescannt. Anschließend werden die Koordinaten jeweils mit der Herellersoftware und mit den drei beschriebenen Algorithmen aus der Literatur geschätzt. Aus den Wiederholungen wird dann eine Standardabweichung der Koordinatenschätzung für jeden Auswertealgorithmus berechnet. Die Standardabweichungen werden anschließend verglichen.

Versuchsdurchführung und -auswertung

Mit der Leica ScanStation P20 (Auflösung 0,8 mm @ 10 m, Qualitätsstufe 1) werden zehn Leica Tilt & Turn Targets jeweils achtmal gescannt ([Abb. 4](#)). Um auch verschiedene Messkonfigurationen zu berücksichtigen, werden die Zielzeichen jeweils bei 9 Distanzen zwischen 2 m und 100 m gescannt. Für jede Distanz und jede der acht Wiederholungen werden mittels Herellersoftware Cyclone, dem Verfahren mittels Bildgradienten, mittels Bildkorrelationen und mittels „mittlerer“ Intensitäten die Koordinaten aller Zielzeichen bestimmt.

Aus den acht Koordinaten der Wiederholungscans können Standardabweichungen der Distanz $\hat{\sigma}_r$ und der Winkel $\hat{\sigma}_w$ für jedes Zielzeichen, jede Distanz und jeden Algorithmus berechnet werden. Da die Standardabweichungen der zehn Zielzeichen für die jeweils gleiche Distanz und den gleichen Algorithmus

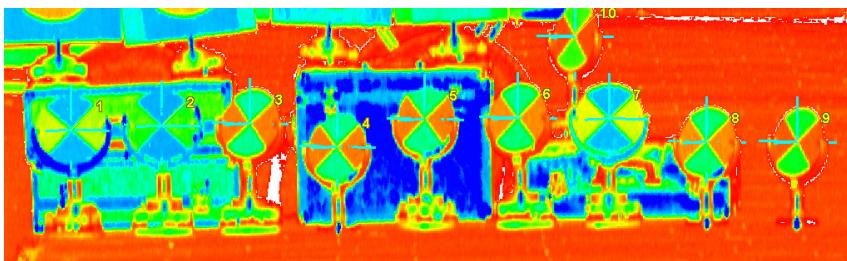


Abb. 4: Versuchsaufbau zur empirischen Bestimmung der Präzision der Auswertealgorithmen – Punktfolge der zehn gescannten Tilt & Turn-Zielzeichen (Distanz: 35 m, Scanner: Leica ScanStation P20, Auflösung: 0,8 mm @ 10 mm)

ähnliche Werte aufweisen, werden die Standardabweichungen gemittelt. Das Ergebnis sind Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ für jeden Algorithmus in Abhängigkeit der Distanz.

Analyse der Präzision der Algorithmen

Die berechneten Standardabweichungen sind in Abb. 5 visualisiert. Aus der Abbildung geht hervor, dass sich die Standardabweichungen der Distanz σ_r in den einzelnen Verfahren nicht wesentlich unterscheiden (Abb. 5 oben). Sie liegen bis 20 m im unteren Submillimeterbereich und steigen bei 100 m auf einige Millimeter an. Dies kann damit erklärt werden, dass die Standardabweichung $\hat{\sigma}_r$ im Wesentlichen von der Präzision der Ebenenschätzung abhängt und die Ebene in allen untersuchten Algorithmen gleich geschätzt wird.

Die Standardabweichungen in Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ hingegen weisen zwischen den verschiedenen Verfahren signifikante Unterschiede auf (Abb. 5 unten). Die Präzision der Koordinatenschätzung mittels Herstellersoftware ist ähnlich der Präzision der Verfahren mittels Bildgradienten und „mittleren“ Intensitäten. Das Verfahren mittels Bildkorrelationen liefert allerdings signifikant kleinere Standardabweichungen. Sie liegen bis zu einer Messdistanz von 100 m unterhalb eines halben Millimeters. Werden die Standardabweichungen $\hat{\sigma}_w$ in Winkelgraden umgerechnet, wird deutlich, dass die Präzision des Verfahrens über Bildkorrelationen mit unter 1" auch im Nahbereich bei Messdistanzen unter 20 m der Präzision der anderen Verfahren überlegen ist.

Bei der Koordinatenschätzung von Zielzeichen mittels Herstellersoftware (hier Leica Cyclone) liegen die Standardabweichungen bis 20 m im Submillimeterbereich und im Bereich bis 100 m im Bereich einiger Millimeter. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Zielzeichenschätzung in Leica Cyclone vom Hersteller auch nur bis 50 m empfohlen wird.

Die Koordinatenschätzung mittels Bildkorrelationen liefert gegenüber den anderen beiden getesteten, methodischen Ansätzen (Bildgradienten, „mittlere“

Intensitäten) die höchste Präzision. Die Standardabweichungen $\hat{\sigma}_r$ der drei Verfahren unterscheiden sich kaum. In Winkelrichtung liefert das Verfahren über Bildkorrelationen die präzisesten Koordinaten, die Standardabweichungen liegen bis 100 m Messdistanz unterhalb von einem halben Millimeter. Aufgrund dieser Ergebnisse wird für eine möglichst präzise Koordinatenbestimmung von Zielzeichen die Schätzung mittels Bildkorrelationen empfohlen.

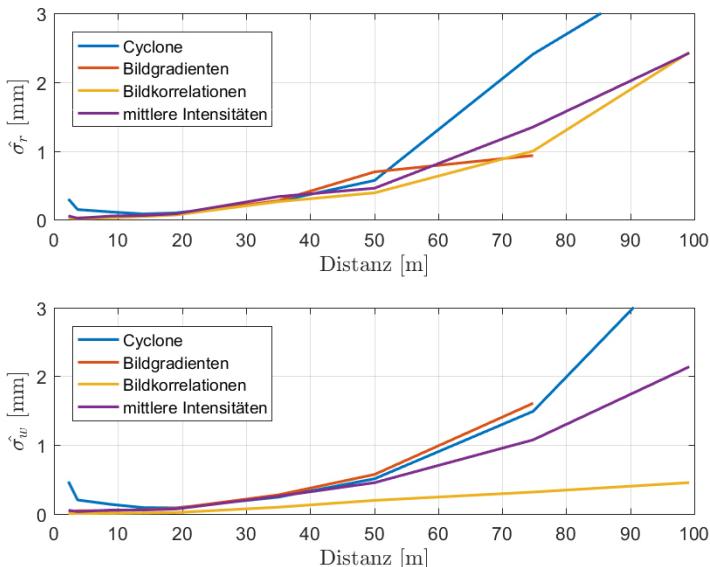


Abb. 5: Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ für verschiedene Verfahren der Koordinatenschätzung in Abhängigkeit der Messdistanz

4 Genauigkeitseinfluss des Zielzeichendesigns

Neben dem Einfluss des Algorithmus auf die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten wird der Einfluss verschiedener Zielzeichendesigns untersucht. Hierzu finden in Kap. 4.1 Vorüberlegungen zu den möglichen Zielzeichendesigns statt. Anschließend werden in Kap. 4.2 die Realisierungen von Zielzeichen empirisch untersucht.

4.1 Vorüberlegungen zum Zielzeichendesign

Zur Beschreibung von Zielzeichen werden in Lichti et al. (2007), Muralikrishnan et al. (2016), Rachakonda et al. (2016) neben der geometrischen Beschreibung

der Zielzeichen die Eigenschaften Farbe, Material, Oberflächenbeschaffenheit und Reflexionsgrad benutzt. Sie werden im Folgenden kurz erläutert:

Geometrie

Bei der geometrischen Form eines Zielzeichens wird im Wesentlichen zwischen ebenen und räumlichen Zielzeichen unterschieden. Räumliche Zielzeichen können allein durch ihre geometrische Form, z. B. Kugel, einen Referenzpunkt signalisieren. Allerdings werden wegen des in Kap. 2 erwähnten „Quetsch“- und „Aufweitungs“-Effektes (Rachakonda et al. 2017) im Folgenden nur ebene Zielzeichen betrachtet.

Material

Mit dem Material des Zielzeichens ist in der Regel das Trägermaterial gemeint, dessen Oberfläche bearbeitet sein kann (siehe Oberflächenbeschaffenheit). Je nach Material (und Wellenlänge des Lasers) dringt der Messstrahl unterschiedlich tief in das Material ein. Dies kann zu systematischen Abweichungen in den Distanzmessungen führen. Nach Muralikrishnan et al. (2017) führen die Materialien Aluminium und Holz zu den kleinsten Abweichungen und scheinen somit die am besten geeigneten Materialien für Zielzeichen zu sein. Von der Verwendung synthetischer Materialien, wie Plastik, ist nach den Untersuchungen von Reshetnyuk (2006) und Rachakonda et al. (2016) abzusehen. Das Material bestimmt gemeinsam mit der Oberflächenbeschaffenheit und der Farbe den Reflexionsgrad eines Zielzeichens.

Oberflächenbeschaffenheit

Mit der Oberflächenbeschaffenheit ist die physikalische Eigenschaft der Zielzeichenoberfläche (Grenzmaterial zur Atmosphäre) gemeint. Sie ist durch die Rauheit der Oberfläche bestimmt und maßgeblich für die Art der Reflexion (diffus oder spiegelnd) verantwortlich. Nach Gordon et al. (2005) und Rachakonda et al. (2017) liefern Oberflächen, die möglichst diffus reflektieren, die genauesten Messergebnisse. Durch Bearbeitungen, wie beispielsweise Sandstrahlen oder Lackieren, kann die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden. Muralikrishnan et al. (2017) schreiben, dass das Sandstrahlen von Aluminium zu einer scanfreundlichen, matten, grauen Oberfläche führt. Die Oberflächenbeschaffenheit hat ebenfalls Einfluss auf den Reflexionsgrad eines Zielzeichens.

Farbe

Die Oberflächenfarbe des Zielzeichens beeinflusst die zurückgestrahlten Intensitäten (Kersten et al. 2005, Zámcňková et al. 2014) und somit die zufälligen Abweichungen der Distanzmessung (Wujanz et al. 2017). Werden ebene Zielzeichen verwendet, muss die Farbe nicht nur zu einer genauen geometrischen

Erfassung des Zielzeichens führen, sondern auch die Bestimmung der Zielzeichenkoordinate anhand radiometrischer Informationen möglich machen. Das bedeutet, die Farbe des Musters muss einen ausreichend großen Intensitätskontrast aufweisen, um eine genaue Koordinatenbestimmung zu ermöglichen (siehe Kap. 3.1). Hierfür werden häufig die Farben weiß und schwarz gewählt.

Reflexionsgrad

Der Reflexionsgrad ist der Quotient aus reflektierter und eingestrahlter Intensität. Die zuvor genannten Eigenschaften (Material, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe) beeinflussen den Reflexionsgrad von Zielzeichen. Dieser wirkt sich wiederum auf die Qualität der Distanzmessung und auf die vom Scanner gemessenen Intensitäten aus. Ein hoher Reflexionsgrad führt zu höheren Intensitäten und daher zu genaueren Distanzmessungen (Zámcníková et al. 2014, Wujanz et al. 2017). Dies ist für die genaue geometrische Erfassung von Zielzeichen hilfreich. Es ist zu beachten, dass es sich bei dem Reflexionsgrad um eine Objekteigenschaft des Zielzeichens handelt (Zámcníková et al. 2014). Die tatsächlich reflektierte Energie hängt jedoch auch von der verwendeten Wellenlänge des Messstrahls ab.

Muster

Bei der Verwendung ebener Zielzeichen werden mittels der radiometrischen Informationen (Intensitäten) der Punktwolke die Koordinaten auf den Ebenen geschätzt. Hierbei wird mit Hilfe eines farblichen Musters der Referenzpunkt des Zielzeichens signalisiert. Bei fast allen kommerziellen Zielzeichen wird das sogenannte Schachbrettmuster verwendet. Aus Omidalizarandi et al. (2018) geht hervor, dass bei der Videotachymetrie andere Zielzeichenmuster zu genaueren Ergebnissen führen. Inwieweit ein anderes Zielzeichenmuster auch die Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten beim terrestrischen Laserscanning verbessert, ist bisher nicht bekannt.

4.2 Empirische Untersuchung zu verschiedenen Zielzeichen-designs

Um die Präzision der verschiedenen Zielzeichendesigns zu untersuchen, wird ein Versuchsaufbau analog zur Untersuchung der verschiedenen Algorithmen gewählt. Allerdings werden verschiedene Realisierungen von Zielzeichen gescannt. Aus den Wiederholungen kann dann eine Standardabweichung der Koordinatenschätzung für jedes untersuchte Zielzeichendesign berechnet werden.

Analyse der Präzision kommerzieller Zielzeichen

Mit der Leica ScanStation P20 (Auflösung 0,8 mm @ 10 m, Qualitätsstufe 1) werden sechs verschiedene Zielzeichen gescannt. Die untersuchten Zielzeichen sind ein Leica Tilt & Turn Target, ein auf Papier gedrucktes Zielzeichen, ein Kunststoff-Target, ein Zielzeichen der Fa. GeoOffice, ein Zielzeichen der Fa. Laserscanning Europe und ein Zielzeichen der Fa. Druckhaus Schwerte (Abb. 6).

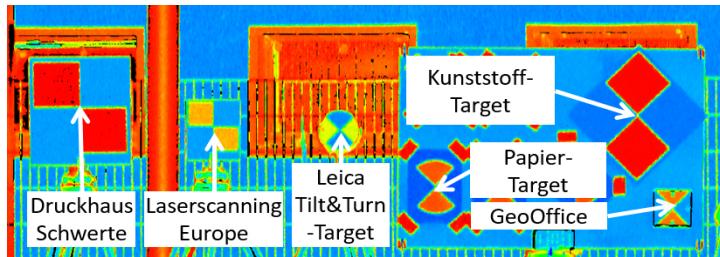


Abb. 6: Versuchsaufbau zur empirischen Bestimmung der Präzision verschiedener Zielzeichendesigns (Distanz: 35 m, Scanner: Leica ScanStation P20, Auflösung: 0,8 mm @ 10 mm)

Diese unterscheiden sich in Größe, Material, Oberflächenbeschaffenheit, Farbe und Reflexionsgrad. Die Zielzeichen werden, analog zu Kap. 3.2, bei acht Distanzen zwischen 5 m und 100 m gescannt. Für jede Distanz werden die Zielzeichen jeweils fünfmal wiederholt gescannt. Anschließend werden alle Koordinaten mit Hilfe des Algorithmus über Bildkorrelationen geschätzt. Aus den Koordinaten der Wiederholungsscans werden für jedes Zielzeichen die Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ in Abhängigkeit der Distanz berechnet. Sie sind in Abb. 7 dargestellt.

Aus Abb. 7 geht hervor, dass sowohl die Standardabweichung in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ als auch in Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ mit der Distanz ansteigen. Sie beträgt bei Messdistanzen von 100 m in Winkelrichtung etwa $\hat{\sigma}_w = 0,8 \text{ mm} \dots 1,5 \text{ mm}$ und in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r = 1,0 \text{ mm} \dots 3,5 \text{ mm}$. Es ist zu erkennen, dass die großen Zielzeichen zu einer präziseren Koordinatenschätzung in Distanzrichtung führen, als die kleineren Zielzeichen. Dies kann damit begründet werden, dass eine größere Anzahl an Punkten auf dem Zielzeichen liegt und somit mehr Punkte für die Ebenenschätzung zur Verfügung stehen.

Weitere Unterschiede zwischen den verschiedenen Zielzeichenrealisierungen sind nicht eindeutig aus den Daten zu entnehmen. Der Einfluss von Material, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe scheint daher geringer als angenommen.

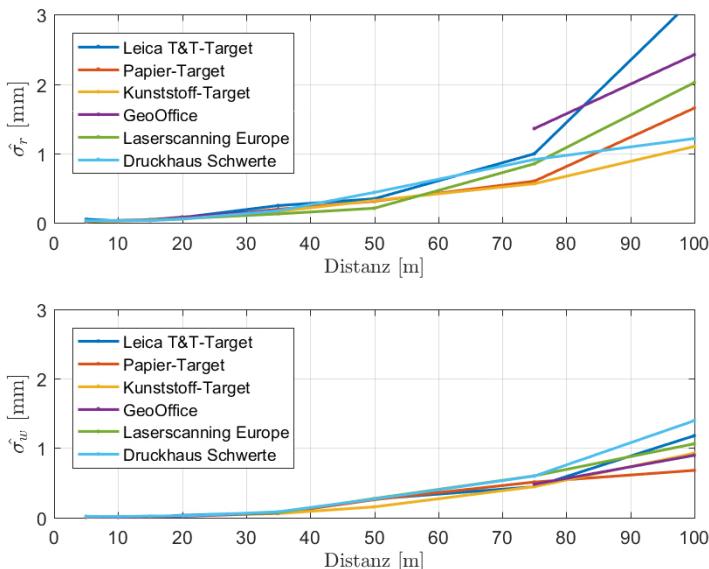


Abb. 7: Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ für verschiedene Zielzeichendesigns in Abhängigkeit der Messdistanz

Analyse der Präzision eines neu entwickelten Zielzeichens

Da kommerzielle Zielzeichen nur mit dem bekannten Schachbrettmuster erhältlich sind, wird am Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn ein eigenes Zielzeichen entwickelt (Janßen et al. 2018). Damit soll getestet werden, ob das Zielzeichenmuster einen Einfluss auf die Präzision der Zielzeichenkoordinate hat. Als neues Muster wird eine 8-fach-Teilung des Zielzeichens gewählt. Die Idee für dieses Muster basiert auf der Überlegung, dass mehr Schwarz-weiß-Übergänge im Zielzeichen zu einem eindeutigeren Korrelationsmaximum im Auswertealgorithmus führen und somit die Präzision der Koordinate verbessert wird. Auf Grundlage der bisher gewonnenen Erkenntnisse wird die Größe des Zielzeichens mit $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ relativ groß gewählt, um eine kleine Standardabweichung $\hat{\sigma}_r$ zu erreichen. Aus den theoretischen Überlegungen zum weiteren Zielzeichendesign wird als Material Aluminium gewählt und darauf geachtet, dass die Oberfläche möglichst diffus erscheint. Das so entwickelte Zielzeichen ist in Abb. 8 dargestellt.

Wie auch bei den bisherigen Untersuchungen wird das neue Zielzeichen bei neun verschiedenen Distanzen im Messbereich von 5 m bis 100 m mit der Leica ScanStation P20 (Auflösung 0,8 mm @ 10 m, Qualitätsstufe 1) mit jeweils fünf Wiederholungen gescannt. Anschließend werden mit dem Auswertealgorithmus

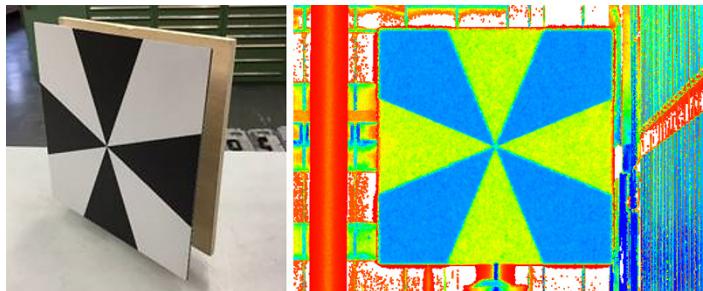


Abb. 8: Foto des neu entwickelten Zielzeichens (links) und Scan des neu entwickelten Zielzeichens (rechts)

über Bildkorrelationen alle Koordinaten geschätzt und aus den Wiederholungen die Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und in Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ berechnet. Die Ergebnisse werden mit dem Mittelwert aller Standardabweichung der Zielzeichen mit Schachbrettmuster aus [Abb. 7](#) verglichen. Die Standardabweichungen sind in [Abb. 9](#) dargestellt.

Wie aus den Ergebnissen eindeutig zu erkennen ist, konnte die Präzision der Koordinatenschätzung sowohl in Distanzrichtung als auch in Winkelrichtung verbessert werden. Die Standardabweichung in Distanzrichtung liegt bis

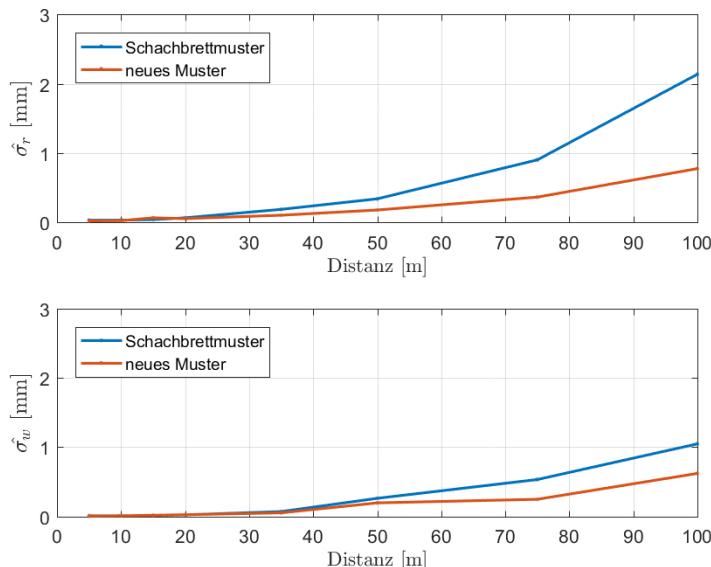


Abb. 9: Standardabweichungen in Distanzrichtung $\hat{\sigma}_r$ und Winkelrichtung $\hat{\sigma}_w$ für Zielzeichen mit Schachbrettmuster und Zielzeichen mit neuem Muster

100 m unterhalb von 1 mm, die Standardabweichung in Winkelrichtung beträgt 0,6 mm bei 100 m und ist somit bei langen Distanzen etwa 40 % kleiner als bei Verwendung eines Zielzeichens mit Schachbrett muster.

Eine detailliertere, hier nicht aufgezeigte, Analyse der Koordinaten der Zielzeichen lässt systematische Trends im Submillimeterbereich erkennen. Diese Systematiken stammen wahrscheinlich aus der nicht berücksichtigten Aufwärmphase des Laserscanners und sind auch der Grund dafür, weshalb die Standardabweichungen größer als in Kap. 3.1 ausfallen (siehe Abb. 5).

5 Anwendungsfall: Wie genau ist die Registrierung?

Anhand eines Anwendungsbeispiels soll gezeigt werden, welche Genauigkeiten in der Registrierung mit Hilfe von Herstellerzielzeichen und -software sowie mit aktuellen universitären Entwicklungen erreicht werden. Als Anwendungsbeispiel dienen Überwachungsscans der Staumauer der Brucher-Talsperre in Marienheide. Die Brucher-Talsperre (Abb. 10 links) hat eine Kronenlänge von 200 m, eine Höhe von etwa 20 m und wird vom Wupperverband betrieben.

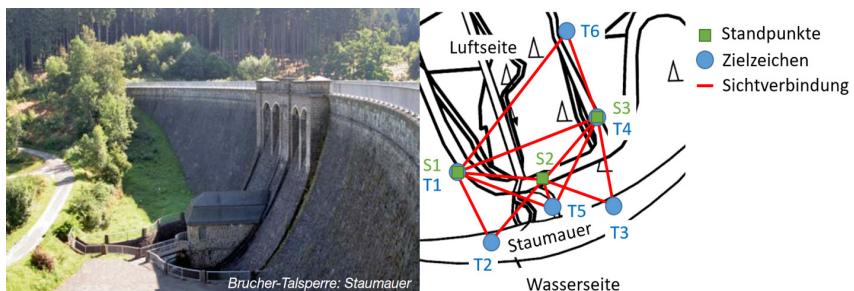


Abb. 10: Foto von der Staumauer der Brucher-Talsperre (links; Wupperverband 2018) und Messkonfiguration der Überwachungsmessung mittels Laserscanner (rechts)

5.1 Datenaufnahme

Die hier verwendeten Scans wurden im März 2018 aufgenommen. Zur Daten erfassung wurden die Leica ScanStation P40 und die dazu empfohlenen Tilt & Turn Targets verwendet. Aufgrund der Größe der Talsperre muss bei Überwachungsmessungen von drei Standpunkten gescannt werden. Zur Registrierung werden sechs Zielzeichen verwendet. Zwei Zielzeichen werden auf der Staumauerkrone positioniert, ein Zielzeichen mittig unten vor der Staumauer und drei Zielzeichen auf Messpfeilern des Wupperverbandes, welche schon seit vielen

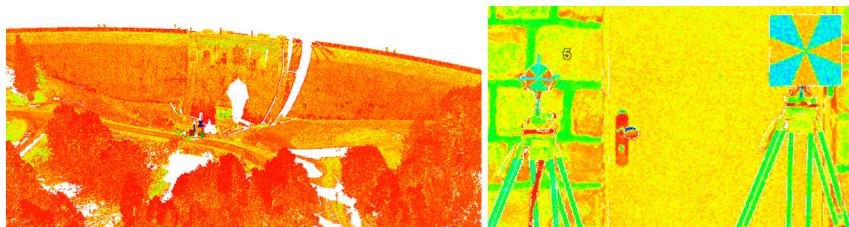


Abb. 11: Punktfolke der Staumauer vom zweiten Standpunkt (links) und Punktfolke mit Leica Tilt & Turn Target und neu entwickeltem Zielzeichen (rechts)

Jahren für tachymetrische Überwachungsmessungen der Staumauer genutzt werden. Abb. 10 (rechts) zeigt eine Aufsicht der Messkonfiguration mit eingezeichneten Standpunkten des Scanners und Positionen der Zielzeichen. Die Punktfolke des zweiten Standpunktes ist in Abb. 11 (links) zusehen.

Um die Registrierung mit Herstellerzielzeichen und den in Kap. 4 beschriebenen neuen Zielzeichen vergleichen zu können, werden direkt neben den Messpfeilern und Stativen mit Tilt & Turn-Zielzeichen Stative mit den neuen Zielzeichen platziert (Abb. 11 rechts). Die Anordnung der Zielzeichen sowohl für die Herstellerzielzeichen als auch für die neu entwickelten Zielzeichen ist somit nahezu identisch. Unterschiede in der Registriergenauigkeit sind daher nicht auf die Messkonfiguration zurückzuführen.

5.2 Analyse der Registrierung

Zur Registrierung der drei Standpunkte werden zum einen die Koordinaten der Herstellerzielzeichen mit Hilfe der Herstellersoftware Leica Cyclone geschätzt, zum anderen werden die Koordinaten der neuen Zielzeichen mit dem in Kap. 4 beschriebenen Auswertealgorithmus über Bildkorrelationen geschätzt.

Die geschätzten Koordinatensets werden anschließend separat voneinander registriert. Die vier geschätzten Parameter der Transformation von Standpunkt 2 zu 1, sowie die vier Parameter von Standpunkt 2 zu 3 sind in Tab. 1 zu finden.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, unterscheiden sich die Parameter der Herstellerlösung und der universitären Lösung im Bereich weniger Millimeter und Milligrad. Die Unterschiede der translatorischen Parameter in z-Richtung fallen mit fast einem Zentimeter etwas größer aus. Da keine Soll-Transformationen vorliegen, kann keine Beurteilung stattfinden, welche Registrierparameter richtiger sind. Dennoch liefern die Differenzen einen ersten Eindruck, in welcher Größenordnung sich die dargestellten Unterschiede von Zielzeichendesign und Algorithmus auswirken.

Als Gütekriterium der Registrierung wird die mittlere, absolute Abweichung (Mean Absolute Error) sowohl der Herstellerlösung als auch der universitären

Tab. 1: Transformationsparameter der Registrierung mittels Herstellerlösung und mittels der universitären Lösung für den Anwendungsfall Brucher-Talsperre

Transformationsparameter	Herstellerlösung	Universitäre Lösung	Differenz
Standpunkt 2 zu 1			
$t_{x,21}$	-26,202 m	-26,205 m	+3 mm
$t_{y,21}$	31,040 m	31,041 m	-1 mm
$t_{z,21}$	-0,010 m	-0,017 m	+7 mm
α_{21}	124,182°	124,183°	-0,001° = -3,6"
Standpunkt 2 zu 3			
$t_{x,23}$	44,180 m	44,179 m	+1 mm
$t_{y,23}$	-7,201 m	-7,199 m	-2 mm
$t_{z,23}$	2,228 m	2,219 m	+9 mm
α_{23}	113,587°	113,588°	-0,001° = -3,6"

Lösung berechnet. Der Wert für die Herstellerlösung ist mit 4 mm doppelt so groß wie der Wert der universitären Lösung mit 2 mm. Daraus folgt, dass durch den Einsatz der neuen Zielzeichen und des in Kap. 4 beschriebenen Auswertealgorithmus nicht nur die Präzision der Koordinatenschätzung verbessert werden kann, sondern auch die Registrierung selbst verbessert wird.

6 Zusammenfassung

Wie in Kap. 2 erläutert, hängt die Genauigkeit der zielzeichenbasierten Registrierung von Laserscans zum einen von der Messkonfiguration und zum anderen von der Genauigkeit der Zielzeichenkoordinaten ab. Da der Einfluss der Genauigkeit der Messkonfiguration bereits aus der geodätischen Netzanalyse bekannt ist, konzentrierte sich dieser Beitrag auf die Genauigkeitsanalyse der Zielzeichenkoordinaten. Für diese Analyse wurden Verfahren der Koordinatenabschätzung sowie verschiedene Zielzeichendesigns in Bezug auf ihre Präzision untersucht.

Kap. 3 analysierte die Standardabweichungen von drei verschiedenen Auswertealgorithmen und verglich diese mit den Standardabweichungen aktueller Herstellersoftware. Die Koordinatenschätzung mittels Bildkorrelationen erreichte dabei die kleinsten Standardabweichungen $\hat{\sigma}_r < 2,5$ mm und $\hat{\sigma}_w < 1''$ für Messdistanzen bis 100 m. Die Präzision ist damit deutlich höher als vorher

aufgrund der Herstellerangaben angenommen wurde. Es zeigt sich zudem, dass diskrete Punkte mit Hilfe von Zielzeichen sehr präzise vermarktet werden können.

In Kap. 4 wurden sechs kommerzielle Zielzeichendesigns bezogen auf die Präzision ihrer Koordinaten untersucht. Hierbei fielen die Unterschiede insgesamt kleiner aus als bei der Untersuchung verschiedener Algorithmen. Selbst mit einem Papierzielzeichen, welches mit einem handelsüblichen Laserstrahldrucker gedruckt wurde, konnte eine Präzision ähnlich der von kommerziell erhältlichen Zielzeichen erreicht werden. Ist eine genaue Ausrichtung des Zielzeichens zum Scanner nicht notwendig, stellt das Papierzielzeichen eine kostengünstige Alternative zu Zielzeichen verschiedener Herstellern dar.

Durch das in Kap. 4.2 neu entwickelte Zielzeichen mit 8-fach-Teilung konnte die Präzision um bis zu 40 % gegenüber den Zielzeichen mit Schachbrett muster gesteigert werden. Mit dem neuen Zielzeichen konnten Standardabweichungen $\hat{\sigma}_r < 1 \text{ mm}$ und $\hat{\sigma}_w < 0,5 \text{ mm}$ erreicht werden.

Es ist anzumerken, dass sich die konkreten Zahlen allein auf die Messung mit der Leica ScanStation P20 (Auflösung 0,8 mm @ 10 m, Qualitätsstufe 1) beschränken. Die prinzipiellen Erkenntnisse zum Vergleich der Algorithmen und der Zielzeichendesigns sind jedoch auch auf andere Laserscanner übertragbar.

Der Vergleich der Registrierung mit Hilfe von Herstellerzielzeichen und -software und mit Hilfe der neu entwickelten Zielzeichen in Kombination mit der Koordinatenschätzung mittels Bildkorrelationen zeigt, dass Registrierungen im Millimeterbereich möglich sind. Dies geht aus dem Vergleich der Transformationsparameter hervor. Die mittlere absolute Abweichung der Registrierung konnte in dem Anwendungsfall durch den Einsatz der neuen Zielzeichen in Verbindung mit der Schätzung über Bildkorrelationen gegenüber der Herstellerlösung von 4 mm auf 2 mm halbiert werden.

Literatur

- Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. In: Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures. Vol. 1611, 586–607. International Society for Optics and Photonics.
- Canny, J. (1986): A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, (6), 679–698.
- Chow, J. C. K.; Teskey, W. F.; Loves, J. (2011): In-situ self-calibration of terrestrial laser scanners and deformation analysis using both signalized targets and intersection of planes for indoor applications. In: 14th FIG Symposium on Deformation Measurements and Analysis, 5th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, and 2nd International Workshop on Spatial Information Technologies for Monitoring the Deformation of Large-Scale Man-Made Linear Features, Hong Kong, China, November 2–4, 2–16.

- Ge, X.; Wunderlich, T. (2015): Target identification in terrestrial laser scanning. *Survey Review*, 47 (341), 129–140.
- Gielsdorf, F. (2013): Neue Wege bei der Registrierung von Scans. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2013 (TLS 2013)*. DVW-Schriftenreihe, Band 72, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Gordon, S.; Davies, N.; Keighley, D.; Lichti, D.; Franke, J. (2005): A rigorous rangefinder calibration method for terrestrial laser scanners. *Journal of spatial science*, 50(2), 91–96.
- Held, C.; Fröhlich, C.; Mettenleiter, M.; Pritchard, D. (2017): New Workflows for the TLS Documentation of Cultural Heritage Sites on the Example of World Wide Projects. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017)*. DVW-Schriftenreihe, Band 88, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Holst, C.; Klingbeil, L.; Esser, F.; Kuhlmann, H. (2017) Using point cloud comparisons for revealing deformations of natural and artificial objects. 7th International Conference on Engineering Surveying (INGEO), 18–20 October 2017, Lisbon, Portugal.
- Janßen, J.; Medić, T.; Kuhlmann, H.; Holst, C. (2018) Decreasing uncertainty of target centre estimation at terrestrial laser scanning by choosing best algorithm and by improving target design. *Remote Sensing* (in preparation).
- Kersten, T. P.; Mechelke, K.; Lindstaedt, M.; Sternberg, H. (2009): Methods for geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanning systems. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 2009 (4), 301–315.
- Koch K.-R. (1987): Parameter estimation and hypothesis testing in linear models. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
- Kregar, K.; Grigillo, D.; Kogoj, D. (2013): High precision target center determination from a point cloud. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II (5/W2), 139–144.
- Kuhlmann, H.; Holst, C. (2016). Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning: Messtechnik, flächenhafte Modellierungen und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscannings. In: Freedon, W.; Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie*: 5 Bände, Springer, Berlin Heidelberg, 1–46.
- Lichti, D.; Brustle, S.; Franke, J. (2007): Self-calibration and analysis of the surphaser 25hs 3d scanner. Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, FIG Working Week, Hong Kong, China, 1317.
- Muralikrishnan, B.; Rachakonda, P.; Shilling, M.; Lee, V.; Blackburn, C.; Sawyer, D.; Cheok, G.; Cournoyer, L. (2016): Report on the May 2016 ASTM E57.02 instrument runoff at NIST, Part 1 – Background information and key findings, Nr. 8152. National Institute of Standards and Technology, Interagency/Internal Report.
- Muralikrishnan, B.; Rachakonda, P.; Lee, V.; Shilling, M.; Sawyer, D.; Cheok, G.; Cournoyer, L. (2017): Relative range error evaluation of terrestrial laser scanners using a plate, a sphere, and a novel dual-sphere-plate target. *Measurement*, 111, 60–68.
- Niemeier, W. (2008): *Ausgleichungsrechnung. Statistische Auswertemethoden*. Berlin: de Gruyter, 2. Auflage.
- Omidalizarandi, M.; Paffenholz, J. A.; Neumann, I. (2018): Automatic and accurate passive target centroid detection for applications in engineering geodesy. *Survey Review*, 1–16.

- Paffenholz, J. A.; Alkhatab, H.; Kutterer, H. (2010): Direct geo-referencing of a static terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Geodesy*, 4 (3), 115–126.
- Pelzer, H.; Hrsg. (1980): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung. Band 1, Kontaktstudium 1979. Wittwer.
- Pilhatsch, M.; Müller, F.; Riegel, K.; Effkemann, C. (2015): 3D-Laserscanning des Bonner Münster. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015). DVW-Schriftenreihe, Band 81, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Rachakonda, P.; Muralikrishnan, B.; Shilling, M.; Cheok, G.; Lee, V.; Blackburn, C.; Everett, D.; Sawyer, D. (2016): Targets for relative range error measurement of 3d imaging systems. In: Proceedings of the CMSC.
- Rachakonda, P.; Muralikrishnan, B.; Cournoyer, L.; Cheok, G. S.; Lee, V.; Shilling, M.; Sawyer, D. (2017): Methods and considerations to determine sphere center from terrestrial laser scanner point cloud data. *Measurement Science and Technology*.
- 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, 131. Jg., 96–103.
- Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Menenti, M.; Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (4), 389–399.
- Ullrich, A.; Fürst, C. (2017): Vollautomatisierter Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2017 (TLS 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 88, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125, 146–155.
- Wujanz, D.; Schaller, S.; Gielsdorf, F.; Gründig, L. (2018): Plane-based registration of several thousand laser scans on standard hardware. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42 (2).
- Wupperverband (2018): [www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/414A5415997A9A6BC1257AAF0044B256/\\$file/2012_flyer_brucher_lingese_tsp_web.pdf](http://www.wupperverband.de/internet/mediendb.nsf/gfx/414A5415997A9A6BC1257AAF0044B256/$file/2012_flyer_brucher_lingese_tsp_web.pdf), letzter Zugriff 10/2018.
- Zámcníková, M.; Wieser, A.; Woschitz, H.; Ressl, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 311–326.

Kontakt

Jannik Janßen | Dr.-Ing. Christoph Holst | Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann
Universität Bonn, Institut für Geodäsie und Geoinformation
Nussallee 17, 53115 Bonn
j.janssen@igg.uni-bonn.de
c.holst@igg.uni-bonn.de
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Ebenenbasierte Registrierung von mehreren Tausend Laserscans

Daniel Wujanz | Sandro Schaller | Frank Gielsdorf | Lothar Gründig

1 Einführung

Terrestrische Laserscanner (TLS), deren Messungen zu Punktwolken führen, sind eine etablierte Methode zur Erfassung von 3D-Informationen für verschiedene Interessengebiete wie zum Beispiel Forstwirtschaft (Maas et al. 2008), As-built-Dokumentation (Tang et al. 2010) oder Archäologie und Denkmalpflege (Kersten 2007). Die erste Aufgabe nach der Datenerfassung ist die Transformation mehrerer Punktwolken in ein gemeinsames Bezugssystem, da jeder Laserscan in einem lokalen Koordinatensystem erfasst wird. Im Allgemeinen können zwei Strategien angewendet werden, um Transformationsparameter zwischen den Koordinatensystemen zu bestimmen, entweder der georeferenzierte (Scaioni et al. 2013) oder der Co-Registrierungsansatz (Grant et al. 2012). Die Besonderheit des ersten Verfahrens besteht darin, dass der gemeinsame Koordinatenrahmen durch ein übergeordnetes Referenzkoordinatensystem beschrieben wird, das durch zusätzliche geodätische Beobachtungen festgelegt wird (Paffenholz et al. 2010, Reshetyuk 2010). Ein Nachteil dieser Strategie ist unter anderem, dass weitere geodätische Sensoren benötigt werden, die das Fehlerbudget von TLS erweitern (Soudarissanane et al. 2007, Wujanz et al. 2017). Die zweite Methodik, die auch als Registrierung oder Matching bezeichnet wird, arbeitet ausschließlich auf Grundlage der erfassten Daten und stellt somit ein größeres Potenzial hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit bereit, da das Fehlerbudget auf einen Sensor – nämlich das TLS – beschränkt ist.

Bisher wurde die Transformation in ein Referenzkoordinatensystem vorzugsweise mit Hilfe künstlicher Zielmarken durchgeführt. Diese Strategie bringt jedoch mehrere Nachteile mit sich, wie z. B. (i) der Aufwand für die Verteilung der Zielmarken im Objektraum und (ii) die begrenzte Reichweite der Ziele innerhalb des Untersuchungsgebiets. Nach dem geodätischen Prinzip „Vom Großen ins Kleine“ sollten entsprechende Punkte das Untersuchungsgebiet umgeben. Ist dies nicht der Fall, muss mit Extrapolationseffekten gerechnet werden, die das Ergebnis verfälschen. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Referenzierung von Punktwolken, die sich wie folgt einteilen lassen:

- Registrierung basierend auf radiometrischen Merkmalen
- Oberflächenbasierte Registrierung
- Verwendung von geometrischen Primitiven

Radiometrisch motivierte Registrierungsstrategien haben den Vorteil, dass sie den Zugang zu etablierten Techniken aus dem Bereich des Bildmatching ermöglichen. Um dies zu erreichen, werden die Punktwolken in Intensitätsbilder umgewandelt, in denen Feature-Punkte extrahiert werden. Basierend auf so genannten Feature-Deskriptoren können Korrespondenzen und damit Transformationsparameter berechnet werden (Böhm und Becker 2007). Die Deskriptoren werden jedoch durch Verzerrungen im Bildmaterial als Folge des polaren Abtastverfahrens beeinflusst. Houshiar et al. (2015) schlagen eine Lösung vor, die Kartenprojektionen einsetzt, um den oben genannten Effekt zu reduzieren.

Eine sehr verbreitete Methode der Registrierung ist der Iterative Closest Point Algorithmus (ICP), wie von Besl und McKay (1992) vorgeschlagen, der zur Familie der oberflächenbasierten Ansätze gehört. Der ICP bildet iterativ Punktkorrespondenzen im Überlappungsbereich zwischen zwei Punktwolken, aus denen Transformationsparameter berechnet werden. Anschließend werden die Transformationsparameter auf eine der Punktwolken angewendet, die in der Regel die relative Ausrichtung zwischen den Datensätzen verbessert. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Ein Nachteil dieses Algorithmus ist seine Abhängigkeit von einer ausreichenden Vorausrichtung der beiden Datensätze. Um das Problem einer Vorausrichtung der Punktwolken zufriedenstellend zu lösen, eignen sich mehrere Strategien wie die bereits zuvor genannte direkte Georeferenzierung oder die Anwendung von Vorausrichtungsalgorithmen (Aiger et al. 2008).

Abgesehen von den oben genannten Verfahren, können geometrische Informationen auch in Form von geometrischen Primitiven, wie z. B. Kanten (Lichtenstein und Benning 2009) oder Ebenen, verwendet werden.

Diese Strategie ist den zuvor genannten überlegen, da sie (i) die Gesamtgenauigkeit verbessert, indem ausgeglichene Ebenen als Eingangsgröße für die Berechnung von Transformationsparametern anstelle von einzelnen Punkten verwendet werden und da (ii) Ebenenparameter gegenüber unterschiedlichen Punktverteilungen im Objektraum nahezu invariant sind. Der zuletzt genannte Aspekt führt bei oberflächenbasierten Registrierungsmethoden zu dem Problem, dass sich das Fehlerbudget in direkter Abhängigkeit zur lokalen Punktauflösung erhöht. Ein Argument, welches für die Verwendung von ebenenbasierten Registrierungsansätzen in der Erfassung von Gebäuden spricht, ist, dass Ebenen bei den meisten Bauwerken die vorherrschende geometrische Form sind.

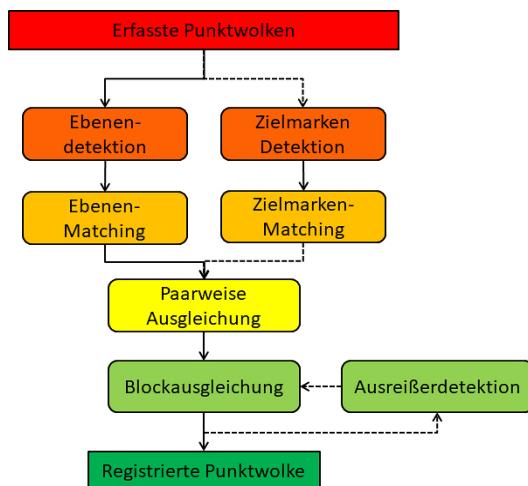
Die Idee, extrahierte Ebenen anstelle von Punkten aus Laserscans zu verwenden, wurde von Gielsdorf et al. (2004) im Rahmen der TLS-Kalibrierung eingeführt. Spätere Beiträge aus derselben Forschungsgruppe stellten eine erste Implementierung einer ebenenbasierten Registrierung vor (Rietdorf 2005). Diese Ansätze fanden schließlich Eingang in die Entwicklung von Scantra (technet 2018), einer kommerziellen Software, die in diesem Beitrag eingesetzt wurde.

Dold und Brenner (2006) schlugen einen zweistufigen ebenenbasierten Registrierungsalgorithmus vor, der Ebenen und visuelle Informationen, die von einer TLS-internen Kamera erfasst werden, nutzt. Bosché (2012) schlägt eine halb-automatische Registrierung auf Basis von Ebenen vor, um erfasste Scans in das geodätische Datum eines gegebenen 3D-Modells, zum Beispiel ein Building Information Model (BIM) zu transformieren. Previtali et al. (2014) schlugen eine ebenenbasierte Registrierung vor, bei der alle Beobachtungen gleich gewichtet wurden, eine Annahme, die in der Praxis typischerweise nicht zutrifft. Förstner und Khoshelham (2017) beschreiben mehrere Strategien, um das zuvor genannte Problem zu überwinden.

Vergleicht man typische Anwendungsbereiche des TLS, z.B. Forstwirtschaft, Geowissenschaften, Kulturerbe oder Bestandsdokumentation von Gebäuden, kann man daraus schließen, dass die letztgenannte Kategorie die größte Menge an Standpunkten erfordert, um das jeweilige Objekt vollständig abzudecken. Dies ist durch die Größe von Gebäuden sowie begrenzte Sichtweiten bedingt. Folglich entstehen in der Regel große Datensätze im Rahmen der Dokumentation von Industrieanlagen oder Hochhäusern, welche die Grenze von mehr als 1000 Scans leicht überschreiten. Projekte dieser Größe stellen noch immer eine methodische Hürde für kommerzielle und wissenschaftliche Registrierungssoftware dar. Dieses Problem ist auf zweifache Weise herausfordernd. Zum einen benötigen die erfassten Punktwolken große Mengen an Primärspeicher, zum anderen stellen die Algorithmen zur Verarbeitung der Daten hohe Anforderungen an den Arbeitsspeicher (RAM). Józków (2017) stellte daher ein Kompressionsschema vor, das die Anforderungen an den Primärspeicher reduziert. Diese Lösung ist jedoch eher für die Archivierung als für die Verarbeitung geeignet, da die Daten vorher dekomprimiert werden müssen. Hullo (2016) verwendete einen zielmarkenbasierten Ansatz, um ein Netz aus ca. 1000 Laserscans zu registrieren. Diese Vorgehensweise ist wie bereits erwähnt sehr zeitaufwendig und kann daher nicht als praktische Lösung für Projekte angesehen werden, die aus mehreren tausend Scans bestehen. Daraus resultierte die Motivation, eine Strategie zu entwickeln, die es ermöglicht, große Projekte mit mehreren tausend Scans mit höchster Präzision auf Standardhardware zu registrieren.

2 Scantra – ebenenbasierte Registrierung von terrestrischen Laserscans

Das Flussdiagramm der verwendeten Software Scantra ist in Abb. 1 dargestellt. Datensätze werden durch Rechtecke hervorgehoben, während Datenoperationen durch Rechtecke mit runden Kanten dargestellt werden. Der Prozess beginnt mit dem Import von Punktwolken, die unstrukturiert oder strukturiert sein können.

**Abb. 1:** Flussdiagramm von Scantra

in ein übergeordnetes Koordinatensystem erforderlich sind. Nachdem Korrespondenzen zwischen den einzelnen Ebenen ermittelt wurden, werden Transformationsparameter zwischen Paaren von Punktwellen bestimmt, wie in Kap. 2.2 erläutert wird. Abschließend wird eine Blockausgleichung durchgeführt, die es optional ermöglicht, etwaige Fehler zu erkennen.

2.1 Ebenen-Detektion

Der erste Schritt des Algorithmus ist die Erkennung von Ebenen innerhalb der nicht registrierten Punktwellen. Diese Aufgabe ist die erste Schlüsselkomponente von Scantra, die den Speicherbedarf drastisch reduziert, da im Ergebnis nur Ebenenparameter und deren stochastische Eigenschaften entstehen. Etablierte Segmentierungstechniken wie etwa Region growing (Rabbani et al. 2006) oder RANSAC (Yang und Förstner 2010) versuchen meist, das Problem der Ebenen-Detektion im 3D-Raum zu lösen. Im Gegensatz dazu arbeitet Scantra im 2D-Raum. Hierzu werden die Punkte der Punktwellen in einen Baum eingefügt welcher anschließend alternierend entlang der Komponenten φ und θ halbiert wird. Der Zerlegungsprozess wird fortgeführt bis entweder in den betreffenden Teilbaum eine Ebene gefüttet werden kann oder aber ein Abbruchkriterium für die Unterteilung erreicht ist. Das Ergebnis ist ein Satz von Ebenen (ca. 500 bis 1200 pro Scan), die in der Projektdatenbank abgelegt werden.

Für den weiteren des Registrierungsprozess sind die ursprünglichen Punktwellen nicht erforderlich und werden daher nicht in den RAM geladen. Jede

Im nächsten Schritt werden bei jedem Scan Ebenen detektiert. Dieser Prozess wird in Kap. 2.1 näher erläutert. Da jeder Scan in einem eigenen lokalen Koordinatensystem gegeben ist, beziehen sich die resultierenden Ebenenparameter auf dieses lokale System. Optional können in den Punktwellen Zielmarken erkannt werden, die in Abb. 1 durch gestrichelte Linien hervorgehoben wurden, die zum Beispiel für die Transformation aller Punktwellen

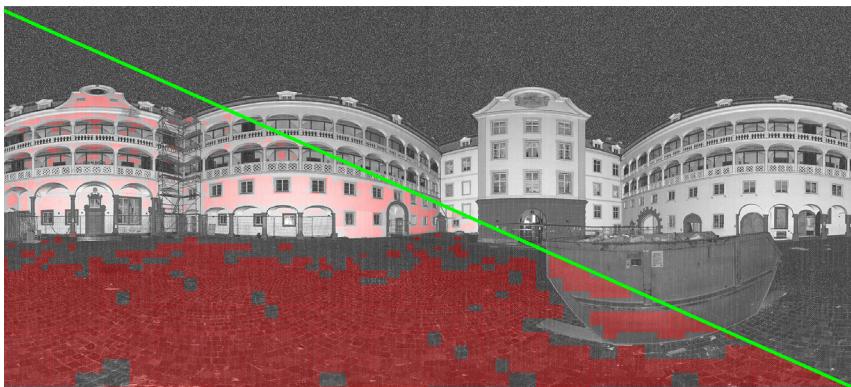


Abb. 2: Intensitätsbild (oben rechts) mit detektierten Ebenen (rot eingefärbt, unten links)

Ebene erhält individuelle stochastische Eigenschaften in Form einer Kovarianzmatrix, die sich aus der Ebenenausgleichung ergibt. Diese Eigenschaften werden konsequent durch den Algorithmus geführt und haben somit einen Einfluss auf das Ergebnis. Die obere rechte Hälfte von Abb. 2 zeigt das Intensitätsbild basierend auf einem Scan mit 15.590.848 Punkten des Rathaushofes. In der linken unteren Hälfte werden planare Segmente durch rot getönte Bereiche hervorgehoben, die vom Algorithmus erkannt wurden. Insgesamt wurden 1200 Ebenen entdeckt.

2.2 Ebenen-Matching und paarweise Ausgleichung

Anschließend müssen Ebenen-Korrespondenzen zwischen Paaren von Standpunkten berechnet werden. Dazu werden geometrische Deskriptoren verwendet, die gegenüber dem individuellen geodätischen Datum der gegebenen Ebenen invariant sind (z.B. Dold 2006). Informationen über Nachbarschaften zwischen Punktwolken können entweder manuell oder durch Messung der relativen Position von Standpunkten definiert werden (Zoller + Fröhlich 2018). Abb. 3 veranschaulicht ein Beispiel bestehend aus fünf auf einer Baustelle aufgenommenen Scans, die durch schwarze Kreise dargestellt sind. Graue Pfeile kennzeichnen Nachbarschaften zwischen zwei Scans. Die Lage der Kreise ist zu diesem Zeitpunkt nicht relevant, da sie nur die topologischen Beziehungen zwischen den Scans definieren. Die Beziehung zwischen Scan 2 und 3 ist in der Abbildung nicht sichtbar, da diese durch die Beziehungen zwischen 3-4 und 2-4 verdeckt ist.

Für alle in Abb. 4 dargestellten Beziehungen wird eine erste Ausgleichung berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Nach der paarweisen Ausgleichung der Transformationsparameter auf Grundlage korrespondierender Ebenen ist

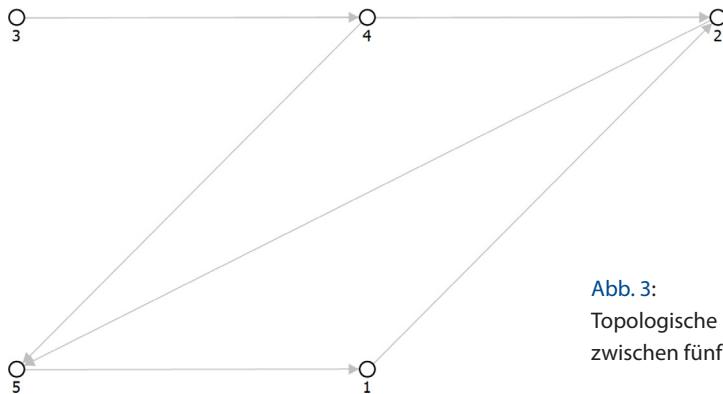


Abb. 3:
Topologische Beziehungen
zwischen fünf Scans

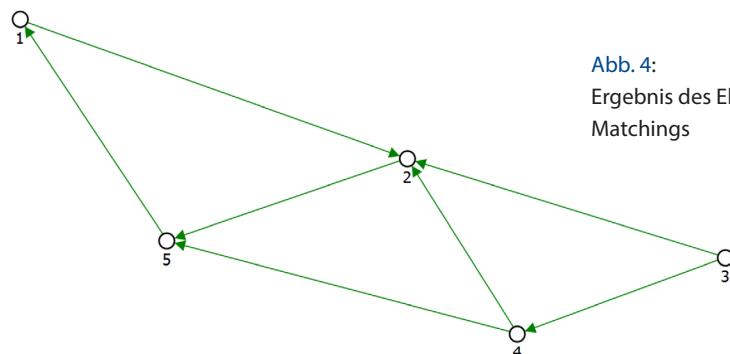


Abb. 4:
Ergebnis des Ebenen-
Matchings

die Farbe der Pfeile grün geworden, was bedeutet, dass die Standardabweichung aller translatorischen Komponenten σ_t gleich oder kleiner als 1 mm ist. Darüber hinaus wurde die Position der Kreise entsprechend den geschätzten Transformationsparametern aktualisiert.

Eine numerische Übersicht ist in Tab. 1 dargestellt, wobei die erste Spalte Paare von Scans bezeichnet. Die zweite Spalte enthält die Standardabweichungen der translatorischen Komponenten σ_t , während die dritte Spalte die Qualitätsmaße der Rotationen σ_φ beinhaltet.

Tab. 1: Ergebnis des Ebenen-Matchings

	σ_t [mm]	σ_φ [rad]	Anzahl an Korrespondenzen
1-2	0,5	0,0027	386
1-5	0,2	0,0024	563
2-3	0,3	0,0031	437
2-4	0,2	0,0032	646
2-5	0,2	0,0029	568
3-4	0,2	0,0030	609
4-5	0,5	0,0075	370

2.3 Blockausgleichung

Der Registrierungsprozess wird durch eine Blockausgleichung abgeschlossen, welche die relative Position und Ausrichtung aller Laserscans auf Basis redundant erfasster Bereiche optimiert. Optional kann ein Fehlererkennungsalgorithmus gestartet werden, der den Benutzer bei der Identifizierung und Behebung eventuell aufgetretener Fehler unterstützt. Das Ergebnis des Algorithmus ist eine registrierte Punktwolke mit Qualitätsmaßen aus der Blockausgleichung.

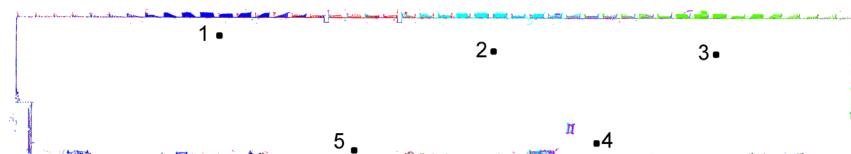


Abb. 5: Horizontalschnitt durch die registrierte Punktwolke

Für den gegebenen Fall ergibt der Globaltest einen σ_0 -Wert von 1,04, was den Schluss zulässt, dass keine Ausreißer vorhanden waren und dass sowohl das angenommene funktionale als auch das stochastische Modell zutreffend waren. Ein weiterer Vorteil der ebenenbasierten Registrierung ist das wesentlich geringere Datenvolumen im Vergleich zu Ansätzen, die auf Punktwolken arbeiten. Für das angegebene Beispiel beläuft sich der belegte Speicher auf der Festplatte auf 215 MB für die Originalscans, während die Scantra-Datenbank lediglich 1,7 MB benötigt. Abb. 5 zeigt einen Horizontalschnitt durch die registrierte Punktwolke, bei der die von verschiedenen Standpunkten erfassten Punkte unterschiedlich eingefärbt wurden. Die entsprechenden Standpunkte werden durch nummerierte Punkte hervorgehoben.

3 Datenerfassung und -verarbeitung

Das Rathaus erstreckt sich über eine Grundfläche von mehr als $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ und umfasst insgesamt $56,750 \text{ m}^2$. Die vertikale Ausdehnung reicht von -15 m bis 85 m und ist in 13 Ebenen gegliedert. Die innere Struktur des Komplexes ist durch sechs Innenhöfe bestimmt. Insgesamt verfügt das Gebäude über 1250 Räume, die durch Gänge mit einer Gesamtlänge von $\sim 2000 \text{ m}$ verbunden sind. Ein Orthofoto der Frontfassade ist in Abb. 6 zu sehen.

In der Planungsphase des Projekts wurde ein Zeitraum von mehreren Monaten für die Datenerfassung geschätzt. Daher war es nicht möglich, künstliche Zielmarken im Gebäude zur Registrierung anzubringen, da sie an den



Abb. 6: Orthofoto der Frontfassade des Rathauses

(Bild mit freundlicher Genehmigung von Z&M 3D Welt)

Wochenenden hätten entfernt werden müssen – eine Aufgabe, die zusätzliche Arbeit verursacht hätte. Außerdem hat die Praxis gezeigt, dass eine beträchtliche Anzahl von Zielen von Besuchern oder Mitarbeitern entfernt wird, die von den laufenden Vermessungsarbeiten nichts wissen. Diese Aspekte führten schließlich zu der Entscheidung, im Rahmen dieses Projekts im Lichte der in Kap. 1 dargelegten Vorteile die ebenenbasierte Registrierung anzuwenden. Darüber hinaus forderte der Auftraggeber ausdrücklich die Möglichkeit, den entstehenden Datensatz in Zukunft im Rahmen regelmäßiger Vermessungsarbeiten, z. B. nach Bauarbeiten, zu aktualisieren. Diese Anforderung kann durch die Nutzung vorhandener Flächen des Gebäudes erfüllt werden.

3.1 Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgte in einem Zeitraum von ca. vier Monaten hauptsächlich mit einem Zoller + Fröhlich IMAGER 5010X. Für einen 200 Meter langen Korridor wurde ein FARO Focus 3D X130 HDR verwendet, der auf einer Roboterplattform montiert wurde. Diese Plattform war im Keller des Rathauses erforderlich, wo sehr schmale und niedrige Flure (mit einer Höhe von ca. 1,3 m) erfasst werden mussten. Daher mussten sowohl Zoller + Fröhlich-Dateien im zfs-Format als auch Daten im fls-Format von FARO in Scantra verarbeitet



Abb. 7:
Erfassung einer
Fassade

werden. Insgesamt wurden 6686 Scans erfasst, von denen 95 % Farbscans waren, die zusätzlich RGB-Informationen für Punkte enthielten. Das Datenvolumen der Scans erforderte ~700 GB Speicherplatz. Abb. 7 zeigt einen der eingesetzten Scanner bei der Datenerfassung der Fassade.

3.2 Datenverarbeitung

Die Verarbeitung der erfassten Daten dauerte etwa zwei Monate und wurde mit Scantra 2.2 (technet 2018) durchgeführt. Aus organisatorischen Gründen wurde die Registrierung in zwei Teile aufgeteilt, während der größere Teil 4853 Scans enthält, die für den Rest dieses Beitrags diskutiert werden. Alle genannten Verarbeitungszeiten beziehen sich auf den verwendeten Standardrechner, der mit vier Rechenkernen (3,07 GHz) und 12 GB RAM ausgestattet war. Ein wichtiger und zeitaufwendiger Teil im Zusammenhang mit der Handhabung großer Datensätze ist die korrekte Dokumentation bereits verarbeiteter Daten. Aus diesem Grund wurde ein browserbasierter Viewer verwendet, der es ermöglicht, alle verarbeiteten Standpunkte einschließlich relevanter Metadaten darzustellen.

Der allererste Schritt nach der Datenerfassung war die Ebenen-Detektion, die so eingestellt wurde, dass pro Scan ca. 1200 Ebenen mit einer Standardabweichung von 5 mm detektiert wurden. Das letztgenannte Maß wird aufgeteilt in ein angenommenes Rauschen der Punktwolke von 3 mm sowie einen Generalisierungsgrad, der auf 2 mm definiert wurde. Diese Aufgabe benötigt für Punktwolken, die wie im vorliegenden Fall ~11 Millionen Punkte enthalten, durchschnittlich etwa 50 Sekunden. Diese Vorverarbeitung wurde über Nacht durchgeführt, um die Durchlaufzeiten zu minimieren. Die Registrierung der aufgezeichneten Daten wurde für verschiedene Etagen individuell berechnet, was eine gleichzeitige Verarbeitung der Daten ermöglichte. Nach Abschluss der Etagen wurden die resultierenden Datensätze als so genannte Gruppen in Scantra eingeführt und anschließend zu einem gemeinsamen Datensatz zusammengeführt.

Hier soll das Verfahren am Beispiel der ersten Etage demonstriert werden, die aus 587 Scans zusammengesetzt ist. Die Standpunkte selbst sind durch 1013 Registrierungen verbunden. In einem ersten Schritt mussten topologische Beziehungen zwischen den Standpunkten definiert werden. Eine Übersicht über einen Korridor auf der ersten Etage ist in Abb. 8 dargestellt, wobei jeder Kreis einen einzelnen Standpunkt darstellt. Ausgehende Beziehungen, die durch graue Pfeile veranschaulicht werden, verbinden den Korridor mit anderen Fluren sowie angrenzenden Treppenhäusern.

Basierend auf den topologischen Beziehungen wird ein paarweises Ebenen-Matching durchgeführt, welches zwischen 5 und 20 Sekunden Rechenaufwand erfordert. Abb. 9 veranschaulicht das registrierte Ergebnis, bei dem Standardabweichungen der translatorischen Komponente unter 1 mm grün, die

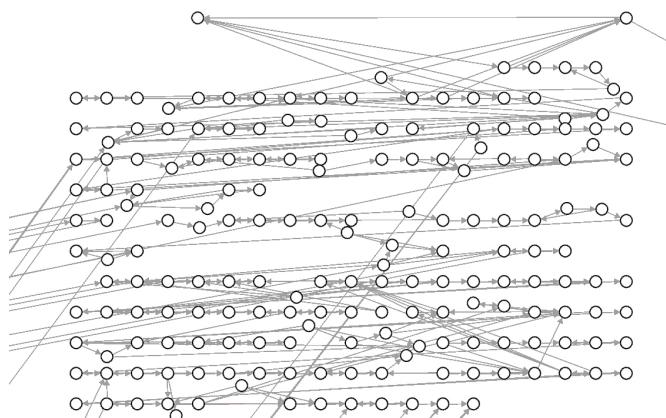


Abb. 8:
Topologische Beziehungen eines Korridors

zwischen 1 mm und 10 mm gelb und alles über der 10 mm-Schranke rot eingefärbt sind.

Es zeigt sich, dass die Mehrheit der paarweisen Registrierungen in die Kategorie besser als ein Millimeter fällt. Mehrere Registrierungen sind gelb und nur sehr wenige rot eingefärbt. Der Grund für den letztgenannten Effekt lässt sich durch ungünstige lokale Konfigurationen erklären. Diese Verbindungen sind jedoch unerlässlich, um das Netzwerk zu stabilisieren.

Die demonstrierte Vorgehensweise wurde für alle Etagen wiederholt, die schließlich zu einem verbundenen Datensatz zusammengeführt wurden. Die

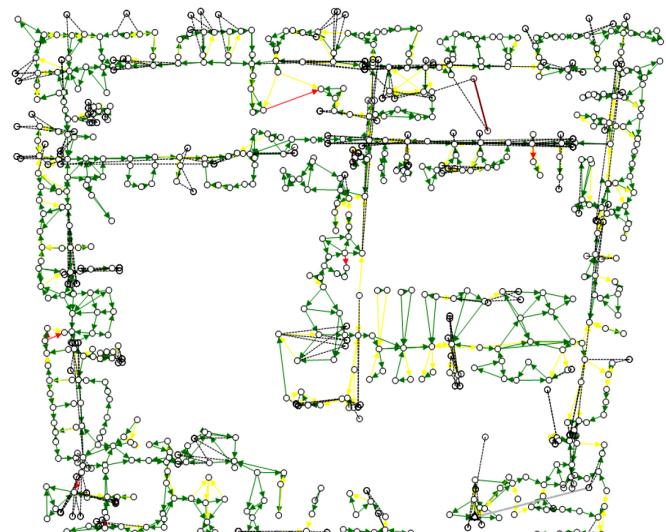


Abb. 9:
Registrierte Standpunkte der ersten Etage

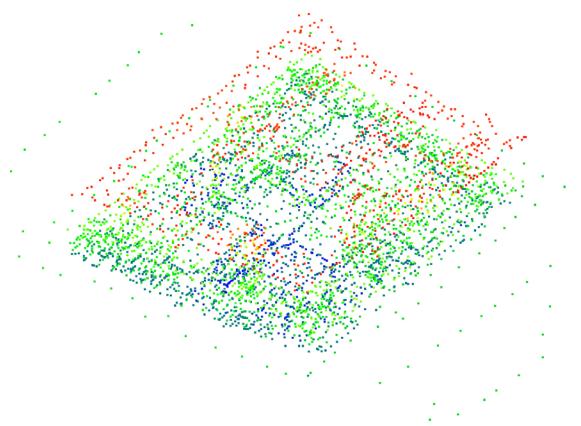


Abb. 10:
Perspektivische
Ansicht der
4853 registrierten
Standpunkte

gesamte Datenbank enthält Informationen über 6.340.973 Ebenen, 4853 Standpunkte, 11.025 paarweise Registrierungen einschließlich stochastischer Maße für alle ausgeglichenen Parameter und belegt lediglich 1,63 GB an Speicher, was einer Komprimierungsrate von ~99 % entspricht. Die abschließende Blockausgleichung mit 4853 Stationen benötigte 112 Sekunden Rechenzeit. Da es nicht möglich war, die bei einem Projekt dieser Größe gesammelten Informationen in eine Datei zu exportieren, mussten dem Kunden separate Dateien zur Verfügung gestellt werden, die im oben genannten Browser ausgewählt werden können. Abb. 10 zeigt eine Übersicht über die registrierten Standpunkte, wobei die Farbe die individuelle Höhe angibt.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt Erfahrungen, die in einem großen Bestandsdokumentationsprojekt gemacht wurden. Die ebenenbasierte Registrierung wurde erfolgreich an einem Datensatz mit 4853 terrestrischen Laserscans eingesetzt. Es hat sich gezeigt, dass die eingesetzte Registrierungsstrategie die Verwendung von Standardhardware aus zwei Gründen erlaubt: (i) durch die Verwendung von Ebenen anstelle von Punkten werden die Anforderungen an den Festplattenspeicher drastisch reduziert und (ii) durch eine ausgeklügelte Formulierung des Ausgleichungsproblems werden die Anforderungen an den RAM minimiert. Letzteres Argument ermöglicht es, Blockausgleichungen mit mehreren tausend Scans innerhalb von Sekunden durchzuführen. In Zukunft werden Möglichkeiten untersucht, wie die bereits detektierten Flächen zur Überwachung des Baufortschritts genutzt werden können.

Literatur

- Aiger, D.; Mitra, N. J.; Cohen-Or, D. (2008): 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(3), 85.
- Besl, P. J.; McKay, N. D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. In: *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(2), 239–256.
- Böhm, J.; Becker, S. (2007): Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans using reflectance. In: *Proceedings of the Proceedings of 8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, Zurich, Switzerland, 9–12.
- Bosché, F. (2012): Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. In: *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 90–102.
- Burger, M.; Wujanz, D.; Neitzel, F. (2017): Segmentierung von Punktwolken anhand von geometrischen und radiometrischen Informationen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*. Wichmann, VDE Verlag.
- Dold, C.; Brenner, C. (2006): Registration of terrestrial laser scanning data using planar patches and image data. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 78–83.
- Förstner, W.; Khoshelham, K. (2017): Efficient and Accurate Registration of Point Clouds with Plane to Plane Correspondences. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2165–2173.
- Giedsdorf, F.; Rietdorf, A.; Gruendig, L. (2004): A Concept for the calibration of terrestrial laser scanners. In: *Proceedings of the FIG Working Week*. Athens, Greece.
- Grant, D.; Bethel, J.; Crawford, M. (2012): Point-to-plane registration of terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 72, 16–26.
- Houshiar, H.; Elseberg, J.; Borrman, D.; Nüchter, A. (2015): A study of projections for key point based registration of panoramic terrestrial 3D laser scan. *Geo-spatial Information Science*, 18(1), 11–31.
- Hullo, J. F. (2016): Fine registration of kilo-station networks – A modern procedure for terrestrial laser scanning data sets. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Józków, G. (2017): Terrestrial Laser Scanning Data Compression Using JPEG-2000. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(5), 293–305.
- Kersten, T. P. (2007): Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications. In: *International Journal of Architectural Computing*, 5(2), 339–354.
- Lichtenstein, M.; Benning, W. (2009): Bestimmung räumlicher Transformationsparameter auf Grundlage von drei-dimensionalen Geraden und projektiver Geometrie. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009*.
- Maas, H. G.; Bienert, A.; Scheller, S.; Keane, E. (2008): Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, 29(5), 1579–1593.
- Paffenholz, J. A.; Alkhatib, H.; Kutterer, H. (2010): Direct geo-referencing of a static terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Geodesy*, 4(3), 115–126.

- Previtali, M.; Barazzetti, L.; Brumana, R.; Scaioni, M. (2014): Scan registration using planar features. In: The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40(5), 501.
- Rabbani, T.; Van Den Heuvel, F.; Vosselmann, G. (2006): Segmentation of point clouds using smoothness constraint. In: International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 36(5), 248–253.
- Reshetyuk, Y. (2010): Direct georeferencing with GPS in terrestrial laser scanning. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 3/2010, 135. Jg., 151–159.
- Rietdorf, A. (2005): Automatisierte Auswertung und Kalibrierung von scannenden Messsystemen mit tachymetrischem Messprinzip. PhD thesis, DGK (Deutsche Geodätische Kommission), C 582.
- Scaioni, M.; Roncella, R.; Alba, M. I. (2013): Change detection and deformation analysis in point clouds: Application to rock face monitoring. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 79(5), 441–455.
- Soudarissanane, S.; Van Ree, J.; Bucksch, A.; Lindenbergh, R. (2007): Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality. In: Proceedings 3D-NordOst, 1–8.
- Tang, P.; Huber, D.; Akinci, B.; Lipman, R.; Lytle, A. (2010): Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. Automation in construction, 19(7), 829–843.
- Technet (2018) Scantra – Hochgenaue Scanregistrierung ohne Targets. www.technet-gmbh.com/produkte/scantra, letzter Zugriff 09/2018.
- Teunissen, P.J. G. (2000): Testing theory. An Introduction. VSSD publishing, Delft, Niederlande.
- Wujanz, D.; Burger, M.; Mettenleiter, M.; Neitzel, F. (2017): An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 125, 146–155.
- Yang, M. Y.; Förstner, W. (2010): Plane detection in point cloud data. In: Proceedings of the 2nd int conf on machine control guidance, Bonn, Germany, 95–104.
- Zoller + Fröhlich, 2018. Blue Workflow (Laser Control) Software. www.zf-laser.com/Blue-Workflow.3dscanning.0.html?&L=0, letzter Zugriff 09/2018.

Kontakt

Dr.-Ing. Daniel Wujanz | Dr.-Ing. habil. Frank Gielsdorf | Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Lothar Gründig
technet GmbH
Am Lehnshof 8, 13467 Berlin
daniel.wujanz@technet-gmbh.com | frank.gielsdorf@technet-gmbh.com |
lothar.gruendig@technet-gmbh.com

Sandro Schaller
Zimmermann & Meixner 3D WELT GmbH
Fohlenweide 41, 88279 Amtzell
sandro.schaller@zm-3dwelt.de

Simultane Lokalisierung und Kartenerstellung (SLAM) im terrestrischen Laserscanning

Jürgen Mayer | Bernhard Metzler

1 Einleitung

Terrestrisches Laserscanning ist heute eine etablierte Technologie, die in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt wird. Die technologische Entwicklung der letzten Jahre hat dazu geführt, dass Scanner heute wesentlich schneller, genauer und einfacher zu bedienen sind und hat so die Scandatenerfassung im Feld wesentlich effizienter gemacht. Ein zentrales Thema, das allerdings nach wie vor eine Einstiegshürde für viele potenzielle Nutzer darstellt, ist die Registrierung von Scandaten. Diese stellt typischerweise neben der immer effizienteren Aufnahme im Feld einen aufwändigen zweiten Arbeitsschritt im Büro dar. Leicas RTC360 Lösung adressiert dieses Problem indem es die Registrierung vollständig automatisiert und Ergebnisse direkt im Feld überprüfbar macht. Die zentrale Technologie, die dabei zum Tragen kommt basiert auf der Methode der simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung («Simultaneous Location and Mapping» – SLAM), die im «Visual Inertial System (VIS)» des RTC360 Laser Scanners integriert ist.

Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über die RTC360 Lösung und geht anschliessend detaillierter auf die Funktionsweise des VIS-Sensors ein.

2 Leica RTC360 Lösung

Leica Geosystems hat im Juni 2018 die „Leica RTC360 Lösung“ vorgestellt. Diese hochautomatisierte, intuitive und für maximale Produktivität ausgelegte Scanninglösung besteht aus

- dem RTC360 3D-Laserscanner,
- der mobilen App Leica Cyclone FIELD 360 für die automatische Scan-Registrierung in Echtzeit und Qualitätskontrolle im Feld und
- der Bürossoftware Leica Cyclone REGISTER 360, um das resultierende 3D-Modell nahtlos in die nachfolgenden Arbeitsabläufe und Auswertungen zu integrieren ([Abb. 1](#)).

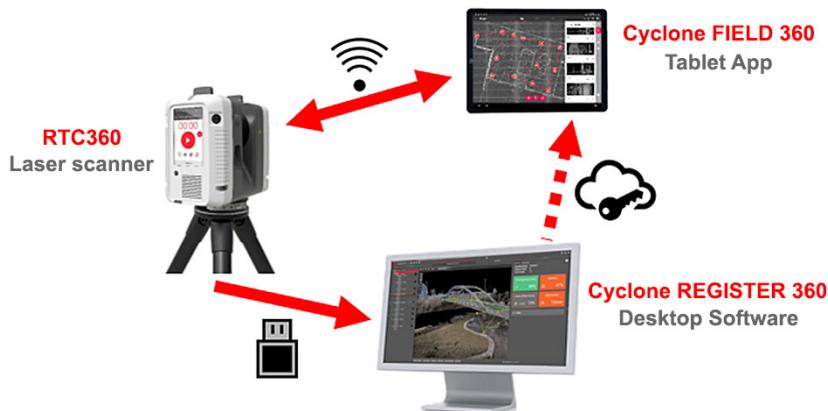


Abb. 1: Leica RTC360 Lösung

Zu den besonderen Leistungsmerkmalen der Lösung gehören

- Erfassung von hochauflösenden Scans inklusive sphärischer HDR-Bildaufnahmen in weniger als zwei Minuten,
- Möglichkeit, die erfassten Daten im Feld mit Zusatzinformationen (Fotos, Videos, Text, etc.) zu ergänzen,
- automatische Aufzeichnung der Bewegungen von Station zu Station, um Scans ohne manuellen Eingriff im Feld vorzuregistrieren,
- automatische Prozessierung der Daten im Büro in Cyclone REGISTER 360.

2.1 RTC360 „Smart Registration Workflow“

Ein wesentliches Merkmal der RTC360 Lösung ist die Möglichkeit, Scans direkt im Feld automatisch vorzuregistrieren und die Ergebnisse mit Hilfe der Cyclone FIELD 360 Field App zu visualisieren, bevor die finale Registrierung vollautomatisch in der Cyclone REGISTER 360 Bürossoftware erfolgt. D.h. anders als bei den meisten Scansystemen, in denen zwei aufeinanderfolgende Scans in mehr oder weniger zufällig gelagerten lokalen Koordinatensystemen erfasst und dann über aufwändige Registrierverfahren in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden müssen, passiert dieser Schritt beim RTC360 automatisch. Das Ergebnis ist symbolisch in Abb. 2 dargestellt. Das typische Ergebnis von zwei aufeinanderfolgenden Scans bei traditionellen Scansystemen ist links dargestellt, während die rechte Seite das Ergebnis mit der RTC360 Lösung zeigt, bei der die beiden Scans bereits nach der Datenerfassung automatisch in ihrer korrekten relativen Lage und Orientierung vorliegen.

Dieser „Smart Registration Workflow“ basiert massgeblich auf der Fähigkeit des RTC360 Laser Scanners, selbstständig und automatisch seine aktuelle Position

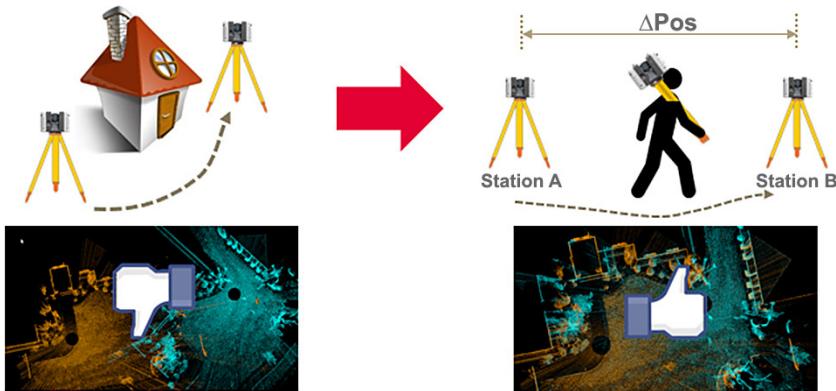


Abb. 2: Automatische Registrierung mit der RTC360 Lösung

und Orientierung relativ zur letzten Aufstellung zu bestimmen. Dies geschieht mit einem Multisensorsystem, dem sogenannten „Visual Inertial System (VIS)“, welches im Folgenden genauer beschrieben wird.

3 Visual Inertial System (VIS)

3.1 Zielsetzung

Die Aufgabe des Visual Inertial Systems (VIS) ist es die relative Position und Orientierung im Raum zwischen zwei aufeinander folgenden Standpunkten des Scanners zu bestimmen. Basierend auf dieser Information kann die am zweiten Standpunkt aufgenommene Punktwolke passend zur ersten rotiert und verschoben werden und somit eine automatische Vorregistrierung, d. h. eine geometrisch korrekte Kombination der beiden Punktwolken, durchgeführt werden. Neben einer Darstellung der kombinierten Punktwolke und damit der bereits aufgenommenen Situation im Feld dient die Vorregistrierung ebenfalls als Startwert zur hochgenauen Registrierung später im Büro.

3.2 Messprinzip – Visual SLAM

Die Funktionsweise des VIS basiert auf dem Prinzip der simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung („Simultaneous Localization and Mapping“ – SLAM).

SLAM basiert im Allgemeinen auf einer Fusion verschiedener Sensordaten in einem Kalman Filter, wobei sich die Art und Anzahl der eingesetzten Sensoren je nach Methode unterscheiden können. Das VIS fällt in die Kategorie der

„Visual SLAM“ Methoden, stützt sich also primär auf Verfahren der Bildverarbeitung und die Erkennung und Verfolgung von natürlichen Merkmalen in Kamerabildern.

3.3 Sensorik

Das VIS besteht aus fünf Kameras und einer Inertial Measurement Unit (IMU). Die Verteilung der Kameras ist so gewählt, dass der gesamte sichtbare Teil der Sphäre rund um den Scanner abgedeckt ist. Vier der fünf Kameras befinden sich in den Ecken des Scanners, die fünfte Kamera ist an der Oberseite des Scanners angebracht und zeigt in den Zenith. Die IMU befindet sich im Inneren des Scannergehäuses (Abb. 3).

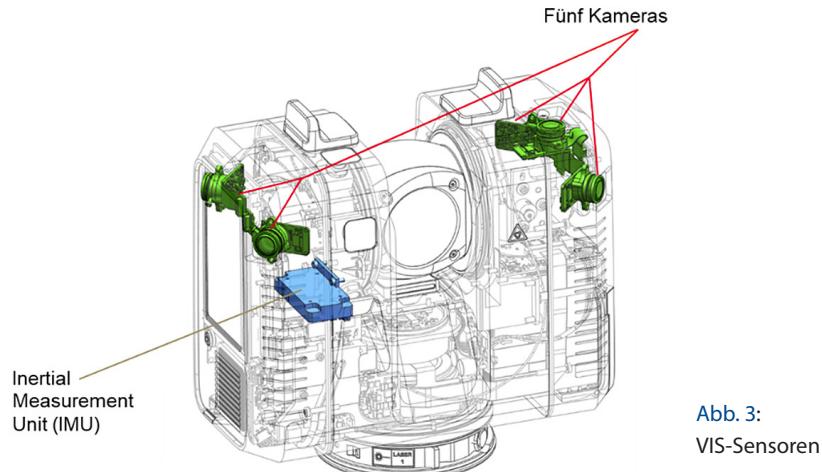


Abb. 3:
VIS-Sensoren

3.4 Messablauf

Das Messprinzip des VIS basiert im Grunde auf dem Prinzip der simultanen Lokalisierung und Kartenerstellung („Simultaneous Localization and Mapping“ – SLAM). Hierbei werden fortlaufend und abwechselnd

- eine neue Pose, d. h. die sechs Freiheitsgrade, des Scanners durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt basierend auf einer Hilfspunktwolke bestimmt (Lokalisierung) und
- unter Einbeziehung der neuen Pose durch einen Vorwärtsschnitt weitere 3D-Punkte bestimmt und die Hilfspunktwolke entsprechend erweitert (Kartenerstellung).

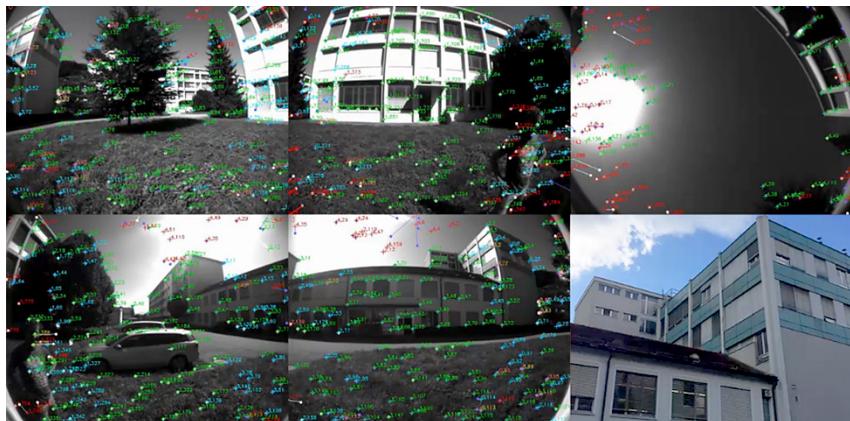


Abb. 4: Feature-Extraktion in VIS-Kamerabildern

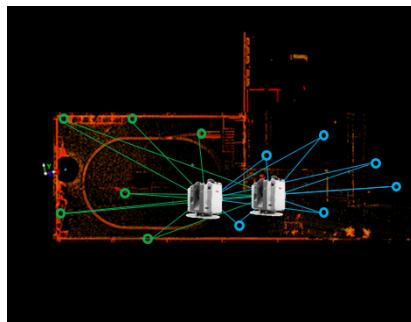
Zu Beginn wird die Hilfspunktwolke durch ausgewählte 3D-Punkte des ersten Scans initialisiert. Für diese Punkte werden vornehmlich optisch signifikante Merkmale – sogenannte „Features“ – ausgewählt, deren Positionsänderung in den Kamerabildern während der Bewegung des Scanners robust durch ein „Feature-Tracking“-Verfahren bestimmt werden kann wie z. B. Ecken und Kanten und generell Punkte mit hohem Kontrast im Bild. [Abb. 4](#) zeigt ein Beispiel von detektierten Features in den fünf VIS Kameras (das Bild rechts unten zeigt eine Referenzaufnahme mit einer Farbkamera).

Nach der Initialisierung ist eine Menge von 3D-Punkten mit ihren korrespondierenden „Feature“-Punkten in den Ausgangsbildern gegeben, für die mittels optischem Fluss deren Position in den folgenden Bildern bestimmt werden kann.

Wird der Scanner bewegt, kann basierend auf den 3D-Punkten und den korrespondierenden „Feature“-Punkten über einen aus der Fotogrammetrie bekannten räumlichen Rückwärtsschnitt die neue Pose des Scanners berechnet werden ([Abb. 5](#)).

Durch die Bewegung ändert sich die unmittelbare Umgebung und einige der „Feature“-Punkte werden in den Kamerabildern nicht mehr sichtbar sein, da sie z. B. durch andere Objekte verdeckt werden. Deshalb werden die Bilddaten laufend nach neuen, signifikanten Merkmalen analysiert, welche dann in die Menge der „Feature“-Punkte aufgenommen werden. Sobald ein neuer „Feature“-Punkt von zumindest zwei Posen aus beobachtet werden kann, wird über einen Vorrwärtsschnitt der entsprechende 3D-Punkt bestimmt und zur Hilfspunktwolke hinzugefügt. Diese ständige Erweiterung soll sicherstellen, dass jederzeit ausreichend 3D-Punkte zur Bestimmung einer neuen Pose zur Verfügung stehen.

Parallel zur Auswertung der Kameradaten werden mittels IMU die Beschleunigungen und Drehraten erfasst. Diese Messungen werden mit der aus der



- „original“ 3D-Punkte aus der gemessenen Punktfolge
- „neue“ 3D-Punkte erzeugt durch Vorwärtsschnitte von mehreren Scanner-Positionen

Abb. 5: Visuell inertiale Navigation

Bildauswertung stammenden Posen in einem Kalman-Filter fusioniert. Konkret wird dabei die Prädiktion mit den Daten der IMU und die Korrektur mit den aus der Bildverarbeitung resultierenden Posen durchgeführt.

Wie bereits erwähnt werden beim SLAM die Posen nacheinander und somit der Bewegungsverlauf des Scanners bestimmt (Lokalisierung) und gleichzeitig die der Posenbestimmung zu Grunde liegende Hilfspunktfolge erweitert (Kartenerstellung). Am Ende der Bewegung, d. h. wenn der zweite Standpunkt erreicht wird, werden durch einen Bündelblockausgleich sämtliche Posen unter Einbeziehung aller „Feature“-Beobachtungen einem globalen Optimierungsprozess unterzogen und somit die Genauigkeit erhöht.

Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit wird dadurch erzielt, dass nach dem Scan am zweiten Standpunkt eine Cloud-to-cloud-Registrierung der beiden Punktfolgen durchgeführt wird. Bei dieser Optimierung wird die Endpose noch einmal korrigiert, indem die Abstände der beiden Punktfolgen im Überlappungsbereich minimiert werden.

3.5 Genauigkeit und Robustheit

Das Design des VIS ist so ausgelegt, dass die Abweichung der geschätzten Position maximal 5 % der Weglänge zwischen den beiden Standpunkten beträgt. Diese Genauigkeitsanforderung ist so gewählt, dass sie, bei ausreichender Scanüberlappung, einen genügend genauen Startwert für eine automatische Cloud to Cloud Registrierung erlaubt.

In internen Tests wurde diese Genauigkeit zuverlässig in verschiedenen Anwendungsszenarien und unter verschiedensten Bedingungen erfüllt. Zu den herausfordernsten Bedingungen während dieser Tests zählten schnelle Szenen- und Licht/Schattenwechsel, z. B. beim Durchgang durch Türen vom Innenraum ins Freie, ruckartige Bewegungen beim Tragen des Scanners und Umgebungen mit wenig Beleuchtung oder wenigen natürlichen Merkmalen.

Obwohl sich das VIS auch unter solchen Bedingungen als äusserst robust erweist gibt es natürliche Grenzen für jedes bildbasierte System, da es auf die Detektion von zuverlässigen Features in seiner Umgebung angewiesen ist. Wo das nicht möglich ist, z.B. in vollständiger Dunkelheit, kann auch keine Pose berechnet werden. In unseren umfangreichen Tests passierte dies aber nur in absoluten Grenzfällen. Für den seltenen Fall, dass das VIS keine zuverlässige Position liefern kann, stellt die FIELD 360 App eine einfache visuelle Methode zur Verfügung, bei der die letzte erstellte Punktwolke mit einfachen Touchscreen Gesten an ihre Sollposition geschoben und rotiert werden kann.

4 Zusammenfassung

Obwohl moderne Laser Scanner immer leistungsfähiger und einfacher zu bedienen werden stellt die Scan-Registrierung nach wie vor, vor allem für neue Benutzer, eine nicht zu unterschätzende Hürde in der Prozessierung von Scandaten dar. Leicas neue RTC360 Lösung automatisiert den Registrierprozess mit einer Kombination aus auf einander abgestimmten Komponenten, dem RTC360 Laser Scanner, der Cyclone FIELD 360 App und der Cyclone REGISTER 360 Bürosoftware. Im Zentrum des RTC360 „Smart Registration Workflows“ steht dabei die Fähigkeit des RTC360 Scanners, seine relative Positionierung und Orientierung im Raum mit Hilfe eines „Visual Inertial Systems (VIS)“ zu bestimmen. Dies erfolgt vollautomatisch ohne, dass der Nutzer bestimmte Prozesse auslösen oder spezielle Verhaltensregeln beim Tragen des Scanners befolgen muss. Das Messprinzip des VIS basiert auf der Visual SLAM Methode, bei der nach einem Initialisierungsschritt laufend mit Hilfe von Kameras und Bildverarbeitungsalgorithmen natürliche Merkmale der Umgebung detektiert und verfolgt und daraus relative Posen geschätzt werden. Tests während der Entwicklung des Systems haben gezeigt, dass das System mit hoher Robustheit Ergebnisse liefert, die genau genug sind um den Registrierprozess vollständig zu automatisieren.

Kontakt

Jürgen Mayer

Director Terrestrial Laser Scanning, Leica Geosystems AG

Heinrich-Wild-Strasse, 9435 Heerbrugg, Schweiz

juergen.mayer@leica-geosystems.com

Bernhard Metzler

Head of Imaging, Hexagon Technology Center GmbH

Heinrich-Wild-Strasse, 9435 Heerbrugg, Schweiz

bernhard.metzler@hexagon.com

Session 3: TLS in der Infrastruktur

TLS und BIM – Die Erfassung, Analyse und Visualisierung von Infrastrukturprojekten

Andreas Riemenschneider

1 Einleitung

Das wirtschaftliche Planen, Bauen und Betreiben ihrer Infrastrukturanlagen ist neben der Bereitstellung der Verkehrswege, Ingenieurbauwerke und Gebäude das oberste Ziel der Anlagenverantwortlichen. Die Planung, die Instandhaltung, der Umbau und die Nutzung vorhandener Verkehrswege und ihrer baulichen Anlagen erfolgt zunehmend digital. Dies geschieht nach der BIM-Methodik (BIM: engl. Building Information Modelling), einem Prozess, der vollständige, genaue und widerspruchsfreie Informationen zu bestehenden Anlagen, trasennahen Topografien, Gebäuden und Ingenieurbauwerken voraussetzt. Nach den Regeln des BIM-Prozesses stehen die digitalen Daten zukünftig in einem BIM-Gesamtmodell über den gesamten „Lebenszyklus“ der Verkehrsanlage und ihrer Bestandteile zur Verfügung. Die Ingenieurvermessung leistet mit ihren Mess-, Auswerte- und Berechnungsmethoden einen wichtigen Beitrag zur



Abb. 1: BIM-Modell eines Bürokomplexes

Ermittlung von Bestandsdaten als Grundlage für digitale Anlagen-, Bauwerks-, Gebäude- bzw. Geländemodelle. Wir sprechen hier von dem BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung (siehe Abb. 1), mit dem die digitale Zusammenarbeit unterschiedlichster Ingenieurdisziplinen konstruktiv und projektbegleitend gefördert werden soll. Im Folgenden werden die entscheidenden Faktoren, die zur erfolgreichen Erzeugung dieses Fachmodells erforderlich sind, dargelegt. Faktoren, die z. B. die Korrelation zwischen Fahrweg und baulicher Anlage berücksichtigen. Hierbei handelt es sich um einen ingenieurvermessungstechnischen Prozess, bei dem bestehende Verkehrsanlagen tachymetrie-, GNSS- und laser-scangestützt kinematisch und statisch erfasst werden. Der Beitrag zeigt auf, wie unter Verwendung von REVIT, einer Applikation aus dem Hause Autodesk, die planungsbegleitende- und die Bauvermessung effizient und nachhaltig die Forderungen der Infrastruktur anlagenbetreiber zur Erfassung, Visualisierung und Dokumentation von bestehenden und neuen Trassen, Gebäuden und Ingenieurbauwerken nach dem neuesten Stand der Technik erfüllt.

2 Wie definiert sich das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung?

Dieses Fachmodell ist ein Bestandteil des gesamten, digitalen Anlagen-, Bauwerks-, Gebäude- bzw. Geländemodells. Das 3D (dreidimensionale)-Modell entsteht unmittelbar nach Projektstart in Form einer detaillierten vermessungstechnischen Bestandsaufnahme. Das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung, auch Bestandsmodell genannt, enthält die Geobasisdaten zu bestehenden Verkehrsanlagen, der trassennahen Topografie, sowie der Gebäude und Ingenieurbauwerke. Der Umfang, sowie der Detaillierungsgrad des Bestandsmodells sind abhängig von der Aufgabenstellung. Der Informationsgehalt und die Informationstiefe des BIM-Modells stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem zukünftigen Anwendungsfeld, dem das Modell zugeführt werden soll. Anwendungsfelder könnten beispielsweise sein: Planung, Simulation, Projektmanagement, Öffentlichkeitsarbeit u. v. m. Der Level of Detail (LoD) definiert dabei den geometrischen Detaillierungsgrad der BIM-Bauteile und der Level of Informationen (LoI) den Grad des Informationsgehalts der BIM-Bauteile bzw. des Modells in Abhängigkeit der Projektanforderungen bzw. des Planungsverlaufs. Mit dem Anstieg der Planungsleistungsphasen im Sinne der HOAI, steigen die Anforderungen an den Detaillierungsgrad der notwendigen Informationen. Der Level 100 bildet in diesem Ranking den untersten und Level 400 den höchsten Grad der Anforderungen ab. Oder anders ausgedrückt: je größer der gewählte Abbildungsmaßstab der Ingenieurvermessung, umso höher der Informationsgehalt bzw. Detaillierungsgrad des BIM-Fachmodells. Das Fachmodell Ingenieur-

vermessung stellt maßstabsgetreu und dreidimensional alle Objekte, verknüpft mit weiteren wichtigen Zusatzinformationen, innerhalb der Planungsgrenzen dar. Es bildet zum Zeitpunkt der Vermessung den Ist-Zustand und die aktuellen geometrischen Verhältnisse im Planungsbereich ab. Es beinhaltet ggf. wichtige Informationen, wie das digitale Geländemodell (DGM), Pläne zu Ver- und Entsorgungsleitungen und Daten des Liegenschaftskatasters. Grundsätzlich werden alle relevanten Schnittstellen zum Bestand und weitere, für die Planungsaufgabe wesentlichen Bauteile dargestellt.

3 Wozu wird das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung benötigt?

Mit dem 3D (dreidimensionalen)-BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung werden für Planungszwecke hochwertige, bauteilorientierte, übereinstimmende Bauwerksmodellierungen zum Ist-Bestand bereitgestellt. Diese digitalen Bauwerksmodelle beinhalten, wenn möglich, unter anderem die mathematisch, geodätisch exakt definierten Raumkurven eines Fahrwegs, nämlich die Soll-Achsen, -Trassen und -Gradienten und/oder Bauwerksachsen und -höhen. Von zentraler Bedeutung ist die Widerspruchsfreiheit zwischen den Bauteilen und den Soll-Achsen, -Trassen und -Gradienten. Man spricht hier von der Einhaltung des Nachbarschaftsprinzips. Nach diesem Prinzip sollen die Distanzen zwischen den Bauteilen bekannt sein und vermeintliche Kollisionen vermieden bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Die digitalen, dreidimensionalen Vermessungsdaten werden so bereitgestellt, dass die Ableitung permanent konsistenter Grundrisspläne, Schnitte und Ansichten im weiteren Planungsprozess, vor dem Anspruch einer hohen Datenverfügbarkeit, garantiert ist. Die Durchführung von Kollisionsanalysen, Mengenermittlungen und diversen anderen Simulationen ist auf Basis der erzeugten Vermessungsdaten möglich. Komplexe Anlagen, wie z. B. die Verkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG, können so digital strukturiert und aufbereitet werden. Prozessbegleitend können so mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung, Analysen, Vergleiche und Alternativen effizient untersucht und letztlich Entscheidungen für die bestmöglichen Lösungen zu einer Vielzahl von technischen Problemen bei der Planung, dem Bau und der Bewirtschaftung einer komplexen Verkehrsanlage getroffen werden. Gebildet und modelliert werden geodätische Basisdaten, die als Grundlage für einen optimalen Datenaustausch und zur einheitlichen, gemeinsamen, bestmöglichen, digitalen Weiterverarbeitung der erfassten Informationen dienen sollen.

4 Die Entstehung des BIM-Fachmodells Ingenieurvermessung

4.1 Die Projektvorbereitung und -organisation

Wesentlicher Bestandteil des ersten Teilprozesses ist die Ausrichtung des Mess- und Auswertekonzeptes auf die Anforderungen der Planungsinstitutionen. Die Organisation von Sicherungsmaßnahmen zur regelkonformen Vermeidung von gefährlichen Situationen beim Betreten des Gefahrenbereichs von Verkehrsanlagen und Bauwerken ist für das Vermessungspersonal und den Individualverkehr unabdingbar. Die Ingenieurvermessung ist aufgefordert, unter geringster Beeinträchtigung des laufenden Verkehrs und Betriebs in kürzester Zeit ein Maximum an dreidimensionalen topografischen Informationen zu erfassen, auszuwerten, zu analysieren und zu dokumentieren. Vorhandene Geobasisdaten werden eingeholt und überprüft und fließen in den Gesamtprozess ein.

4.2 Das Festpunktfeld

Digitale, dreidimensionale Bauwerksmodelle entstehen immer aus einer Vielzahl von vermessungstechnischen Einzelmessungen, die sich über einen größeren Zeitraum erstrecken und die auf unterschiedlichen Messverfahren basieren. Um zweifelsfreie Ergebnisse zu erzielen, ist ein durchgängig homogenes, hoch genaues und ausgeglichenes Maß- und Bezugssystem zwingende Voraussetzung. Mit diesem geodätischen Festpunktfeld steht und fällt die Qualität der digitalen Bauwerksmodelle und sämtlicher Nachbarschaftsbeziehungen im dreidimensionalen Raum und damit letztendlich auch die Qualität anschließender Planungen und Bauausführungen. Eine Verdichtung von vorhandenen Bezugspunkten erfolgt in der Regel durch die Einbeziehung von Basisreferenzpunkten. Notwendige Verdichtungspunkte werden projektbezogen erkundet, vermarktet,



Abb. 2: Referenzpunkt mit GNSS-Empfänger

qualitätsgesichert gemessen, ausgeglichen, berechnet und dokumentiert. Diese Verdichtung des Maß- und Bezugssystems bildet die Basis für die tachymetrie-, GNSS- und laserscangestützten Bestandsaufnahmen von Verkehrsanlagen mit ihren Tunneln, Ingenieurbauwerken, Gebäuden und technischen Einrichtungen. Der sach- und fachgerechte Umgang mit amtlichen Lage- und Höhenbezugssystemen wie UTM, Gauß-Krüger und DHHN2016 sind standardisierte Prozesse der Ingenieurgeodäsie und stellen sicher, dass Liegenschaftsdaten und Informationen zu Ver- und Entsorgungsleitungen, Anlagen, Ingenieurbauwerken und Gebäuden unterschiedlicher Verkehrs- und Energieversorgungsunternehmen homogen und unter Berücksichtigung sämtlicher Nachbarschaftsbeziehungen in das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung einfließen (siehe Abb. 2).

4.3 Die vermessungstechnische Bestandsaufnahme

Auf der Basis des geodätischen Festpunktfeldes erfolgt aus einer Kombination unterschiedlichster Messprozesse und Messsensoren die vermessungstechnische Bestandsaufnahme nach Lage und Höhe. Dabei werden die Infrastrukturprojekte mit einer Kombination aus Nivellement-, Tachymetrie-, GNSS- und Laserscan-Messungen dreidimensional erfasst. Die vollflächige Bestandsaufnahme von Verkehrsanlagen wird mittels kinematischem und statischem Laserscanning realisiert (siehe Abb. 3). Die Gesamtheit aller erfassten Daten bildet die Basis für das mit REVIT erzeugte digitale BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung.



Abb. 3: Kinematisches Gleismesssystem SiTrack:One

4.4 Die Erstellung des digitalen Modells

Mit modernsten Softwareapplikationen werden die Sensordaten von Digitalnivellierern, Tachymetern, GNSS-Empfängern und Laserscannern ausgelesen, mehrfach gesichert und miteinander verknüpft. Datenanalysen und -kontrollen hinsichtlich der Vollständigkeit, Plausibilität und Widerspruchsfreiheit bilden die Vorstufe zur qualitätsgesicherten Erstellung des BIM-Fachmodells Ingenieurvermessung (siehe Abb. 4). Mit dem Fachmodell werden für Planungszwecke hochwertige, bauteilorientierte, übereinstimmende Bauwerksmodellierungen



Abb. 4: BIM-Modell eines Kreuzungsbauwerkes

zum Ist-Bestand (As-built) bereitgestellt. Hierbei handelt es sich in Teilen um parametrische Modellierungen. Mit diesem Verfahren werden geometrische Modelle mit Abhängigkeiten und Zwangsbedingungen versehen, so dass flexible Modelle entstehen. Diese Modelle können schnell und effizient an geänderte Anforderungen der Planung angepasst werden. Die Gesamtheit einer Vielzahl parametrisierter Objekttypen, der sogenannten Familien, ergibt die Gesamtmodelle. Die Parameter beziehen sich unter anderem auf Länge, Breite, Höhe, Position, Ausrichtung und Semantik der geometrischen Figuren. Eine Abhängigkeit zwischen den Parametern entsteht durch die Definition freier Algorithmen. Definiert werden hier Gesetzmäßigkeiten zwischen den einzelnen Objekten hinsichtlich Ausrichtung, Orthogonalität, Parallelität, Verbindung, Abstand und gleichen Abmessungen. Vermeintliche Modelländerungen führen somit zu einer „Kettenreaktion“. Dies ist ein sehr effizienter Prozess. Abgesehen von der Verfügbarkeit, Plausibilität, Widerspruchsfreiheit und Vollständigkeit der modellierten

Daten ist die Akzeptanz des Bauwerksmodells durch den Nutzer entscheidend. So wird bei der Erzeugung der Familien auf eine möglichst realitätsnahe Darstellung der tatsächlich vor Ort verbauten Materialien geachtet.

5 Welche Ergebnisse sind mit dem BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung zu erwarten?

5.1 Das Festpunktfeld

Für zukünftige Planungs- und Bauprozesse steht mit Abschluss der Planungsbegleitenden Vermessung ein dreidimensionales, homogenes, ausgeglichenes, verdichtetes, dokumentiertes und einheitliches Maß- und Bezugssystem in Form von dauerhaft vermarkten, hochgenauen Festpunkten zur Verfügung.

5.2 Die Soll-Achsen, -Trassen und -Gradienten

Im Zuge der Planungsbegleitenden Vermessung werden die Raumkurven von Fahrwegen und die Achsen von Ingenieurbauwerken und Gebäuden durchgängig unter Berücksichtigung von Zwangspunkten mathematisch exakt definiert und dokumentiert. Sämtlichen Planungs- und Bauprozessen zu Verkehrsanlagen, Ingenieurbauwerken und Gebäuden stehen damit abschließend die auf Absolutkoordinaten basierenden zweifelsfreien Soll-Achsen, -Trassen und -Gradienten zur Verfügung (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Das BIM-Fachmodell einer Eisenbahnüberführung

5.3 Das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung

Mit dem 3D (dreidimensionalen)-BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung stehen für Planungszwecke hochwertige, bauteilorientierte, übereinstimmende Bauwerksmodellierungen zum Ist-Bestand zur Verfügung. Die Verkehrsanlagen sind damit wirklichkeitstreu dargestellt (As-built) und umfassend, durch eine Vielzahl von parametrisierten Objekten („Familien“), in einem digitalen Bauwerksmodell beschrieben. Die Projektanforderungen bzw. der Planungsverlauf bestimmen maßgeblich den geometrischen Detailierungsgrad und den Grad des Informationsgehalts zum BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung. Die erzeugten Familientypen können durch die Anlagenverantwortlichen im Zuge von Ausschreibungen zur Erstellung von Bauteillisten, sowie bei der Ermittlung von Mengen und Massen genutzt werden. Die digitalen, dreidimensionalen



Abb. 6: BIM-Modell einer Verkehrsstation



Abb. 7: Längsschnitt durch das Modell der Abb. 6

Vermessungsdaten werden schnittstellenorientiert so bereitgestellt, dass die Ableitung permanent konsistenter Grundrisspläne, Schnitte und Ansichten im weiteren Planungsprozess vor dem Anspruch einer hohen Datenverfügbarkeit garantiert ist (siehe Abb. 6 und Abb. 7).

6 Fazit

Vollständige, genaue und widerspruchsfreie Informationen zu bestehenden Verkehrsanlagen, ihrer trassennahen Topografien, sowie ihrer Gebäude und Ingenieurbauwerke sind Voraussetzungen für komplexe Planungsprozesse. Die Erfassung von Geodaten mit hybriden Messprozessen, nämlich eine Korrelation von GNSS-Empfängern, Tachymetern, Nivellierern, Laserscannern und der Kombination aus statischer und kinematisch erfasster Messdaten sind nachgewiesenermaßen Realität. Auf der Basis hochgenauer und homogener Bezugsysteme ist es der Ingenieurvermessung möglich, einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der planerischen Qualität bei der Modernisierung von Infrastruktur- und Verkehrsanlagen zu leisten. Schlüssige Konzepte oder die „Ingenieurvermessung aus einem Guss“ – von der vorausschauenden Planung einer Messung über die einzusetzenden Messsensoren, das entsprechend qualifizierte Personal, die Auswerte- und Dokumentationsstrategie in Verbindung mit einer auf die Messsensoren und die Aufgabenstellung abgestimmten Software – sind das Potenzial für einen gewichtigen Beitrag der Geodäten zu einer effizienten, digitalen Zusammenarbeit in der Planungs- und Baubranche. Digitale, dreidimensionale Anlagen- und Bauwerks- bzw. Fachmodelle, wie das der Ingenieurvermessung, erzeugen ein präzises und strukturiertes Abbild der Wirklichkeit. Sie werden im Rahmen der Planung zur Modifizierung von Infrastrukturanlagen erzeugt. Das BIM-Fachmodell Ingenieurvermessung erhöht mit Beginn der Planungsphase maßgeblich die Produktivität, Flexibilität und Transparenz für alle an Planungs-, Simulations-, Entwurfs-, Abstimmungs-, Überwachungs- und Entscheidungsprozessen beteiligten Institutionen. Die unmittelbar zusammenhängende, objektorientierte Modellierung von „Bauteil-Familien“ und ihren Parametern zu dem digitalen Fachmodell stellt zukünftig sicher, dass Planungsänderungen zentral, schnell und effizient umgesetzt werden können und zeitnah zur Verfügung stehen. Dieses Verfahren reduziert Fehlerquellen und erfordert ein Umdenken zu den bisherigen Umsetzungsprozessen der Ingenieurvermessung im dreidimensionalen Raum. In Zukunft wird der Fokus der Ingenieurvermessung mehr denn je auf den Aspekten der Vollständigkeit, Verfügbarkeit, Erreichbarkeit, Genauigkeit und der Dokumentation liegen.

Literatur

- Borrmann, A.; Berkhan V. (2015): Grundlagen der geometrischen Modellierung. Beitrag VDI Buch – Building Information Modeling – Springer Vieweg.
- DB Station&Service AG: BIM – Digitales Planen und Bauen. BIM-Vorgaben für kleine und mittlere Verkehrsstationen.
- Pilling, A. (2017): BIM – Das digitale Miteinander. Beuth Verlag.
- Riemenschneider, A. (2018) DAS BIM-FACHMODELL INGENIEURVERMESSUNG – ein fester Bestandteil bei der Planung von Gleisanlagen. Beitrag zum Seminar 02118 des Bildungswerk VDV, Fulda.

Kontakt

Andreas Riemenschneider
Vermessungsbüro Riemenschneider GmbH & Co. KG
Hauptstraße 149, 63110 Rodgau
andreas@riemenschneider.net

Laserscanninganwendungen Hauptbahnhof Stuttgart 21

Johannes Wagner

1 Projektvorstellung Bahnprojekt Stuttgart–Ulm

Oft wird bei Diskussionen in der Öffentlichkeit das Projekt Stuttgart 21 gleichgesetzt mit dem Bau der Talquerung mit Hauptbahnhof. Tatsächlich ist Stuttgart 21 aber viel mehr, nämlich, die Neuordnung des Bahnknotens Stuttgart welche durch die Umgestaltung des bisherigen Kopfbahnhofs zu einem Durchgangsbahnhof, die ringförmige Anbindung dieses Durchgangsbahnhofs über Tunnels, die Errichtung weiterer Bahnhöfe wie z. B. den Fernbahnhof am Flughafen oder die S-Bahn-Station Mittnachtstraße, repräsentiert wird.

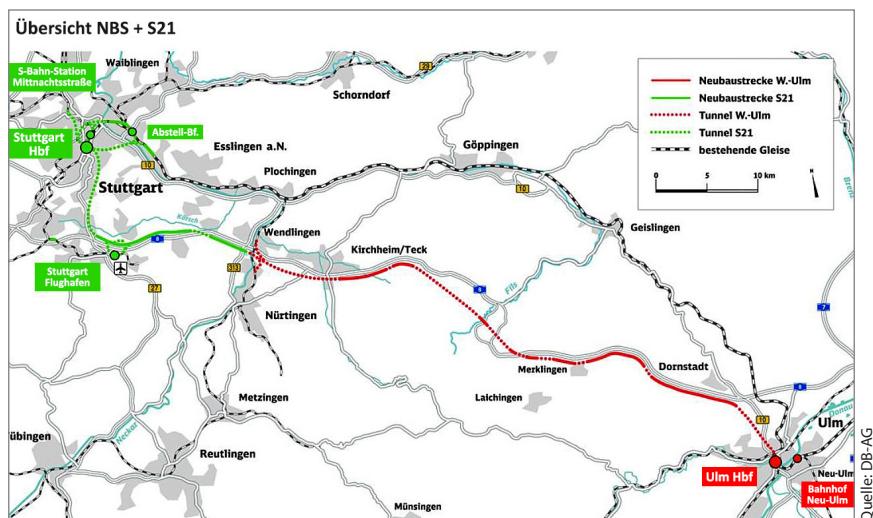


Abb. 1: Übersicht Bahnprojekt Stuttgart–Ulm

Quelle: DB-AG

Um von diesen Umgestaltungen des Bahnverkehrs im inneren Stadtbereich von Stuttgart und auf den Fildern für den Fernverkehr partizipieren zu können wird im gleichen Zeitraum eine Neubaustrecke zwischen Wendlingen und Ulm errichtet (Abb. 1). Zusammen bilden sie den Projektverbund „Bahnprojekt Stuttgart–Ulm“.

1.1 Projektrahmen Stuttgart 21

Stuttgart 21 verfügt über eine gesamte Neubaustreckenlänge von 57 km, davon 33 km im Tunnel. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 250 km/h. Insgesamt werden drei Personen- und ein Abstellbahnhof sowie 18 Brücken neu gebaut und 16 Tunnel aufgefahrene.

Die herausragenden Bauwerke sind die Talquerung mit Hauptbahnhof (PFA 1.1), der Fildertunnel mit einer Länge von 9468 m sowie die architektonisch aufwendige EÜ Neckarbrücke mit einer Länge von 355 m.

Stuttgart 21 wurde in sechs Planfeststellungsabschnitte, PFA 1.1 bis PFA 1.6, unterteilt. Nach Angaben der Bahn ist die Inbetriebnahme für 2025 vorgesehen. Die geplanten Kosten belaufen sich mit Stand vom 26.01.2018 auf ca. 7,7 Mrd. Euro. (Stand 05.02.2018, Quelle: Bahn).

1.2 Der Planfeststellungsabschnitt 1.1 (Talquerung mit Hauptbahnhof)

Der Planfeststellungsabschnitt 1.1 umfasst die ca. 900 m lange und 80 m breite Talquerung mit dem neuen Stuttgarter Hauptbahnhof. Im Wesentlichen unterteilt sich dieser Abschnitt in den DB-Tunnel Nordkopf (Ein- und Ausfahrtbereich von bzw. in Richtung Feuerbach und Bad Cannstatt), die Bahnhofshalle mit dem charakteristischen Schalendach und den diesem zugrunde liegenden Kelchstützen, sowie den DB-Tunnel Südkopf (Ein- und Ausfahrtbereich von bzw. in Richtung Ober-/Untertürkheim und zur Filderebene). Die Talquerung mit Hauptbahnhof wird in etwa rechtwinkliger Verdrehung zum bestehenden Kopfbahnhof errichtet.

Aus dieser Konstellation sowie der Tieferlegung des neuen Hauptbahnhofs ergeben sich zahlreiche Folgemaßnahmen, die für sich alleine teilweise bereits ingenieurtechnische Meisterleistungen darstellen und vor Beginn der eigentlichen Arbeiten an der Talquerung vorbereitend errichtet werden müssen.

Hierzu zählen insbesondere die Verlegung der U-Bahn-Haltestelle Staatsgalerie, die Errichtung von drei großen Dükerbauwerken (Düker Hauptsammler West, Düker Cannstatter Straße, Düker Nesenbach), die Verlegung der Stadtbahnrohren der U12 als Folgemaßnahme Heilbronner Straße in bergmännischer Bauweise, der Umbau und die Einbindung der bestehenden S-Bahn-Station Hauptbahnhof, sowie nicht zuletzt die Abfangung und Unterfahrung des alten DB-Direktionsgebäudes.

Geprägt wird das Erscheinungsbild des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs sowohl innerhalb der Bahnhofshalle, als auch außerhalb, insbesondere durch die Architektur der Schalendachs ([Abb. 2](#)). Die Errichtung des Schalendachs stellt



© Visualisierung: plan b, Stuttgart, Quelle: DB AG

Abb. 2: Neue Bahnsteighalle mit einem Lichtauge

gleichzeitig aus bau- und vermessungstechnischer Sicht die größte Herausforderung dar. Besonders prägend sind hierbei die Kelche des Schalendachs, mit einem Durchmesser von jeweils 32 m, welche zum einen die tragende Funktion des Schalendachs übernehmen und zum andern das Tageslicht in die neue Bahnhofshalle über die Lichtaugen einfallen lassen. Verbunden untereinander sind die Kelche über die so genannten „Schwindgassen“. Das gesamte Schalen- dach, also Kelche und Schwindgassen sind als Freiformflächen gestaltet. Grundsätzlich sind die Kelchformen bei allen 28 Kelchen identisch, differieren jedoch untereinander in ihrer Höhe und Neigung.

Weiterhin charakterisiert ist die Bahnhofshalle des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs durch ihre vier Bahnsteige und daraus resultierend ihre acht Durchgangsgleise.

Der Oberbau ist als feste Fahrbahn unter Berücksichtigung eines Masse-Feder-Systems geplant.

2 Vermessung und Laserscanninganwendungen im Bereich der Talquerung

2.1 Aufgabenbereiche Vermessung

Die vermessungstechnischen Aufgaben, die beim Neubau der Talquerung mit Hauptbahnhof zu erbringen sind, sind mannigfaltig. Sie umfassen die Erstellung der Messkonzepte und Messprogramme, die Unterstützung der Planungsabtei-

lung mit geodätischen Planprüfungen, vermessungstechnischen Aufmaßen als Grundlage von Planungen sowie der Erstellung von Absteckplänen.

Weiterhin ist die Verdichtung des übergeordneten Festpunktfelds im und in der unmittelbaren Umgebung des Baufelds sowie die Pflege des verdichteten Festpunktfelds eine anfallende Aufgabe.

Die Deformationsmessungen der von den Baumaßnahmen betroffenen Bestandsbauwerke, sowohl manuell als auch teilweise automatisiert (geodätisches Monitoringsystem), manuelle geotechnische Messungen im Bereich der Verbauten und der Baugruben sowie automatisierte geotechnische Messungen in einzelnen Bereichen der Bodenplatte gehören ebenfalls zum Auftragsumfang.

Ferner sind die Aufgaben aus der klassischen Hochbauvermessung (Punkte, Achsen, Höhen, etc.) ebenso Bestandteil wie alle Facetten der Vermessungsleistungen aus dem Bereich des Straßen- und Kanalbaus. Im Rahmen des Spezialtiefbaus und der Herstellung der Baugruben sind diverse Spezialvermessungen wie Bohrloch- und Ankervermessungen zu erbringen.

Nach Herstellung der einzelnen Bauteile ist der Nachweis der plangerechten Bauausführung zu liefern und letztendlich erfolgt noch die Übernahme der relevanten Daten in das DB-GIS.

Das Highlight – nicht nur aus vermessungstechnischer Sicht – stellt aber der Bau der Kelche und des Schalendachs dar. Insbesondere hierbei sowie bei sehr vielen Aufgaben aus dem Bereich der Entwurfsvermessung und dem Nachweis der plangerechten Herstellung des Bauwerks, werden Laserscanner sowie „scannende“ Tachymeter wie z. B. die Trimble SX10 eingesetzt.

2.2 Einsatzbereiche von Laserscannern und Scanning-Totalstationen

Der Einsatz von Laserscannern bzw. „Scanning-Stationen“ im Bereich des Neubaus der Talquerung mit Hauptbahnhof erstreckt sich über viele Anwendungsbereiche.

Im Bereich der klassischen Laserscanninganwendungen wurde z. B. ein komplettes 3D-Bestandsaufmaß und Modellierung der Fassade und der Innenräume der alten DB-Direktion zu Planungszwecken und zur Dokumentation für den Denkmalschutz durchgeführt, wobei aus der gewonnenen Punktfolge wiederum in verschiedenen Ebenen 2D-Bestandspläne generiert worden sind. In anderen Beispielen wurden über ein Schachtstativ Sonderbauwerke der Kanalisation bzw. Kabelzentralverteilerschächte der Telekom gescannt. In beiden Fällen wurde die erzeugte Punktfolge direkt in der 3D-Planung des ANBau weiterverarbeitet.

Schon mehr im Bereich der klassischen Ingenieurvermessung ist das Aufmaß der freigelegten Innenschale der U12-Röhren bzw. in einem zweiten Schritt das Aufmaß der eingebrachten Weichlage zu betrachten. Unter der Weichlage ist hier eine Schicht aus Blähbeton zwischen den Bestandsröhren der U12 und der Bodenplatte der neu zu errichtenden Talquerung zu verstehen. Ziel hierbei war es, den Nachweis zu erbringen, dass die Bestandstunnelröhren der U12 an jeder Stelle, ohne Nacharbeiten, planmäßig in die Bodenplatte der Talquerung eingebunden werden können, sowie in einem zweiten Schritt die Schichtstärke der eingebrachten Weichlage zwischen Bestandstunnelröhre und der neu zu errichtenden Bodenplatte der Talquerung zu dokumentieren.

Insbesondere kommen aber Laserscanningverfahren im Bereich der Kelchvermessung zum Einsatz. Diese reichen von der Kontrolle der Kelchschalungselemente zum Plansoll, über die As-built-Messungen des kompletten Schalendachs bis hin zu Deformationsmessungen der Kelche zu verschiedenen Zeitpunkten und Bauphasen.

3 Laserscanningverfahren bei der Kelchvermessung

Wie bereits oben erwähnt gliedern sich der Einsatz von Laserscanningverfahren im Bereich der Kelchvermessung im Wesentlichen in die Kontrolle der Schalungselemente, die As-built-Aufnahme des Schalendachs und die Gegenüberstellung zum Plansoll sowie die Verformungsmessung von Kelchen. Prinzipiell ähneln sich diese Verfahren, bezogen auf die Datenvorbereitung, sehr stark. Aus diesem Grund sei an dieser Stelle auch nur auf die Schalungskontrolle der Kelchschalung eingegangen.

3.1 Ausgangsdaten

Als Grundlage für die Fertigung und Herstellung der Kelchschale dient das vom Architekt entworfene 3D-Modell. Hierbei handelt es sich um ein komplettes 3D-Modell des gesamten Schalendaches der Bahnhofshalle, welches unter Verwendung des Softwarepaketes Rhinoceros© der Firma McNeel designet wurde. Es besteht nahezu ausschließlich aus Freiformflächen und dient im Planungs- und Herstellungsprozess als Grundlage zur Ableitung aller relevanten Schalungskörpermodelle und Absteckpläne, für die Bauausführung bzw. als Referenzmodell für alle zu erstellenden Soll-Ist-Vergleiche.

Die Herstellung der hölzernen Schalungselemente mittels eines 3D-gesteuerten Fräskopfes, welcher auf Basis des 3D-Modells die Oberfläche erstellt. Im Zuge des Herstellungsprozesses erfolgt durch den Schalungsbauer für jedes Element

eine 3D-Dokumentation der Oberfläche mittels 3D-Scanner zum Nachweis der plangerechten Herstellung der Schalelemente. Zum Einsatz kommt hierbei der VZ-400 der Firma Riegl.

Die Qualitätssicherung der Schalungselemente erfolgt dabei in den nachfolgenden Schritten:

- Werkseitige 3D-Vermessung des Schalungsbauteils
- Registrierung der Messung anhand von abgeleiteten Referenzpunkten aus der CAD-Konstruktion (abhängig von der Geometrie des Prüfkörpers, vier bis sechs Referenzpunkte je Bauteil)
- Aufbereitung der gemessenen Punktewolke
- Ableitung eines triangulären Netzes (Kantenlänge ist abhängig von der lokalen Flächenkrümmung) aus der Sollgeometrie des übergebenen 3D-Modells
- Soll-Ist-Flächenvergleich, Prüfroutine in Riscan Pro auf Basis der vertraglichen Vorgaben (DIN 18202, Tab. 3, Zeile 6)
- Auswertung und Erstellung eines Protokolls, Nachweis der Abweichungen mittels Falschfarbendarstellung
- Übergabe der Einzelnachweise als Basis der Gesamtauswertung an den ANbau

Nachdem alle Schalungselemente durch den Hersteller bereits auf ihre plangerechte Herstellung überprüft wurden, erfolgt auf der Baustelle durch ANGER-MEIER INGENIEURE GmbH nochmals eine Kontrolle einzelner Elemente gemäß Prüfplan des ANbau. Dieser Prüfplan umfasst ausgewählte Elemente nach dem Transport sowie nach diversen Einsatzzeitpunkten. Die Schalungselemente werden dabei an den einzelnen Kelchen permanent wieder verwendet.

3.2 Aufnahmestrategie

Im Folgenden wird exemplarisch der Prüfablauf eines Schalelementes mittels Laserscanning beschrieben.

Das einzelne Schalelement wird hierfür frei im Raum, und für die Dauer der Messung in der Position unveränderlich, positioniert. Dabei ist darauf zu achten, dass speziell bei längeren Elementen durch die Wahl der Auflagerpunkte eine Durchbiegung oder Verformung auf Grund des Eigengewichtes des Schalungselementes vermieden wird. Die Wahl der Laserscanningstandpunkte um das jeweilige zu prüfende Element erfolgt dabei so, dass speziell die Schalhaut und alle vier Seitenwände bestmöglich erfasst werden können. Die maximalen Zielweiten zwischen Laserscanner und Schalhaut betragen auf Grund der Größe der Schalelemente in der Regel nicht mehr als 10 bis 20 m.

Durch die Wahl der Standpunkte wird gewährleistet, dass i. d. R. jeder Bereich der Schalhaut des Schalelementes von mindestens zwei bis drei Standpunkten aus erfasst wird. Um das jeweilige Schalelement werden temporäre fünf bis sechs Zielmarken (i. d. R. Kugeln) verteilt, die von jedem Standpunkt des Laserscanners aus miterfasst werden. Zum Einsatz kommt hierbei der FARO Focus 3D wobei die Aufnahme mit einer Auflösung von 6 mm @ 10 m erfolgt.

In jüngster Zeit erfolgt die Erfassung der Punktwolke auf der Baustelle selbst, verstärkt mit einer sogenannten „Scanning-Totalstation“. Konkret zum Einsatz kommt hierbei das Gerät Trimble SX10.

Ein großer Vorteil dabei ist, dass eine komplette Punktwolke im gewählten Koordinatensystem, über alle Scanningstandpunkte vorliegt und direkt exportiert und weiterverarbeitet werden kann, sofern auf jedem Scanningstandpunkt eine entsprechende Stationierung im gewählten Koordinatensystem stattgefunden hat. Der Arbeitsschritt der Registrierung, wie bei einem klassischen Laserscanner, kann hierdurch entfallen.

Ein weiterer Vorteil, der sich bei der Verwendung von Scanning-Totalstationen ergibt, besteht darin, dass das Gerät auch klassisch als Tachymeter genutzt wird. Somit braucht auf der Baustelle kein Laserscanner, mit erfahrungsgemäß relativ hohen Stillstandszeiten, mehr vorgehalten werden, da die Scanning-Totalstation auch für die klassischen Vermessungsaufgaben eingesetzt werden kann.

Auch die Kombination von der Rastererfassung, also der Scanningfunktion der Scanning-Totalstation, mit der Messung bzw. Signalisierung diskreter Punkte ist ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

3.3 Auswertestrategie

Unter Verwendung des Softwarepaketes Trimble RealWorks werden im ersten Schritt die einzelnen Scans in einem frei wählbaren lokalen Koordinatensystem, über die miterfassten Zielmarken (in der Regel die lokalen Koordinaten der Zielmarken des ersten Laserscanner Standpunktes), zusammengeführt, wobei die automatische Target-Erkennung der Software zum Einsatz kommt. Die georeferenzierten Koordinaten jedes einzelnen Standpunkts werden hierbei mittels einer 6-Parameter-Transformation berechnet. Die Qualität der Georeferenzierung wird über das Registrierungsprotokoll und die darin enthaltenen Restklaffen der einzelnen Passpunkte nachgewiesen und dokumentiert. Auf Grund der kurzen Zielweiten sind hierbei 3D-Restklaffen < 2 mm die Regel.

Für die weiteren Auswertungsschritte kommt das Programm Paket 3DReshaper der Firma Technodigit zum Einsatz. Die Übergabe der Punktwolke zwischen den beiden Softwares erfolgt dabei mit Hilfe des Austauschformats „*.E57“.

Im nächsten Schritt erfolgt die Bereinigung der einzelnen Punktwolken. Hierbei werden zunächst Störpunkte durch Kantenrauschen mit geeigneten Filtern automatisch eliminiert. Alle nicht zum Schalkörper gehörenden Scanpunkte (beispielsweise Passpunkte und benachbarte Gegenstände) werden aus der Punktwolke entfernt.

Aufgrund der Durchführung der Aufnahme von unterschiedlichen Standpunkten und den daraus resultierenden Überlappungsbereichen der einzelnen Scans, liegt in der Regel eine sehr hohe Punktdichte mit einem Punktabstand von <2 mm vor. Vor der Vereinigung der einzelnen Punktwolken zu einer Gesamtpunktwolke erfolgt eine Kontrolle der Überlappungsbereiche der einzelnen Scanningstandpunkte über Schnitte. Hierbei konnten bisher keine Versätze >2 mm erkannt werden.

Technologiebedingt liegt weiterhin in der Punktwolke noch ein Distanzrauschen der einzelnen Scanpunkte an den Oberflächen vor, welches in Abhängigkeit der Reflektivitätseigenschaften und des Auftreffwinkels des Laserstrahles der gescannten Oberfläche unterschiedlich groß ist.

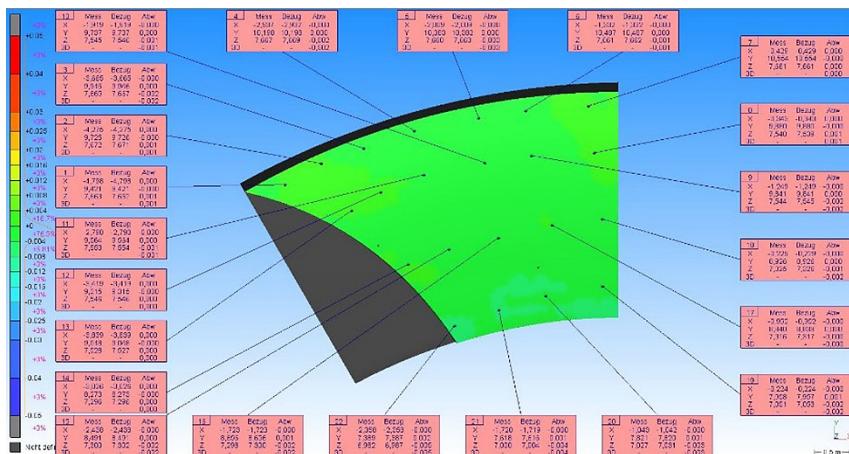
Während der Planung der Schalelemente an sich, wurde daher darauf geachtet, dass die Oberfläche der Schalhaut in einem hellen Farbton erstellt wird, so dass die Oberfläche eine möglichst gute Reflektivität aufweist. Bei Zielweiten von unter 10 m konnte dadurch ein maximales Distanzrauschen im Bereich von maximal 2 mm bis 3 mm erreicht werden.

Zur Verringerung der Punktdichte und zur Minimierung des Distanzrauschens wird die Punktwolke im nächsten Auswertungsschritt mit einem speziellen Filteralgorithmus ausgedünnt. Dabei wird ein virtuelles Raster mit einer Kachelgröße von ca. 1 cm × 1 cm über die Punktwolke gelegt. Aus allen Punkten innerhalb einer Kachel wird eine Best-fit-Ebene gerechnet. Der Scanpunkt der am nächsten zu dieser Ebene liegt wird in der Punktwolke behalten, alle anderen Punkte werden aus der Punktwolke entfernt.

Als weiteres Zwischenergebnis erhält man somit eine bereinigte Punktwolke, in welcher die besten Scanpunkte des Schalkörpers in einem lokalen Aufnahmekoordinatensystem enthalten sind.

Aus dieser bereinigten Punktwolke werden nun die Eckpunkte des Schalelementes extrahiert. Die Georeferenzierung der Punktwolke in das Zielkoordinatensystem des 3D-Modells erfolgt hierbei über eine Best-fit-Transformation. Der ursprüngliche Ansatz, die Georeferenzierung der Schalungselemente allein über die Eckpunkte des Schalungskörpers durchzuführen, musste verworfen werden, da sich in der Praxis gezeigt hatte, dass speziell die Ecken des Elementes nach mehrfacher Benutzung oder durch den Transport abgenutzt und somit nicht mehr eindeutig zu detektieren waren.

Als Referenzobjekt im Zielsystem für die Georeferenzierung dient das 3D-Modell der Schalungselemente. Dieses wird vor Durchführung der Soll-Ist-



die Vermessung der Kelche stellen hierbei eine der größten Herausforderungen im Hinblick auf die Aufbereitung der Daten, die Einrichtung der Schalung und die Dokumentation der Ergebnisse dar. Insbesondere leisten hierbei Laserscanner und Scanning-Totalstationen, wie die Trimble SX10, hervorragende Dienste. Bei Scanning-Totalstationen besteht ein wesentlicher Vorteil dabei in der Kombination einer hohen Geschwindigkeit der Rasterpunktaufnahme in einem sehr hohen Detailierungsgrad (Scanningfunktion) mit der Möglichkeit zur Messung und Signalisierung diskreter Punkte (klassische Tachymeterfunktionalität).

Letztendlich muss seitens der Vermessung die Fähigkeit entwickelt werden, mit den, durch die Freiformflächen geprägten 3D-Planungen umzugehen. Hierbei wird versucht diese schwierigen Geometrien so zu generalisieren, dass die zwangsläufig entstehenden Abweichungen für das Bauwerk unerheblich klein sind, aber gleichzeitig die Möglichkeit geschaffen wird, mit herkömmlichen geodätischen Verfahren und Softwares diese Geometrien in die Örtlichkeit zu übertragen bzw. zu erfassen und die Abweichungen darzustellen.

Kontakt

Johannes Wagner
ANGERMEIER INGENIEURE GmbH
i_PARK Klingholz 16, 97232 Giebelstadt
wagner.johannes@angermeier.de

Kinematische Vermessung des Straßenraums mit fahrendem Messsystem

Markus Kohlmann | Erich Wieser

1 Hintergrundinformationen zur Befahrung

Die Landeshauptstadt Wiesbaden führte in 2016 zum fünften Mal eine Daten erfassung zur Bewertung des Straßenzustandes (BASt 2017) eines Teiles ihrer Haupt- und ÖPNV-Strecken über eine Länge von 250 km durch. Dabei kam erstmalig ein mobiles Laserscanning als Messmethodik zum Einsatz, ergänzt um Stereomess- und Oberflächenbildaufnahmen. Die Ergebnisse dienen vorrangig

- der Darstellung des Ist-Zustands,
- der Prognose des Erhaltungsbedarfs sowie
- der Aufstellung der Bauprogramme.

Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der lasertechnischen Erfassung des Straßenraums (Punktwolken) als Grundlage für spätere Aufgabenstellungen der Stadtvermessung sowie in weiteren Fachdisziplinen Verwendung finden. Als mögliche Anwendungsfelder ist derzeit die Ableitung von 3D-Oberflächen des Straßenraums im Kontext des Aufbaus eines stadtweiten thematischen digitalen Geländemodells geplant.

Die Stadtvermessung Wiesbaden verfolgt das Ziel der Bereitstellung eines digitalen 3D-Straßenraums für Planungs- und Genehmigungsaufgaben als eine zentrale Komponente ihrer kommunalen Geobasisinformationen (z. B. im Kontext BIM). Die Auswertung der Messung für die Zustandserfassung und Bewertung des Straßenraumes gemäß BASt-Regeln ist bereits abgeschlossen.

Der vorliegende Beitrag legt den Schwerpunkt auf die zuvor genannten geodätischen Aufgabenstellungen und greift dabei Aspekte

- aus der Leistungsbeschreibung,
- der erzielten Ergebnisse und
- der geplanten weiteren Nutzung der Punktwolken auf.

2 Anforderungen an die Punktwolken (Leistungsbeschreibung)

Als Ergebnisse der mobilen Lasermessungen liegen georeferenzierte Punktwolken in Lage und Höhe (ETRS89/UTM/DHHN92) vor. Die Erfassung dieser Daten erfolgt auf dem sog. Hauptfahrstreifen, so dass sich pro Hauptfahrstreifen jeweils eine „eigene“ Punktwolke („Einzelpunktwolke“) ergibt.

Daten und Informationen für/über benachbarte Fahrstreifen werden aus den Erfassungsergebnissen des Hauptfahrstreifens abgeleitet.

Die Einzelpunktwolken werden zum einen für die Zwecke der Zustandserfassung und -bewertung im Aufgabenbereich Straßenbau und -unterhaltung genutzt. Zum anderen sollen die Einzelpunktwolken für die genannten Aufgabenstellungen in der Stadtvermessung zu einer „homogenisierten Gesamtpunktwolke“ des o. g. Straßennetzes zusammengeführt (homogenisiert) werden.

2.1 Kinematische Vermessung des Straßenraums und der Nebenflächen mittels Laserscanning

Die Koordinierung der Punktwolke wird mit Satellitenpositionierungssystemen (GNSS) und kinematischen Verfahren (inertiale Messeinheit) hinsichtlich der Lage bzw. Orientierung gestützt. Zur Erhöhung der Genauigkeit werden terrestrische Passpunkte bestimmt sowie die Höhen der Kanaldeckel genutzt.

Das mobile Laserscanning erfasst den o. g. Hauptfahrstreifen hinter dem Messfahrzeug sowie die restliche Fahrbahn einschließlich Busspur, außerdem

- den Straßenseitenraum,
- die angrenzende Bebauung,
- das Begleitgrün und die Bäume,
- das Lichtraumprofil unter Brücken sowie
- einzelne Objekte bzw. Straßenmöbel, wie z. B. Lichtsignalanlagen (siehe [Abb. 1](#)).

Der Hauptfahrstreifen ist in grün zu erkennen, während sich die übrigen Bereiche des Straßenraums in blauen Farbtönen abbilden.

Die Messungen sollen fortlaufend und unterbrechungsfrei auch über die Straßenknotenbereiche hinweg erfolgen, so dass die Straßenabschnitte mindestens zweifach (z. B. Hin- und Rückfahrt) und ggf. auch mehrfach in den Knotenpunktbereichen (siehe [Abb. 2](#) MLS-Wolke und Trajektorien) befahren werden. Die mobile Lasermessung ist so durchzuführen, dass in der homogenisierten Gesamtpunktwolke bei einem 10 m-Abstand von der Befahrungsachse drei Laserpunkte im Suchradius von 5 cm vorhanden sind, soweit keine Abschattungen bestehen, um eine ausreichende Punktdichte für spätere Auswertungen und

Anwendungen zu gewähren. Ein Beispiel ist die Detektion baulicher Anlagen im seitlichen Straßenraum außerhalb der Fahrbahnflächen.

Die Gesamtpunktwolke ist von parkenden, vorbeifahrenden bzw. überholten Fahrzeugen und Passanten zu bereinigen.

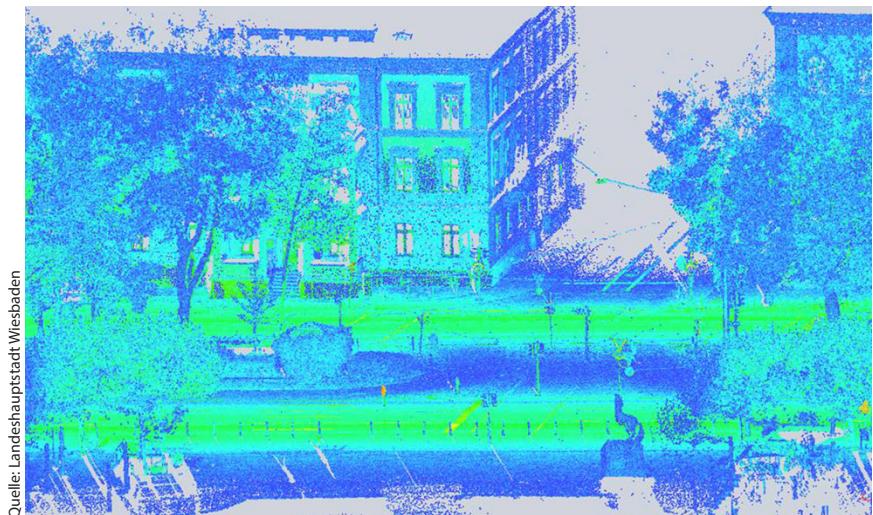


Abb. 1: Beispiel aus der Gesamtpunktwolke

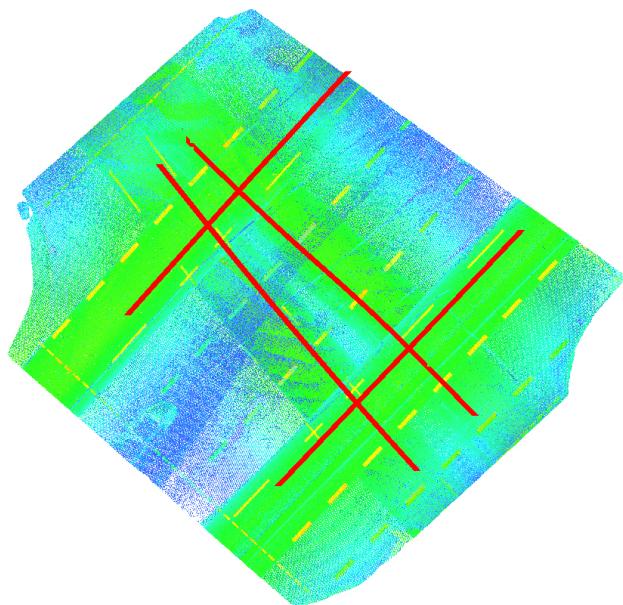


Abb. 2:
MLS-Wolke und Trajek-
toren auf Testfeld 7

Quelle: Landeshauptstadt
Wiesbaden

2.2 Die geforderten Genauigkeiten in der homogenisierten Gesamtpunktwolke

Als Lagegenauigkeit für die ins städtische Netz zu transformierende homogenisierte Gesamtpunktwolke ist ± 10 cm (1 Sigma) in einem Bereich von je zwei Metern rechts und links der Befahrungsachse gefordert. Die Befahrungsachse ist als die lotrechte Projektion der Mitte der beiden Austrittspunkte der Laserscanner auf die Fahrbahnoberfläche definiert.

Die Ergebnisse dienen der Beurteilung, ob die homogenisierte Gesamtpunktwolke z.B. für die Erarbeitung topographischer Projektgrundpläne verwendbar ist.

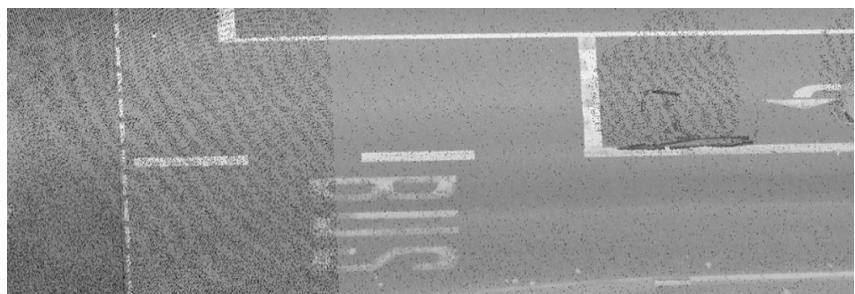


Abb. 3: Intensitätsbild mit eindeutig identifizierbaren Punkten aus einer Testbefahrung

Die Überprüfung der Ergebnisse erfolgt durch Vergleich eindeutig identifizierbarer Punkte, z.B. Ecken von Fahrbahnmarkierungen, im Intensitätsbild aus der homogenisierten Gesamtpunktwolke mit Messergebnissen aus terrestrischem Laserscanning (Abb. 3). Hierzu wurde in elf über das Stadtgebiet verteilten Straßenknotenbereichen im jeweils befahrbaren Bereich je ein Testfeld definiert.

In den sich daraus ergebenden Bereichen werden regelmäßige 5×5 cm-Raster in der Lage definiert und deren Höhenwerte interpoliert. Zur Interpolation der Höhenwerte der Rasterpunkte werden Punkte in einem Suchradius von 1 cm aus der homogenisierten Gesamtpunktwolke herangezogen. Die Differenz der Höhenwerte dieser zur Interpolation verwendeten Punkte dürfen auf ebener Oberfläche in der max-min-Differenz 2 cm nicht überschreiten. (vgl. Abb. 4). Mit dieser Vorgabe soll die Homogenisierungsqualität bzgl. der Höhenwerte geprüft werden.

Zur Vollständigkeitsprüfung des Messprogramms wird die Position des GNSS-Empfängers als Punktfolge mit max. 1 m Abstand im Format ASCII (PktrNr, Rechtswert, Hochwert, Datum, Zeitpunkt) in ETRS89/UTM/DHHN92 übergeben.

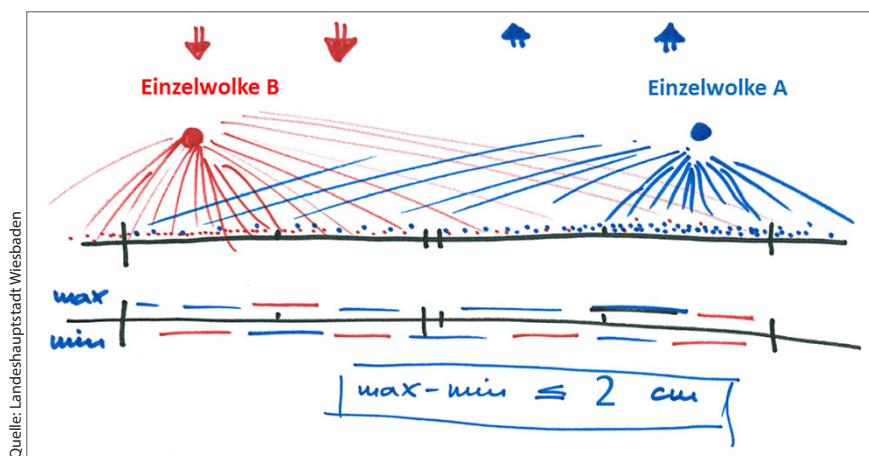


Abb. 4: Differenzen der Höhenwerte in der homogenisierten Gesamt wolke

Des Weiteren sollen an einem anderen Tag drei Straßenzüge – in jeweils beiden Fahrtrichtungen – von mindestens ca. 300 m Länge erneut in beiden Fahrtrichtungen als Kontrollstrecken erfasst werden.

Diese Kontrollstrecken dienen einer weiteren auftraggeberseitigen Qualitätssicherung. Sie werden unabhängig von den o.g. zehn Knotenbereichen gemessen und sowohl als jeweilige Einzelpunktwolken als auch als homogenisierte Gesamtpunktwolke im .las-Format dem Auftraggeber übergeben.

3 Ergebnisse auf den Testfeldern (mit TLS-Referenz)

Grundsätzlich wurden über einen Streifenlaser balkenförmig auf dem Hauptfahrstreifen sowie über einen Rotationslaser die Umgebung erfasst, bei letzterem mit einer Aussparung von 10 Grad in lotrechter Fahrbahnrichtung (Abb. 5 bis Abb. 7). Für die Testfelder wurden durch den Auftraggeber Referenzpunkt wolken mittels TLS-Messungen an Kreuzungsbereichen bestimmt. Dort werden sich überlappende/kreuzende Trajektorien und damit redundante MLS-Punkt wolken erwarten, die den Referenzpunkt wolken gegenübergestellt wurden, um die o.g. Lagevergleiche und Homogenisierungen des Auftragnehmers zu prüfen.

3.1 Ergebnis der Lagevergleiche

Wie Tab. 1 (Mittelwerte dxy) zeigt, sind insgesamt in den Prüfbereichen die Differenzen TLS-MLS kleiner als 10 cm. Die Einzelwerte variieren jedoch gegen-

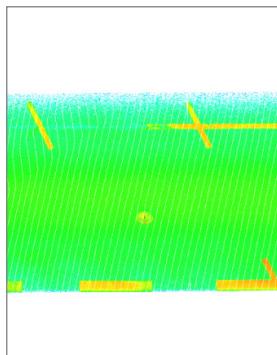


Abb. 5: Einzelwolke
Streifenlaser

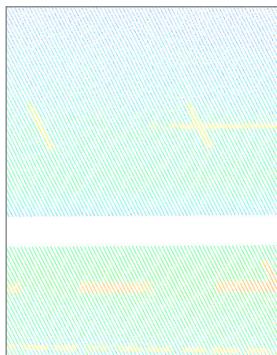


Abb. 6: Einzelwolke
Rotationslaser

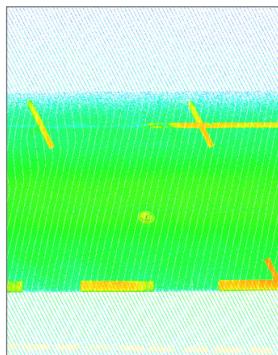


Abb. 7: Kombinierte
Einzelwolke

Quelle (alle): Landeshauptstadt Wiesbaden

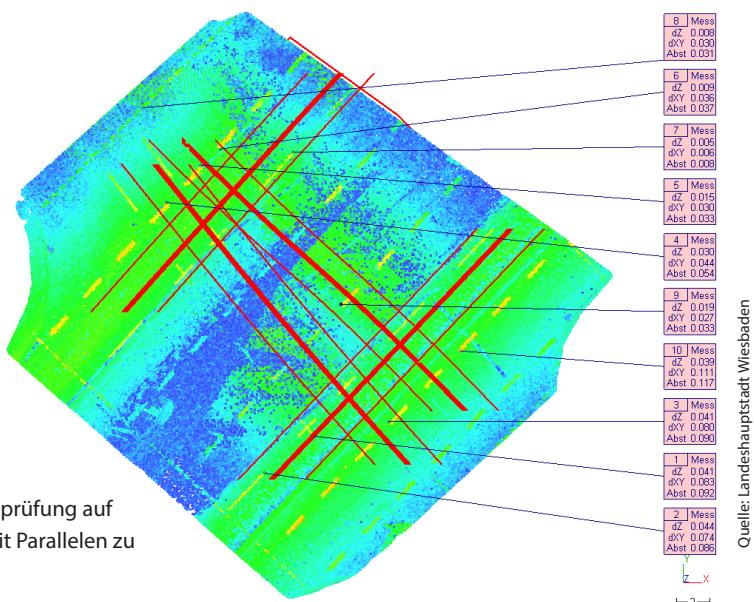


Abb. 8: Lageprüfung auf
Testfeld 7 mit Parallelen zu
Trajektorien

Tab. 1: Ergebnis der Lagevergleiche

Mittelwerte der gemessenen Differenzen je Kreuzung MLS-TLS						
Kreuzung	Mittelwert dz	Mittelwert dxy	Mittelwert Abst	emp std dz	emp std dxy	emp std abst
1	0,018	0,028	0,040	0,022	0,014	0,028
2	0,012	0,020	0,022	0,012	0,019	0,016
3	0,010	0,062	0,057	0,009	0,042	0,039
4	0,016	0,070	0,066	0,014	0,037	0,037
5	0,026	0,019	0,038	0,024	0,022	0,030
6	0,026	0,034	0,044	0,020	0,016	0,023
7	0,022	0,040	0,050	0,017	0,038	0,037
8	0,014	0,049	0,056	0,008	0,052	0,048
9	-0,007	0,062	0,048	0,017	0,029	0,038
10	0,015	0,049	0,048	0,007	0,018	0,023
11	0,019	0,043	0,054	0,023	0,027	0,026
Gesamtmittel	0,043					

3.2 Rastervergleiche innerhalb MLS, Prüfung auf hinreichende Homogenisierung

Die in den 5 cm-Raster der MLS-Wolke gefundenen Minimalwerte wurden den Maximalwerten gegenübergestellt, Alle Abstände kleiner gleich 2 cm erscheinen in der nachfolgenden Abb. 9 grün. Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der Rauigkeit hinsichtlich der der Homogenisierungsgüte auf den Testfeldern. Angegeben ist der Anteil der Differenz kleiner gleich 2 cm in Prozent.

Tab. 2: Homogenisierungsprüfung

Testfeld	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
≤ 2 cm [%]	66	60	97	91	74	70	76	96	93	99	74

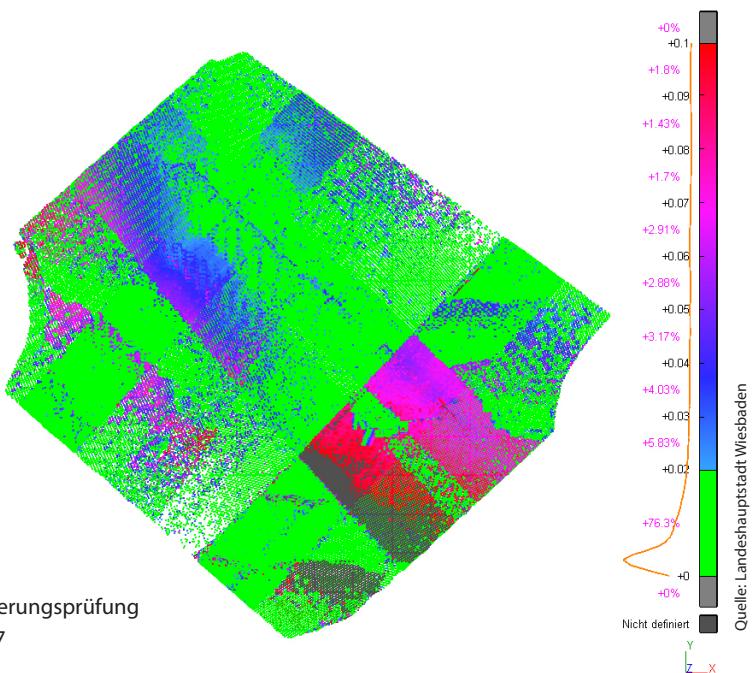


Abb. 9:
Homogenisierungsprüfung
auf Testfeld 7

3.3 Prüfung auf ausreichende Punktdichte

Eine statistische Auswertung ohne Raumbezug ist nicht zielführend, da immer wieder Bewuchs, Fahrzeuge sowie Gebäude zu Abschattungen führen können. Hierfür wurden elf weitere Bereiche ausgewählt, in welchen wenige Abschattungen zu vermuten waren. In allen elf Fällen wurde das Kriterium, drei Laserpunkte im Suchradius 5 cm im Abstand von 10 m zur Trajektorie zu finden, erfüllt, exemplarisch hierzu eine Situation am Hauptbahnhof Wiesbaden (Abb. 10). Bei weniger als drei Punkten innerhalb des Suchradius auf den Parallelen der Trajektorie wurden diese rot, bei drei Punkten gelb, bis 50 grün, darüber hinaus magentafarben dargestellt. Es handelt sich bei dieser Betrachtung um eine Kummulation der Punkte auf die (2D) XY-Ebene.

Betrachtet man eine einzige Fahrtrichtung (siehe hierzu Abb. 5 bis Abb. 7), so wird die Punktdichte typischerweise auf dem Hauptfahrstreifen mit ca. 23.000 bis 25.000 Punkten für den Balkenlaser, mit ca. 28.000 bis 30.000 Punkten inklusive des Rotationslasers, sowie mit 2000 bis 3000 Punkten je qm in der Fahrbahnmitte des Nachbarstreifens (nur Rotationslaser) abgeschätzt. Die stark schwankende Punktdichte in der homogenisierten Gesamtpunktwolke

Quelle: Landeshauptstadt Wiesbaden



Abb. 10:
Punktdichten im 10 m-Abstand
zur Trajektorie

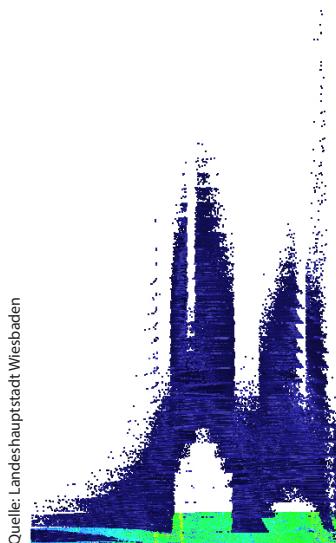
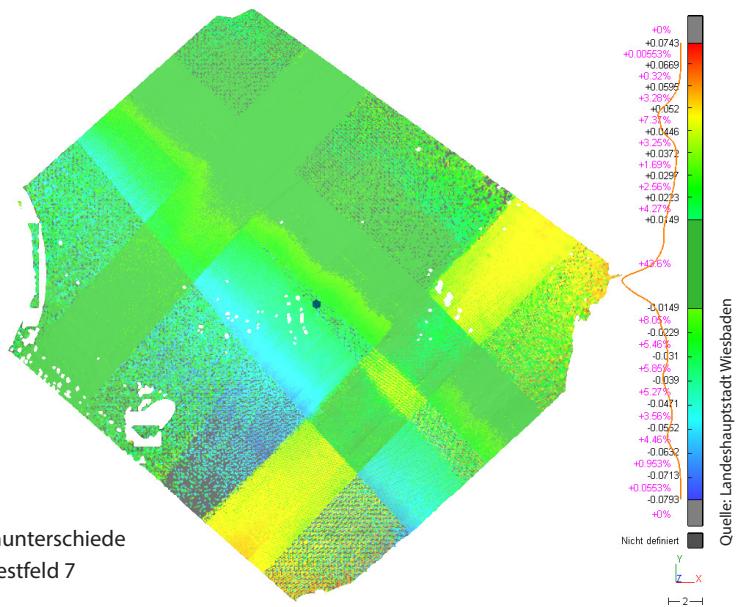


Abb. 11: Punktdichteverteilung in
blau auf der MLS-Wolke in Achs-
richtung der Trajektorien

ist von äußeren Einflüssen wie z. B. Fahrgeschwindigkeit, Topographie und Abschattung abhängig. Abb. 11 zeigt eine typische Punktdichteverteilung der homogenisierten Gesamtpunktwolke. Deutlich zu erkennen sind die Flanken des Balkenlasers, die beiden Einschnitte resultieren aus einer Aussparung bei der Erfassung durch den Rotationslaser. Am rechten Bildrand ist eine nicht plausiblere Punktdichtheäufung erkennbar, die nicht abschließend geklärt werden konnte, möglicherweise resultierend durch Reflexionen einer Baustellenbeschilderung.

Abb. 12 zeigt eine flächenhafte Betrachtung der Absoluthöhenunterschiede zwischen TLS-Referenzwolke und MLS-Gesamtwolke, bezogen auf ein lageidentisches 5×5 cm-Raster. Es zeigen sich vergleichbare Effekte wie bei der Homogenisierungsprüfung.



4 Nutzung der Punktwolke

Die Abgabe der Gesamtpunktwolke erfolgte in Kacheln je zu 250×250 m. Die insgesamt 1009 Dateien enthalten bis zu 450 Millionen Einzelpunkte, bei Dateigrößen von bis zu 0,93 GB, insgesamt ca. 73,3 Milliarden Einzelpunkte. Vor dem Hintergrund dieser Datenmengen, unter Berücksichtigung der bestehenden Hardwareausstattung, und insbesondere vor der derzeitigen Softwareumgebung ist eine manuelle Bearbeitung bzw. Verwendung der Punktwolken, z. B. im Kontext von objektbezogener topographischer Datenerfassungen, nur in Ausnahmefällen vorgesehen. Stattdessen werden derzeit die bereits eingangs genannten Nutzungen und Anwendungen der homogenisierten Gesamtpunktwolke ins Auge gefasst.

4.1 Manuelle Datenerfassungen in der CAD-Bearbeitung

Die oben genannte Prüfung der Lagegenauigkeit dient der Diskussion, ob die homogenisierte Gesamtpunktwolke für die Ergänzung topographischer Projektgrundpläne verwendbar ist. Unmittelbar im Bereich des Streifenlasers lassen sich beispielsweise Gas- und Wasserschieber erkennen, außerhalb nicht.

Im Falle von Genauigkeiten größer 10 cm wird keine Verwendung in Betracht gezogen.

Projektgrundpläne, die von der Stadtvermessung Wiesbaden für die verschiedenen Amtsbereiche angefertigt werden, finden Verwendung in den Phasen Entwurfs- und Ausbauplanung. Hier sei daher noch ein Hinweis auf die Information zur Genauigkeit der Geodaten der Landeshauptstadt Wiesbaden, im Sinne eines „Beipackzettels“, der jeder Datenabgabe beiliegt, gegeben. Dort heißt es: „Für Entwurfsplanungen sind örtliche Überprüfungen und Ergänzungsmessungen zwingend notwendig.“

Nahezu alle Planungen finden im detailreichen bebauten Stadtgebiet statt. Zur Entwurfsplanung ist eine entsprechende topographische Kleinteiligkeit angefragt, etwa die Erfassung einer Vielzahl von Objekten der Straßenmöblierung oder auch konkret ergänzende Gebäudeinformationen. Daher ist die Lagegenauigkeit der Gesamtwolke grundsätzlich vor einer Verwendung durch einen Ortsvergleich zu prüfen.

Die hier betrachteten Daten sind bereits veraltet (zwei Jahre), so dass aus diesem Grund ein Ortsvergleich geboten ist.

Auch weitere aktuelle Erfahrungen aus Projekten im Wiesbadener Verkehrsraum in unterschiedlichen Größenordnungen mit internen und externen Kunden belegen, dass von der Erfassung und Konstruktion in Punktwolken des Straßenraums derzeit noch abgesehen wird. Die Methode wird derzeit als zu zeitaufwendig und unwirtschaftlich angesehen. Stattdessen werden klassische Topographieaufnahmen mit Einzelpunktaufnahmen angefordert.

4.2 Erstellung von Längs- und Querprofilen zur Modellierung der 3D-Trassenkörper

Im Gegensatz zu privatwirtschaftlicher Bauherrenschaft, die zuvor beschlossene Projekte umsetzt, werden in der Planungsabteilung häufig Entwürfe benötigt, deren Realisierung nicht immer sichergestellt ist. Aus der Gesamtpunktwolke können schnell Längs- und Querprofile abgeleitet werden, um Trassenkörper zu erstellen, die für den Umsetzungsfall durch örtliche Vermessung ergänzt werden. Der übliche BIM-Ansatz, ein bereits zu Beginn möglichst abschließendes Bestandsmodell zu erhalten, ist hier nicht gegeben, was wiederum eine dynamische Trassenkörpermodellierung erfordert.

4.3 3D-GIS-Anlaysen

Es sollen weitestgehend automatisierte Analyse- und Modellierungsalgorithmen zum Einsatz kommen, um aus den vorliegenden Massendaten Flächenrückführungen zu generieren. Eine sinnvolle Reduktion der Punktmengen ist die eigentliche Herausforderung, was sich beispielsweise an Extrusionen von Lichtraumprofilen zeigte. Alleinstellungsmerkmal ist hier die Vollständigkeit der Erfassung des Straßenraums, insbesondere hinsichtlich Vegetation, Bäume etc. (siehe Abb. 1).

4.4 Automatisierte Detektion baulicher Anlagen im Straßenraum

Die Stadtvermessung Wiesbaden verfolgt das Ziel der Bereitstellung eines digitalen 3D-Straßenraums für Planungs- und Genehmigungsaufgaben (z. B. im Kontext BIM) als eine zentrale Komponente ihrer kommunalen Geobasisinformationen.

Hierzu wurde mit dem Aufbau eines thematischen DGM für die Straßenräume, Freiflächen und Außengebiete der Landeshauptstadt Wiesbaden begonnen. Dieses DGM basiert auf einer Zusammenführung und nachfolgender Modellierung verschiedener städtischer Geoinformationsressourcen wie ALS-Daten, Vektorinformationen der Stadtgrundkarte aus den Bereichen der Straßentopographie (Abb. 13), Fachobjekten des Straßen- und Grünflächeninformationsystems sowie aus AKLIS-Nutzungsarteninformationen. Erste Einsatzbereiche



Abb. 13: Flächenhafte Darstellung der Straßentopographie

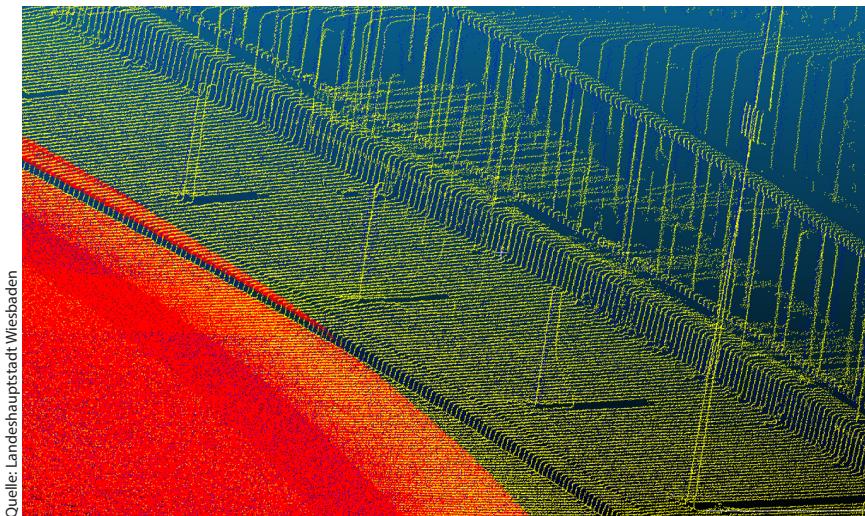


Abb. 14: In homogenisierter Gesamtwolke erkennbare bauliche Anlagen im Straßenraum

sind die Bereiche Stadtentwässerung und hydraulische Abflussmodellierungen. Im Arbeitsbereich der Verfasser finden derzeit die klassifizierten ALS-Punkt-wolken und daraus abgeleitete Höhenraster zur flächigen Vervollständigung von Höheninformationen bei topographischen Aufnahmen Verwendung.

Derzeit wird die Oberflächenmodellierung der Straßenraums mit Default-Werten modelliert, im Sinne eines LoD1; d.h. dass z. B. eine (1!) Bordstein-höhe im gesamten Stadtgebiet angenommen wird. Zur Ergänzung und Vervoll-ständigung bzw. zur weiteren Detaillierung des DGM des Straßenraums sollen die MLS-Ergebnisse herangezogen werden.

Es ist aufgrund der einerseits von parkenden Autos befreiten Punktfolge und andererseits der sich durch sonstige Objektschatten ergebenden „Lücken“ mit einer eingeschränkten Nutzung zu rechnen. Dennoch wird eine wissensbasierte Detektion baulicher Anlagen im/zum Straßenraum (reale Höhen der Bordsteine, Mauern als Regelkörper oder Gebäudezufahrten) aus der homogenisierten Gesamtpunktfolge unter Verwendung bereits gegebener Vektorinformationen aus der Stadtgrundkarte als erfolgversprechend angesehen (Abb. 14).

Zur Vervollständigung des 3D-Stadtmodells wird dieses thematische DGM um die Gebäudemodelle sowie um die Leitungsnetze ergänzt.

5 Zusammenfassung und Fazit

Die unter Kap. 4 ausgeführten Betrachtungen beziehen sich auf die aus mobilen Laserscanning-Aufnahmen erzeugte homogenisierte Gesamtpunktwolke mit einer Länge von über 250 km. Es erlaubt damit keinen Anwendungsvergleich mit projektspezifischen oder objektbezogenen Laserscanning-Aufnahmen, wie sie z. B. im Rahmen von BIM-Infrastrukturprojekten zur Anwendung kommen.

Die Modellierung der homogenisierten Gesamtpunktwolke ergab folgende Ergebnisse: Die Kriterien:

- Lageabweichung kleiner gleich ± 10 cm (1 Sigma) in einem Bereich von je zwei Metern rechts und links der Befahrungsachse wurde eingehalten.
- Homogenisierung der Einzelpunktwolken zur homogenisierten Gesamtpunktwolke, so dass auf einem 5×5 cm-Raster in einem Suchradius von 1 cm die min-max-Differenzen 2 cm nicht überschritten werden, wurde auf den Testfeldern mit 1 Sigma eingehalten.
- Die geforderte Punktdichte in einem Abstand von 10 m zur Befahrungsachse ist gegeben.

Die Datenerfassung erfolgte im Rahmen einer Straßenzustandserfassung. Hinsichtlich einer vorgesehenen weiteren interdisziplinären Nutzung der Punktwolke sind die Ergebnisse differenziert zu betrachten. Die Gesamtpunktwolke

- ist kein Ersatz für klassische TOP-Aufnahmen,
- dient der Ergänzung des 3D-Stadtmodells um bauliche Anlagen im Straßenraum und
- ist nutzbar für 3D-Geoanalysen im digitalen 3D-Straßenraum; jedoch erst nach vorherigem Ortsvergleich.

Literatur

BASt – Bundesanstalt für Straßenwesen (2017): www.bast.de/BAST_2017/DE/Strassenbau/Fachthemen/gs4-zeb.html, letzter Zugriff 09/2018.

Kontakt

Markus Kohlmann | Prof. Dr.-Ing. Erich Wieser
Landeshauptstadt Wiesbaden, Tiefbau- und Vermessungsamt
Gustav-Stresemann-Ring 15, 65189 Wiesbaden
markus.kohlmann@wiesbaden.de | erich.wieser@wiesbaden.de

Session 4: Aktuelle Anwendungen und Themen

Flexibles Scanning bei der Meyer Gruppe – zwischen Karibik und Werftstandorten

Ralph Zimmermann

1 Vermessung innerhalb der Meyer Gruppe

Der Fachbereich Vermessung betreut die Produktion der Schiffe, von der Anlieferung des Stahls bis zur Übergabe des Schiffes. Ein Großteil der Vermessungsaufgaben ist in der Qualitätssicherung zu finden. Gerade auch deshalb ist die MEYER Gruppe Eigentümer von mehr als zehn unterschiedlichen Laserscannern. In der komplexen Produktion ergeben sich immer wieder neue Herausforderungen.

2 Herausforderungen in der Industrievermessung

Die Besonderheit in dem Umfeld der MEYER Gruppe ist das Produkt, das komplexe Schiff. Ob ein Kreuzfahrtsschiff, ein Schiff für eine Flusskreuzfahrt, ein Forschungsschiff oder ein Gastanker, bei allen Projekten steht das Q-K-T im Fokus (Qualität-Kosten-Termine). Für die vermessungstechnische Betreuung dieser Großprojekte stellen wir uns mit den neuesten Technologien auf und versuchen immer auf dem Stand der Technik zu bleiben, um unsere Kunden optimal betreuen zu können. Bis 2024 ist die Werftengruppe ausgelastet und wir wollen unseren Beitrag dazu leisten weiter erfolgreich zu sein.

3 Beispiele aus dem Laserscanning

Im Folgenden wird die Bedeutung des Laserscannings im Schiffbau anhand von drei Praxisbeispielen dargestellt.

3.1 Aufmaß der Halle 4 mittels HDS7000

Für einen geplanten Umbau einer Schiffbauhalle wurde zunächst eine Aufnahme der Ist-Situation ohne nähere Spezifikation bei der Vermessung angefordert. Bei der intern bezeichneten Halle 4 handelt es sich um eine seit 1974 existierende

Schiffbauhalle, die den Grundstein des „neuen Standorts“ der MEYER WERFT am Stadtrand Papenburgs legte. Die Position der Halle 4 auf dem Werftgelände ist in Abb. 1 markiert. In den letzten Jahren wurden in dieser Halle hauptsächlich spezielle Blöcke und Bauteile gebaut, die aufgrund ihrer Besonderheiten eine längere Fertigungszeit in Anspruch nehmen. Um hier eine Fließfertigung aufzubauen zu können, sollte die Halle um ca. 100 Meter verlängert und um weitere Krananlagen ergänzt werden, wie in Abb. 2 dargestellt.

Da zum geplanten Zeitpunkt der Bestandsaufnahme nicht definiert war, welche Informationen letztlich benötigt werden, wurde sich für eine umfangreiche Dokumentation mittels Laserscanning entschieden. Die Motivation war eine

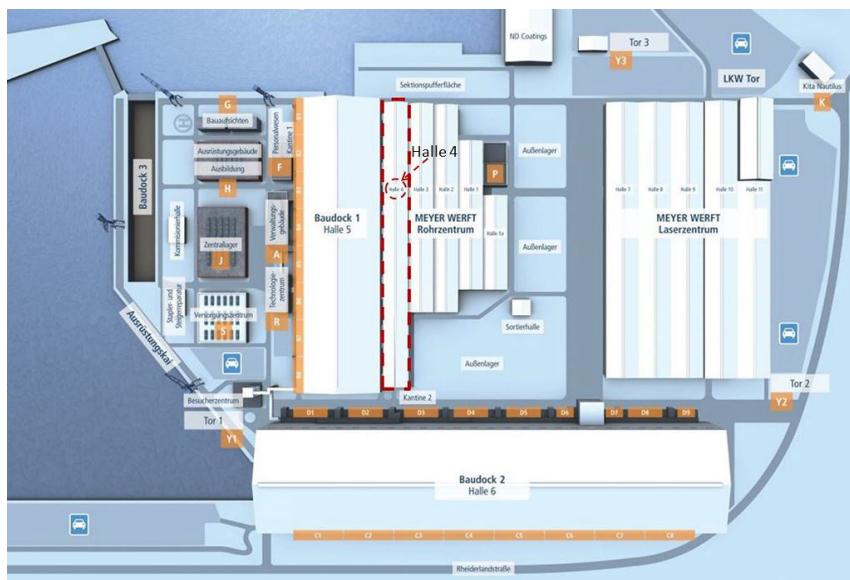


Abb. 1: Halle 4 auf dem Werftgelände

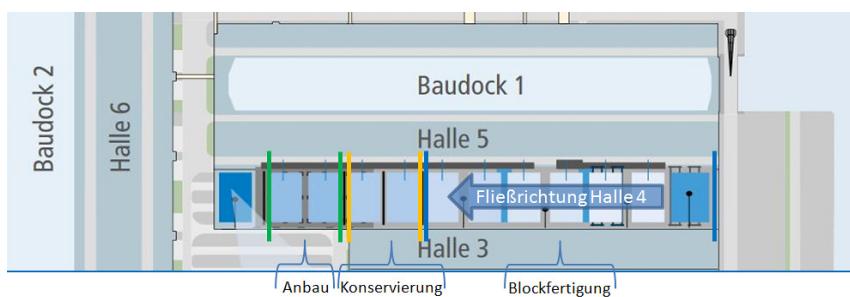


Abb. 2: Fließfertigungskonzept Halle 4



Abb. 3:
Laserscanner Leica
HDS7000 im Einsatz
auf der MEYER
WERFT

As-built-Aufnahme zu generieren um eine vielfältige Weiterverarbeitung der Daten zu ermöglichen – hier stand der „BIM-Gedanke“ im Vordergrund.

Hierzu wurde zunächst ein lokales Anschlusspunktnetz mittels Klebemarken und Bolzen auf dem Hallenboden sowie Zielmarken an den Stahlträgern aufgebaut und mit einer Leica Viva TS16 Totalstation eingemessen. In den lokalen Scanbereichen wurden daraufhin Black & White-Targets eingebracht und ebenfalls tachymetrisch bestimmt. Auf Basis eines separaten Nivellements wurde der Höhenbezug der Anschlusspunkte und Black & White-Targets zu Normalnull hergestellt.

Um die Umgebung möglichst frei von Abschattungen zu erfassen, musste die Belegung der Halle durch Großbauteile berücksichtigt werden. Die Aufnahme konnte somit nicht in einem vorgegeben Raster vorgenommen werden, sondern musste stets an die Gegebenheiten in der Fertigung angepasst werden. Die eigentliche Aufnahme erfolgte mit dem Laserscanner Leica HDS7000 (Abb. 3) und umfasste ungefähr 70 Scanstandpunkte. Die Registrierung der Einzelscans erfolgte anschließend mit der Punktfolkenverarbeitungssoftware Leica Cyclone auf Basis der tachymetrischen Messung. In Abb. 4 ist das abgewickelte Intensitätsbild eines Scans zu sehen und in Abb. 5 die registrierte Punktfolke mit den eingemessenen Targets dargestellt.

Um allen involvierten Mitarbeitern und Partnerunternehmen die Scandaten möglichst einfach zugänglich zu machen, erfolgte die Datenbereitstellung im ersten Schritt in Form einer TruView. Der verlinkte Übersichtsplan ist in Abb. 6 zu sehen. Mithilfe eines Browserplugins hatte nun jeder die Möglichkeit die Punktfolke aus Standpunktsicht (Abb. 7) zu betrachten und erste Bewertungen vorzunehmen.



Abb. 4: Abgewickeltes Intensitätsbild eines Scans

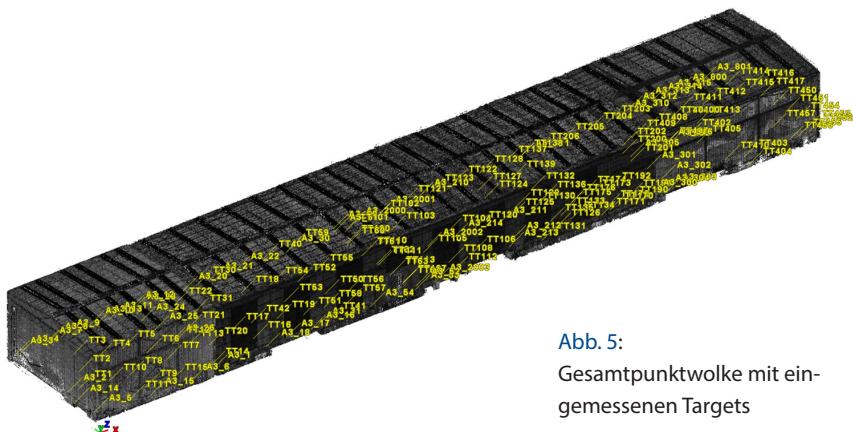


Abb. 5:
Gesamtpunktwolke mit ein-
gemessenen Targets

Für die Ermittlung der benötigten Mengen an Ausgleichsmasse für das Leveling des Hallenbodens wurde zudem eine Oberflächenanalyse mit der Software Geomagic Control vorgenommen und als Falschfarbenbild bereitgestellt, wie in Abb. 8 zu erkennen. Alle weiteren Ergebnisse, wie ausgedünnte Punktwolken für Querschnitte oder eine Vermaschung der Bodenfläche wurden dem mit dem Umbau beauftragten Ingenieurbüro im Laufe des Projektes bedarfsgerecht bereit gestellt.



Abb. 6: TruView-Standpunktübersicht

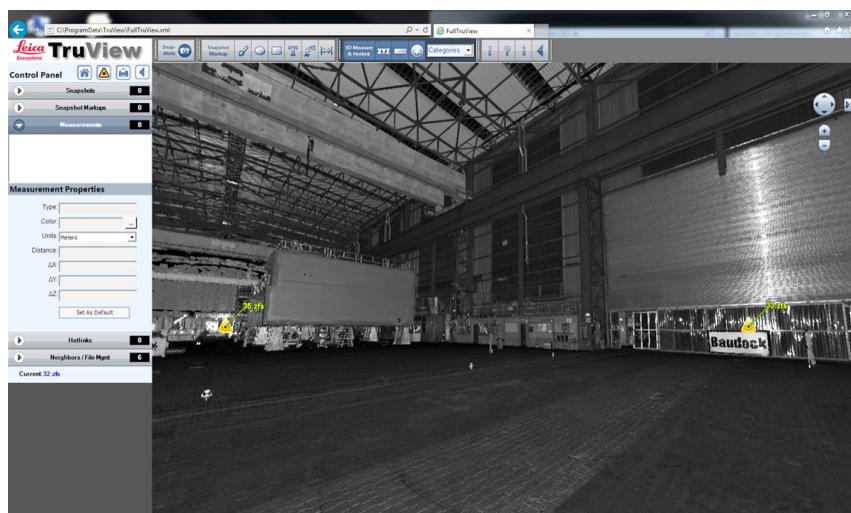


Abb. 7: TruView-Scan aus Standpunktsicht

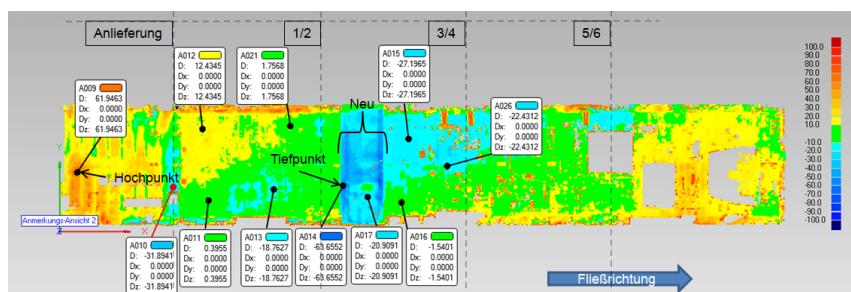


Abb. 8: Oberflächenanalyse Halle 4

3.2 Deformationsanalyse der Bugwulst mittels DPI-8

Nach einem leichten Zusammenstoß des Kreuzfahrtschiffes World Dream mit einem Container während einer Einstellfahrt kam die Vermutung auf, dass eine Deformation der Bugwulst ([Abb. 9](#)) vorliegen könnte. Aufgrund des trüben Wassers ließ sich unter Einsatz eines Tauchers von außen nur eine vage Aussage treffen. Eine Einschränkung der Materialeigenschaften konnte nach Prüfung durch



Abb. 9: Bugwulst der World Dream

das Werkstoffprüflabor zwar ausgeschlossen werden, aber um ein reibungsloses Strömungsverhalten zu gewährleisten, sollte die Deformation ausgebessert werden. Eine Aussage über die geometrische Abweichung wurde innerhalb von 24 Stunden erwartet.

Für die vermessungstechnische Aufnahme der Deformation kam ein Großteil der verfügbaren Vermessungsinstrumente aufgrund der Örtlichkeit nicht in Frage. Die erste Hürde war die Zuwegung, denn der Weg zur Bugwulst führt durch den Rumpf des Schiffs unter dem Maschinendeck – das sind ca. 100 Meter Wegstrecke im Doppelboden. Der begehbar Steg ist schmal, feucht und rutschig, Beleuchtung gibt es keine und viele enge Mannlöcher müssen passiert werden. Das Equipment sollte einhändig transportierbar sein, so dass ein Festhalten gewährleistet werden kann. Doch auch das Innere der Bugwulst bietet kaum Platz für Bewegungen oder zum Beispiel das Aufstellen eines Stativs.



Abb. 10: Handscanner DotProduct DPI-8 im Einsatz auf der MEYER WERFT

Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen und dem Vorhaben eine flächige Aufnahme zu erzeugen, wurde sich für die Einsatz des Handscanners DotProduct DPI-8 entschieden. Der zu untersuchende Bereich wurde mittels mobiler Akkustrahler ausgeleuchtet und die Bugwulst großzüig im Bereich der Deformation aufgenommen. Eine visuelle Kontrolle der erfassten Daten war auf dem Tablet bereits während der Aufnahme gegeben, wie auch beispielhaft in Abb. 10 zu sehen.

Die Scandaten ließen sich nach einem Exportvorgang direkt in Geomagic Control importieren und mittels Best-fit-Ausrichtung auf das CAD-Modell der Bugwulst transformieren (Abb. 11). Auf Basis eines 3D-Vergleichs konnte eine Aussage über die Einbeultiefe von ca. 20 Millimetern und dem Ausmaß der Deformation getroffen werden (Abb. 12).

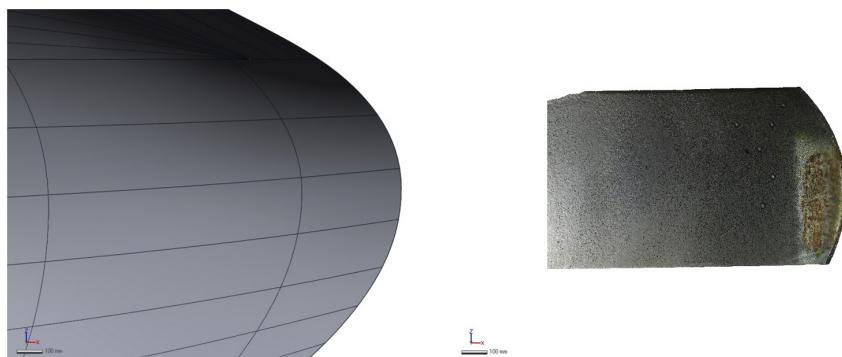


Abb. 11: CAD-Modell und Scan der Bugspitze

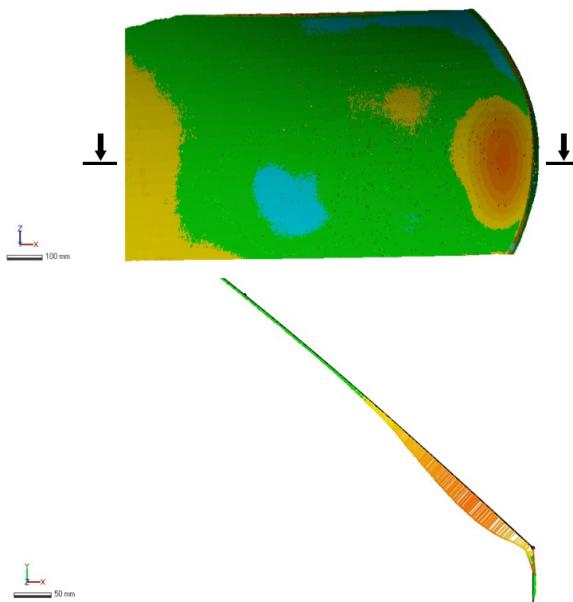


Abb. 12:
Falschfarbenbilder 3D-Vergleich und 2D-Schnitt der Deformation

3.3 Dokumentation des Ocean Boulevard mittels BLK360

Nachdem das Kreuzfahrtschiff Norwegian Breakaway auf dem Weg nach New York in einen heftigen Sturm geraten ist, musste ein großer Teil der Deckenstruktur auf dem Ocean Boulevard (Abb. 13) aufgrund von Beschädigungen ausgetauscht werden. Für den Einbau der neuen Deckenpaneelle gab es nur ein kurzes Zeitfenster während eines Dockungsvorgangs in Frankreich. Somit sollten die Paneele bereits passgenau vorgefertigt und vor Ort ohne Anpassungen eingebaut werden.

Während der geplanten Vermessung sollte die Norwegian Breakaway zunächst an der Karibikinsel Aruba anliegen. Aufgrund des hohen Vorbereitungs- und Reiseaufwands musste sichergestellt werden, dass geometrische Informationen auch zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt werden können. Für einen Gesamtüberblick und zur Absicherung der tachymetrischen Aufnahme wurde sich für eine Dokumentation in Form einer Punktwolke entschieden. Mit dem Laserscanner Leica BLK360 (Abb. 14) und der mobilen App Autodesk ReCap konnte der Rüstaufwand gering gehalten werden, da das Equipment entsprechend kompakt ist und eine Cloud-to-Cloud-Registrierung bereits während der Aufnahme in der Software vorgenommen werden kann. Der Scanvorgang



Abb. 13: Ocean Boulevard der Norwegian Breakaway

konnte bereits vor der Lagebesprechung gestartet und vor der Überfahrt nach Curaçao abgeschlossen werden.

Zusätzlich zu den Protokollen der tachymetrischen Analysen wurden dem Innenausbauer die Scandaten in Form von TruViews bereitgestellt, die als Dokumentation und Diskussionsgrundlage genutzt wurden. Ein Ausschnitt der grob bereinigten Punktfolke des Ocean Boulevard ist in Abb. 15 zu sehen.



Abb. 14:
Laserscanner Leica
BLK360 im Einsatz
auf der MEYER
WERFT



Abb. 15: Punktfolie des Ocean Boulevard

4 Zusammenfassung

Diese drei unterschiedlichen Scanaufgaben zeigen doch deutlich die Bedeutung des TLS, gerade auch in der Ingenieurvermessung.

Komplexe Gebäudedaten können präzise erfasst und für weitere Analysen bereitgestellt werden.

Durch die systematische Weiterentwicklung der Sensoren profitiert der Anwender. So ist die Technik in den letzten Jahren leicht, handlich und anwenderfreundlich geworden.

Der Anwendungsfall in der Karibik zeigt die hohe Flexibilität der modernen Scanner. Stromversorgung, Größe, Transportmöglichkeit und die Qualität des Scandaten ermöglichen völlig neue Einsatzmöglichkeiten, gerade auch um einen Gesamtüberblick zu erfassen.

Kontakt

Ralph Zimmermann
MEYER WERFT GmbH & Co. KG
Industriegebiet Süd, 26871 Papenburg
ralph.zimmermann@meyerwerft.de

TLS-basierter Ansatz zur Optimierung des Bauraums für die Nachrüstung technischer Anlagen in beengten Treppenhäusern

Marten Jeschky | Michael Geist | Thorsten Fichtler | Lisa Knaack

1 Einleitung

Dieser Beitrag behandelt die Entwicklung einer Mess- und Auswertestrategie zur Analyse von Treppenhäusern. Das entwickelte Konzept findet Anwendung bei der nachträglichen Integration von Aufzugsanlagen in Bestandsbauten. Das Fraunhofer IGP optimiert im Rahmen des Projekts „Aufzug 4.0“ die vom Krassow-Firmenverbund patentierte Methode der *innenliegenden Aufzugsanlage*. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Reduzierung der Einbauzeit und die Gewährleistung der vollständigen Barrierefreiheit durch die Verwendung eines digitalen Datenflusses. Auf Basis von terrestrischen Laserscandaten sollen dafür der optimale Bauraum, die geometrischen Parameter des geplanten Aufzugschachtes und die erforderlichen Anpassungsarbeiten für eine messbegleitende Fertigung abgeleitet werden.

Die hier betrachteten Schwerpunkte sind:

- Untersuchungen zur Ableitung eines Messunsicherheitsbudgets des FARO Focus 3D X130 (Einfluss von Strecken- und Richtungsmessung, Kompensatorrestfehler sowie Punkterkennungsfehler),
- Messaufbau und Auswertestrategie,
- Modellierung der Messdaten als Planungsgrundlage für die Anwendung der BIM-Methode.

In dem Standardfall der Ingenieurgeodäsie würde die Bestandsaufnahme durch eine Lotung oder ein äußeres Netz unterstützt werden. Die Herausforderung besteht in der Bewältigung eines Spezialfalles, da überlappende Treppenläufe eine Lotung verhindern könnten und das Konzept ohne großen Schulungsaufwand von der Baufirma verwendet werden soll.

2 Das Konzept: barrierefreier Aufzug

Bestandsgebäude barrierefrei und altersgerecht umzubauen, stellt eine große Herausforderung für Betreiber und Eigentümer von Liegenschaften dar. Nachträgliche Installationen von Aufzugsanlagen bringen langwierige Mess- und Montagprozesse mit sich und behindern den Wohnungszugang der Mieter. Bisherige Nachrüstungen von Fahrstühlen werden durch einen Anbau vor das Wohngebäude realisiert. Da der Anbau an das Treppenhaus angrenzt, muss weiterhin ein Treppenlauf überwunden werden, um die Wohnräume zu erreichen. Auch das Kellergeschoss kann durch einen, von außen angebauten Aufzug nicht erreicht werden.

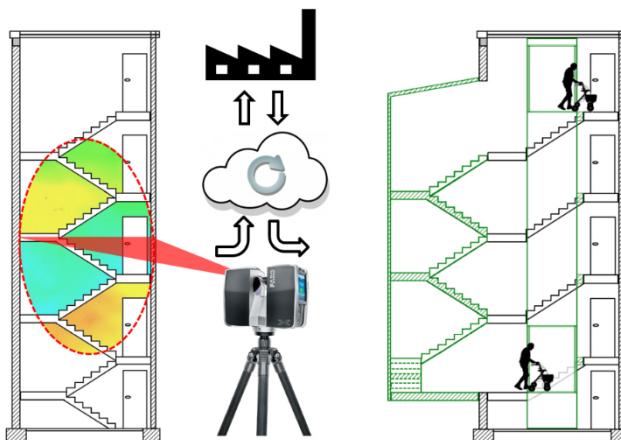


Abb. 1:
Messtechnische Be-
gleitung der Ferti-
gung und Montage
durch BIM-fähiges
Konzept

Die vollständige Barrierefreiheit wird durch den Einbau einer innenliegenden Aufzugsanlage erreicht. Dafür wird eine Treppenhauseite durch den Aufzugschacht ersetzt und mittels Modulbauweise in einem Außenanbau rekonstruiert. Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse und der Anforderung möglichst geringer Bauzeiten ist die Schaffung einer digitalen Planungsgrundlage erforderlich.

Basierend auf 3D-Messdaten, bietet die Bestandsaufnahme einen einheitlichen Informationsfluss für alle am Bau beteiligten Gewerbe (**Abb. 1**).

3 Genauigkeitsuntersuchung

Die Realisierbarkeit des Vorhabens wird über den Vergleich von Referenz- und Testmessungen bewertet. Untersucht werden der FARO Focus 3D X130 und der Z+F Imager 5010. Die Anforderungen liegen dabei auf einer präzisen und

lotrechten Bestandsaufnahme, deren Akquise und Auswertung ohne großen Schulungsaufwand realisiert werden kann.

3.1 Innere und äußere Genauigkeit

Im ersten Schritt der Untersuchungen erfolgte der Aufbau eines Referenznetzes zur Beurteilung verschiedener Mess- und Auswerteansätze. Dafür wurden die Referenzpunkte zunächst mittels Lastertracker eingemessen und im weiteren Verlauf über magnetische Schachbrettadapter mittels FARO- und Z+F-Laser-scanner aufgenommen. Die Messungen erfolgten mit ein- und ausgeschalteten Kompensator. Anschließend wurden die Passpunkte aus allen ausgewerteten Punktwolken exportiert und den Referenzkoordinaten gegenübergestellt. Die Beurteilung der *inneren Genauigkeit* erfolgt über die Transformationsresiduen einer überbestimmten 3D-Helmert-Transformation¹ ohne Maßstabsfaktor, in Anlehnung an Wasmeier (2017). Da der zu ermittelnde Aufzugsschacht lotrecht verlaufen soll, muss auch die Punktwolke zum Lot ausgerichtet werden. Diese Datumsproblematik wurde zunächst über die Transformationsresiduen einer 2,5D-Helmert-Transformation² abgeschätzt. Nach Großmann (1969) entsprechen die Werte in Tab. 1 dem Streuungsmaß s der Transformationswidersprüche d .

$$s = \sqrt{[dd] \cdot (3n - u)^{-1}}$$

Bei n Punkten berechnen sich die Freiheitsgrade durch $f = 3n - u$, wobei $u_{3D\{\omega, \phi, \kappa, dx, dy, dz\}} = 6$ und $u_{Lot\{\kappa, dx, dy, dz\}} = 4$. Für das Ausgleichungsmodell der Helmert-Transformation werden gleichgenaue und unkorrelierte Beobachtungen angenommen, über deren Verteilungsfunktion keine Aussage gemacht wird.

Tab. 1 zeigt eine zusammengefasste Übersicht der Auswertungen. Zu erkennen ist, dass bei den Z+F-Auswertungen keine Kompensation berücksichtigt wurde. In einem direkten Gespräch mit der Zoller & Fröhlich GmbH klärt sich die Fragestellung der Kompensatorfunktion.

Der verbaute MEMS-Sensor verfügt ab dem Serienmodell IMAGER5010C über die Möglichkeit der dynamischen Kompensation. Der IMAGER5010 verfügt als Vorgänger zwar über den gleichen Sensor, jedoch nicht über die entsprechende Software zur Ansteuerung, welche die dynamische Kompensation regelt. Gegen einen Aufpreis kann dieses Problem durch ein Firmware Update gelöst werden. Da kompensierte Daten für die Bearbeitung des Projektes unabdingbar

¹ 3D-Helmert Transformation: 6 Parameter ($\omega, \phi, \kappa, \Delta x, \Delta y, \Delta z$)

² 2,5D-Helmert Transformation: 4 Parameter ($\kappa, \Delta x, \Delta y, \Delta z$)

Tab. 1: Standardabweichung der Transformationsresiduen zwischen Referenzsystem und Auswertungsergebnissen

		Laserscanner		ZF 5010		FARO		Bemerkung	
				Stabw. der Residuen [mm]					
		Auswertemethode		3D	2,5D	3D	2,5D		
Ohne Kompensator	Zielmarken			1,0		4,5		4 Marken/ Standpunkt	
	Zielmarken und Ebenen			0,9		2,8			
Mit Kompensator	Zielmarken		1,0	2,8		2,8	2,7	≥ 5 Marken/ Standpunkt	
	Zielmarken und Ebenen		0,8	x		2,2	2,2		

sind, beschränkt sich dieser Beitrag auf die Auswertungen des FARO-Laserscanners. Bei der FARO-Auswertung ist ein deutlicher Unterschied zwischen den kompensierten und unkompensierten Datensätzen zu erkennen. Die zusätzlichen Beobachtungen des Neigungssensors bewirken eine deutliche Steigerung der inneren und äußeren Genauigkeit.

Die Angabe der Standardabweichung der Transformationsresiduen beschreibt jedoch lediglich wie gut die exportierten Objektpunkte in das Referenzsystem eingepasst werden können. Der Einfluss des softwareseitigen Punkterkennungsfehlers, des Kompensatorrestfehlers und sonstiger Einflüsse kann aus den absoluten Abweichungen nicht modelliert werden. Um die Unsicherheitseinflüsse voneinander zu trennen wurde anschließend ein Kompensator-Prüffeld aufgebaut.

3.2 Untersuchung des Kompensator- und Punkterkennungsfehlers

Für die genaue Untersuchung des FARO-Kompensators wurde in Anlehnung an den Versuch von Mechelke und Kersten (2008) ein kreisförmiges Messfeld abgesteckt. Dabei wurden alle 30°, insgesamt 12 Stative grob auf die gleiche Höhe abgesteckt. Der Aufbau ähnelt einer Uhr, in deren Zentrum nacheinander ein DAN03-Nivellier, der FARO Focus 3D und ein Leica TS15 Tachymeter aufgebaut werden. Nach der Messung der Soll-Höhen mittels Nivellier, erfolgt die

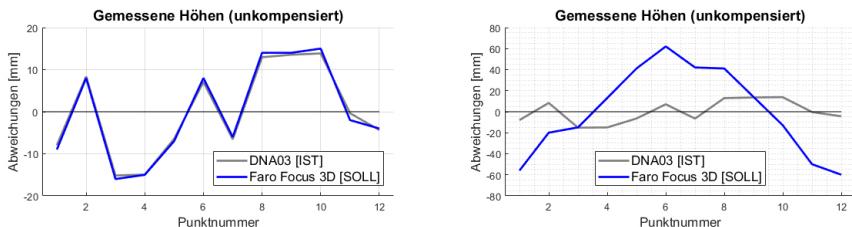


Abb. 2: Auswertung der Kompensatorprüfung: reduzierte Höhen (links: kompensierte Daten; rechts: unkomplizierte Daten)

Messung der Ist-Höhen mittels Laserscanner. Das Messfeld wird einmal mit und einmal ohne Kompensation gescannt. Abschließend werden die Targets über reflektorlose TS15-Messungen als übergreifende Kontrolle eingemessen.

Gemäß Abb. 2 werden die reduzierten Soll- und Ist-Höhen einander gegenübergestellt. Die Standardabweichung der Differenz zwischen Nivellier und kompensierter FARO-Messung aus Abb. 3 (links) beträgt 0,9 mm. Diese Differenz beinhaltet für jeden Punkt einen Punkterkennungsfehler ε_p und den Fehler der Restneigung ε_a . In der Darstellung der unkomplizierten Daten (Abb. 3 rechts) wird ein sinusförmiger Verlauf der Abweichungen ersichtlich. Bei Vernachlässigung von ε_p und Unterstellung der gleichen Zielzeichenentfernung, beschreibt der Graph durch das lineare Verhältnis $\sin(\varepsilon_a) = \Delta h$ die Restneigung.

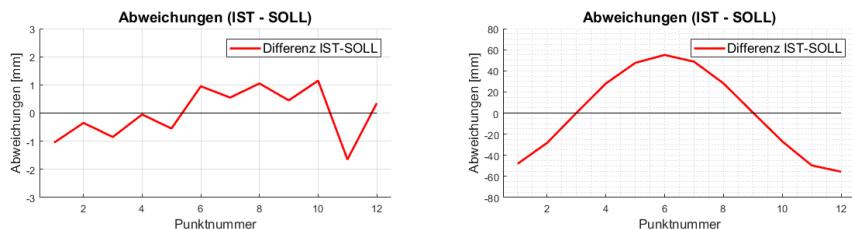


Abb. 3: Abweichungen der reduzierten Höhen (links: kompensierte Daten; rechts unkomplizierte Daten)

Wird der Kreis nun in gegenüberliegende Punkte eingeteilt (Abb. 4), also in die Halbkreise 1–6 (rechter Halbkreis) und 7–12 (linker Halbkreis), besteht die Differenz der Halbkreise in jedem Punkt aus: $Abw_i - Abw_{i+6} = \pm \varepsilon_{p(i)} + \varepsilon_{ai} - \varepsilon_{ai} \pm \varepsilon_{p(i+6)}$. Da der Laserscanner im Zentrum der gedachten Kreisebene steht, werden gegenüberliegende Punkte von der selben Neigung mit unterschiedlichem Vorzeichen beeinflusst. Demzufolge wird bei der Summenbildung gegenüberliegender „Abweichungs-Halbkreise“ die Restneigung ε_a eliminiert.

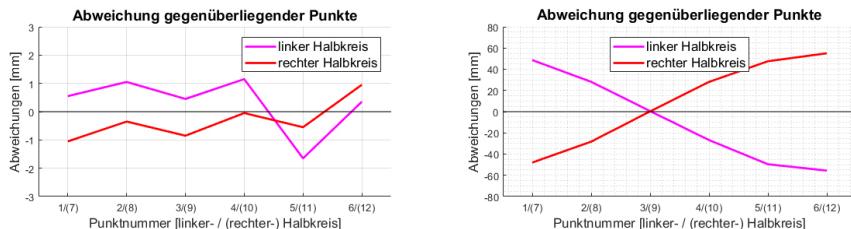


Abb. 4: Einteilung in „gegenüberliegende Abweichungs-Halbkreise“ (links: kompensierte Daten; rechts: unkomplisierte Daten)

Das Ergebnis der Summenbildung ist demzufolge die Summe der spezifischen Punkterkennungsfehler zweier gegenüberliegender Punkte (Abb. 5). So wohl für den kompensierten, als auch für den unkomplisierten Datensatz ergibt sich, zurückgerechnet aus der Standardabweichung der Punktfehlersumme, die Standardabweichung $\sigma_{\varepsilon_p} = 0,6 \text{ mm}$.

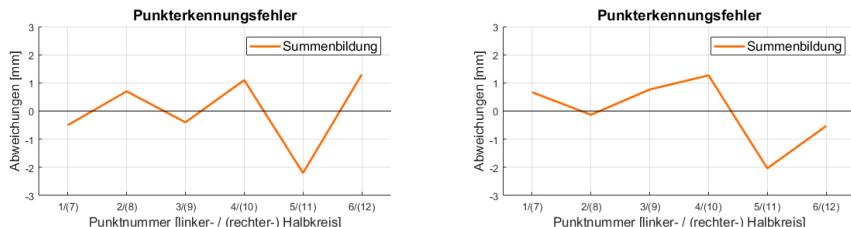


Abb. 5: Punkterkennungsfehler durch Summenbildung gegenüberliegender „Abweichungs-Halbkreise“ (links: kompensierte Daten; rechts: unkomplisierte Daten)

Wird nun in Abb. 6 (links) die Hälfte der Punktfehlersumme mit den Gesamtabweichungen der kompensierten Daten dargestellt, ergibt sich bei Differenzbildung gemäß Abb. 6 (rechts) der übrig bleibende Fehler der Restneigung, mit einer Standardabweichung von $\sigma_{\varepsilon_a} = 0,7 \text{ mm}$. Eine somit berechnete Neigung von $\frac{0,7 \text{ mm}}{7,5 \text{ m}}$ lässt auf eine Kompassatorunsicherheit von $< 7 \text{ mgon}$ schließen.

Eine Überprüfung dieser Berechnungsmethode ist durch eine lotrechte Helmert-Transformation gegeben. Die Transformation der kompensierten FA-RO-Daten in einen Datensatz, bestehend aus Tachymeter-Lagedaten und Nivellier-Höhendaten, gibt über die Z-Residuen Aufschluss über die Restneigung. Das Mittel aus gegenüberliegenden Z-Residuen beträgt $\frac{0,8 \text{ mm}}{7,5 \text{ m}} \rightarrow 6,8 \text{ mgon}$.

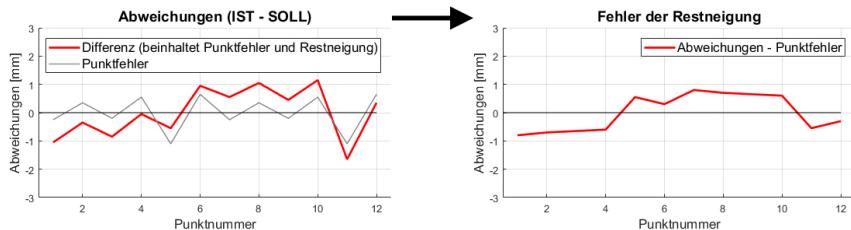


Abb. 6: Gegenüberstellung: Gesamtabweichung und Punktfehler (links) und aus Differenzbildung resultierender Fehler der Restneigung (rechts) im kompensierten Datensatz

Damit ist die Unsicherheit des Kompensators deutlich geringer als die im Datenblatt angegebenen 16,7 mgon. Die maximale Abweichung eines 3D-Punktes bedingt durch die Restneigungen beträgt im Anwendungsfall (bei maximal 15 m Gebäudehöhe) 1,6 mm. Da bei jedem Standpunkt eine Neigungsmessung mit der Genauigkeit von ≈ 7 mgon beobachtet wird, reduziert sich die Unsicherheit des Gesamtsystems bei beispielsweise zehn Standpunkten um den Faktor $\sqrt{10^{-1}}$. Die somit entstehenden Auswirkungen der Kompensatorrestneigung von $\approx 0,5$ mm sind vernachlässigbar und das System muss nicht über eine externe Libelle horizontiert werden.

3.3 Zusammenführung der Genauigkeitsbetrachtungen

Die o. g. Standardabweichung der Residuen $s_{\text{Faro}} = 2,2$ mm ergibt sich aus den Abweichungen einer Transformation der mittels zielmarken- und ebenenregistrierten FARO-Objektkoordinaten in das Referenzsystem. Die Objektkoordinaten beinhalten wiederum den Punkterkennungsfehler und die Registrierungsabweichung (wiederum bedingt durch Messunsicherheit, Kompensationswiderspruch, Punkterkennungsfehler und weitere Einflüsse).

In Abb. 7 werden die Genauigkeitseinfüsse aufgeschlüsselt und für eine mittlere Entfernung von $\bar{S} = 7,5$ m abgeschätzt. Nach Datenblatt wird das Entfernungsrauschen definiert als „Standardabweichung der Entfernungswerte über die Best-fit-Ebene“ und bei $1\sigma^{(3)}$ mit 0,6 mm auf 10 m angegeben. Für eine Skalierung auf 2σ ergibt sich bei $f = \infty$ aus dem Quantil der t -Verteilung der Faktor 1,96. Daraus folgen die in Tab. 2 genannten Unsicherheiten.

³ 1σ : das Signifikanzniveau gibt an, dass ein theoretischer Wert sich mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68 % in dem angegebenen Intervall befindet ($2\sigma \approx 95,5\%$; $3\sigma \approx 99,7\%$).

Tab. 2 (a-d): Unsicherheitsbudget

a) Standardabweichungen	
Distanzmessung	$\sigma_D = 1,2 \text{ mm}$
Richtungsmessung	$\sigma_r = \left(\frac{10 \text{ mgon}}{7,5 \text{ m}} \right) \rightarrow 1,2 \text{ mm}$
„Messunsicherheit“	$\sigma_{xyz} = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_r^2} = 1,7 \text{ mm}$

Die Messunsicherheit fließt zusammen mit dem Punkterkennungsfehler und dem Kompensatorwiderspruch (bei zehn Standpunkten) in die gesuchte Registrierungsgenauigkeit.

b) Punkterkennungsfehler	$\sigma_{\varepsilon p} = 0,6 \text{ mm}$
Kompensatorwiderspruch	$\sigma_{\varepsilon \alpha} = \left(\frac{7 \text{ mgon}}{7,5 \text{ m}} \right) \cdot 10^{-\frac{1}{2}} \rightarrow 0,3 \text{ mm}$

Einen weiteren Anteil an der Registrierungsunsicherheit haben Einflüsse wie die Aufnahmegeometrie, die Redundanz, das Rauschverhältnis, etc. die nicht eindeutig bestimmt werden können. Somit ergibt sich eine Registrierungsunsicherheit von:

c) Registrierungsunsicherheit	$\sigma_{Reg} = \sqrt{\sigma_{xyz}^2 + \sigma_{\varepsilon \alpha}^2 + \sigma_{\varepsilon p}^2} \pm \varepsilon = 1,8 \text{ mm} \pm \varepsilon$
-------------------------------	--

Die restlichen Abweichungen ε können durch Rückwärtsrechnungen über die Standardabweichung der Residuen s_{Faro} weiter abgeschätzt werden. Die Unsicherheit der Objektkoordinaten σ_{obj} erschließt sich aus σ_{Reg} und $\sigma_{\varepsilon p}$ und zusätzlich über den Zusammenhang zwischen σ_{Faro} , σ_{obj} und ε . Durch die Modellierung von ε ergibt sich die finale Abschätzung der Registrierungsunsicherheit.

d) Unsicherheit zusätzlicher Einflüsse	$\sigma_{Faro} = \sqrt{\sigma_{obj}^2 + \varepsilon^2} \rightarrow \varepsilon = 1,1 \text{ mm}$
Registrierungsunsicherheit	$\sigma_{Reg} = \sqrt{(1,8 \text{ mm})^2 (1,1 \text{ mm})^2} = 2,1 \text{ mm}$

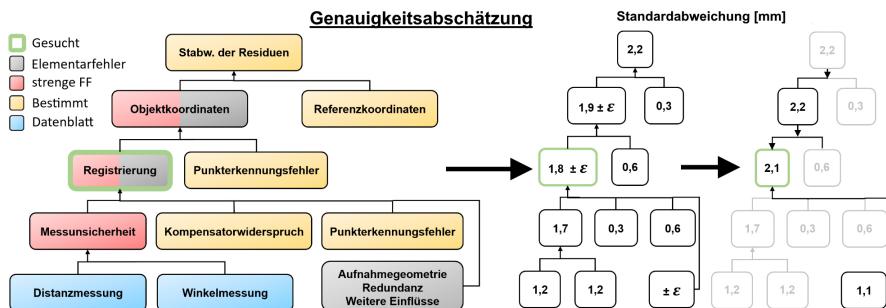


Abb. 7: Genauigkeitseinflüsse und deren Abschätzung

4 Mess- und Auswertemethodik

Abweichend vom Normalfall der Geodäsie soll die Punktwolke ohne georeferenzierte Targets verknüpft werden, da das Messkonzept ohne großen Schulungsbedarf realisierbar sein soll. Da einige Treppenläufe in alten Treppenhäusern *windschief* zueinander verlaufen, muss der Messaufbau zudem auch ohne Lottungsmessung auskommen. Die einhergehenden Genauigkeitsuntersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der Kompensator mit 7 mgon deutlich genauer ist als mit den im Datenblatt angegebenen 16,7 mgon. Auf die gesamte Gebäudehöhe wirkt sich diese Restneigung lediglich um < 1,5 mm aus. Da die Lotrichtung für jeden Standpunkt gemessen wird, ergibt sich eine ausreichende Redundanz, weshalb auf die Verwendung einer externen Libelle verzichtet wird.

Um die einzelnen Punktwolken mit ausreichender Genauigkeit in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren, reicht jeweils ein Standpunkt pro Treppenpodest und Wohnebene aus. In dieser Konstellation würden die in Abb. 8 dargestellten Standpunkte „2“ und „4“ die *Innenwand* jedoch mit einem ungünstigen Auftreffwinkel und teilweise durch Geländer verdeckt aufnehmen. Demzufolge muss auf den Treppenläufen zwischen den relevanten Wänden ein weiterer Standpunkt gemessen werden.

Dabei muss auf die Einhaltung des Mindestabstands geachtet werden (Abb. 9). Demzufolge dient der Standpunkt „3“ lediglich der redundanten Messung der Innenwand, weshalb in der entsprechenden Punktwolke auf der gegenüberliegenden Außenwand keine Ebenen oder Zielmarken markiert werden sollten.

Für die Verknüpfung aufeinanderfolgender Scans sollten pro Standpunkt mindestens zwei Schachbrett- und zwei Tilt & Turn Targets aufgenommen werden. Obwohl der Name schon implizit darauf hinweist, die Tilt & Turn Targets zu kippen und zu drehen, wird davon abgeraten. Wenn die Targets mittig zu zwei Standpunkten ausgerichtet und von da an nicht mehr bewegt werden,

ist eine ausreichend gute Punkterkennung gewährleistet. Außerdem kann dadurch über die Option „Normale von Schachbrettzielmarken verwenden“ in der SCENE-Software eine wertvolle Beobachtung für die Transformation gewonnen werden.

Abb. 10 (links) beschreibt die Verteilung der Targets. Im mittigen Teil der Abbildung werden die für die Transformation der Standpunkte „2“ und „4“ verwendeten Zielzeichen (nicht transparent) dargestellt. Dabei werden drei Schachbrett- und zwei Tilt & Turn Targets verwendet. Der rechte Teil von **Abb. 10** zeigt

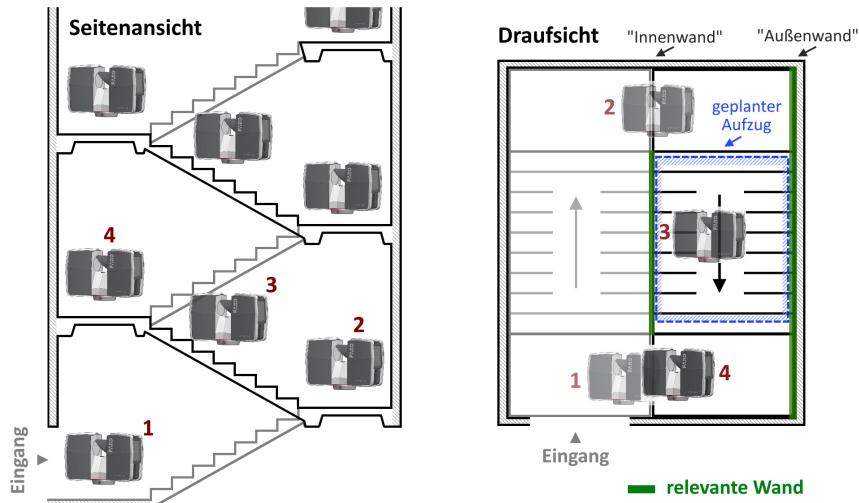


Abb. 8: Standpunktübersicht

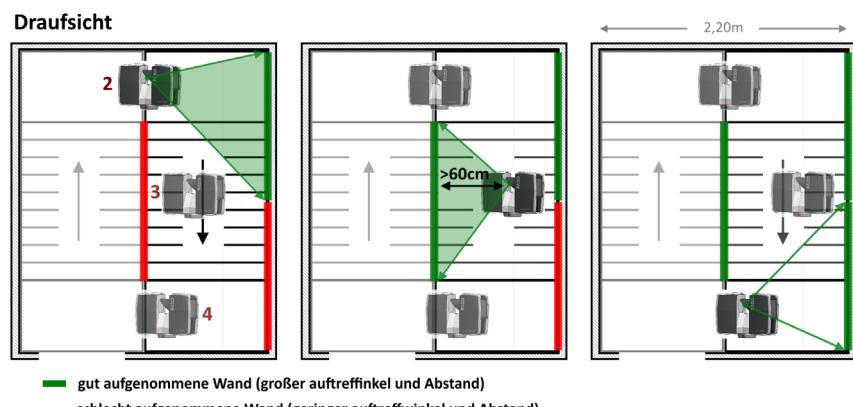


Abb. 9: Aufnahmegerometrie der Standpunkte

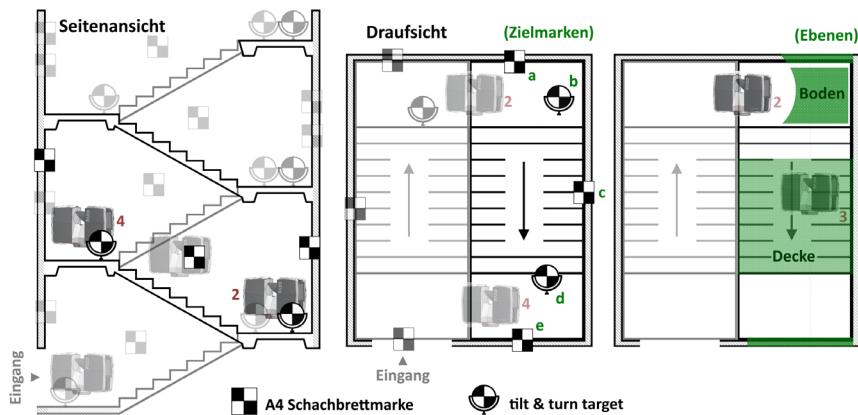


Abb. 10: Zielmarkenverteilung

die Verwendung von vier Ebenen für die Standpunkte „2“ und „3“. Grundsätzlich sollten also mindestens vier Zielzeichen und ausschließlich über *gutes* Datenmaterial berechnete Ebenen verwendet werden. Gemäß Bedienungsanleitung wird empfohlen, dass die Zielmarken nicht um 45° geneigt werden und der Auftreffwinkel zwischen Laserstrahl und Zielmarken nicht weniger als 45° beträgt.

Entsprechend den Voruntersuchungen sollte mit eingeschaltetem Kompensator bei dreifacher Qualität und $\frac{1}{4}$ Auflösung $\left(\frac{6\text{ mm}}{10\text{ m}}\right)$ gescannt werden. Die Auswertung der Messdaten kann durch diese Messkonfiguration im Standardablauf der FARO-Software umgesetzt werden.

5 Modellierung der Messdaten

Das Ergebnis der SCENE-Auswertung ist eine gefilterte und homogene Gesamtpunktwolke in einem lotrechten, ausgerichteten Koordinatensystem mit definiertem Ursprung. Für die weitere Analyse müssen lediglich 10 cm „breite“ Schnitte der Innen- und Außenwand exportiert werden. Die exportierten Schnitte werden in eine eigens entwickelte Software übergeben und weitestgehend automatisiert ausgewertet.

Der nächste Schritt der Auswertung gemäß Abb. 11 besteht in der groben Bereinigung der Wanddaten über eine *bounding box* oder eine polygonale Selektion. Durch die Ähnlichkeit der Treppenhäuser in Gebäuden der Gebäudeklasse IV⁴ kann dieser Auswerteschritt zukünftig automatisiert werden. Bislang

4 Gemäß LBauO M-V § 2 Abs. 3.

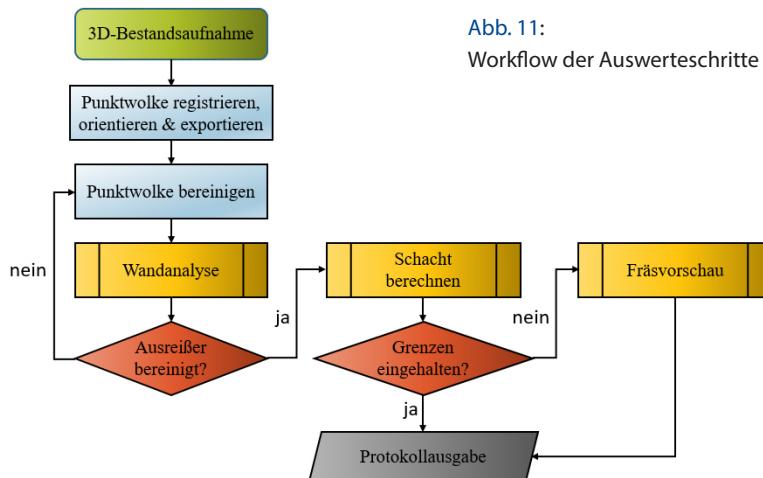


Abb. 11:
Workflow der Auswerteschritte

erfolgt die Bereinigung jedoch händisch. Im nächsten Schritt werden die bereinigten Schnitte dem *Wandanalyse*-Modul übergeben. Hierbei wird eine parallele und lotrechte Best-fit-Ebene durch beide Datensätze gerechnet. Bei der Entwicklung des Softwareprototyps wurden verschiedenen Einpassungsmodelle untersucht und hinsichtlich der Rechenzeit bewertet:

Während sich unter dem Aspekt der Genauigkeit lediglich der RANSAC-Algorithmus nennenswert von den anderen unterscheidet ($s_{ij} = \pm 8$ mgon), gibt es bezüglich der Rechenzeit starke Unterschiede zwischen den Methoden. Die Untersuchungen zu den Einpassungsmodellen werden in Jeschky (2018) weiter beschrieben. Gemäß Tab. 3 wurde der effiziente Algorithmus der linearen orthogonalen Regression für die Einpassung der lotrecht verlaufenden Ebene in die Wanddatensätze verwendet.

Durch die algorithmisch elegante Beschreibung der Ebene mittels hessescher Normalform gemäß Arbenz (2008) kann der orthogonale Abstand jedes Punktes

Tab. 3: Bewertung der Regressionsansätze nach Rechenzeit

Rechenzeit verschiedener Best-fit-Ebenen				
Punktanzahl	1K	6K	25k	5 Mio.
Gauß-Helmert-Modell	0,4 s	14,0 s	RAM_err.	-
JAG3D-Software	< 1 s	13,2 s	3 min 29 s	-
RANSAC-Ebene	5,2 s	5,2 s	5,2 s	ca. 30 s
Lineare orthogonale Regression	0,003 s	0,003 s	0,004 s	0,230 s

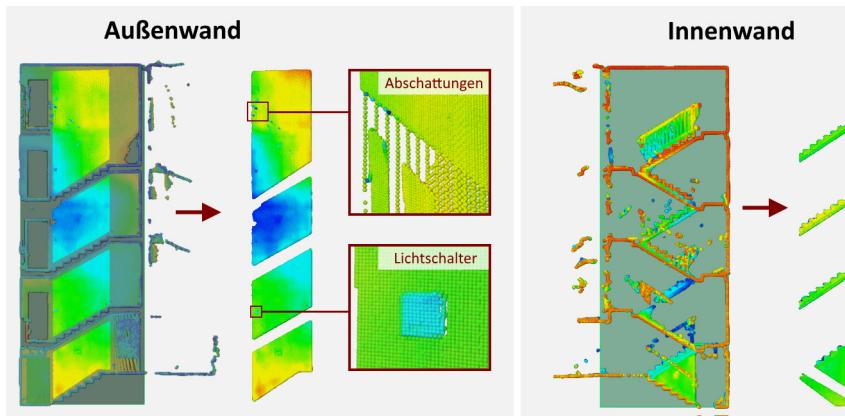


Abb. 12: Bereinigung der Punktwolkenschnitte. Ausreißerdarstellung über Falschfarbenansicht

zur Ebene in kurzer Rechenzeit bestimmt und als Falschfarbenbild dargestellt werden (Abb. 12).

Über die berechneten Ebenenabweichungen erfolgt anschließend die Ausreißer- und Objektbereinigung. Dafür werden in Millimeterschritten die größten Abweichungen markiert und gelöscht, sodass hervorstehende Objekte wie Lichtschalter oder Treppengeländer entfernt werden können.

Anschließend erfolgt die Modellierung des Aufzugschachtes aus den bereinigten Daten. Dafür dienen die zuvor bestimmten Ebenenparameter als Näherungswerte für die Orientierung eines lotrechten Quaders, der in der Mitte des zentrierten Datensatzes aufgespannt wird (Abb. 13). Als nächstes wird die nördliche Seite des Quaders in definierter Schrittweite solange erweitert, bis ein Punkt der *Außenwand* innerhalb des Rechtecks liegt. Nach einem gleichen Ablauf für die südliche Seite des Rechtecks ergibt sich die maximale Breite über die Summe der erweiterten Schritte. Nun wird die Größe des Quaders wieder zurückgesetzt und die Orientierung um eine definierte Schrittweite verändert. Diese rotierte Iteration wird nun wieder in Nord- und Südrichtung erweitert. Nach Wiederholen mehrerer Rotations- und Ausdehnungsschritte, wird das Rechteck erneut zurückgesetzt und der Länge nach verschoben (Richtung Osten). Somit ergibt sich für jede Iteration bzw. für jede definierte Lage und Orientierung eine Lösung der maximalen Breite. Von dieser Lösungsmenge wird die Lage und Orientierung der besten Lösung abgespeichert.

In dem Algorithmus geschieht die Abfrage, ob ein Punkt innerhalb des lotrechten Quaders ist, durch die „crossing-number“-Methode. Hierbei wird ein Strahl von dem zu testenden Punkt in eine beliebige Richtung versendet. Dabei wird gezählt, wie oft der Strahl die Kanten des Polygons schneidet. Ist die Anzahl

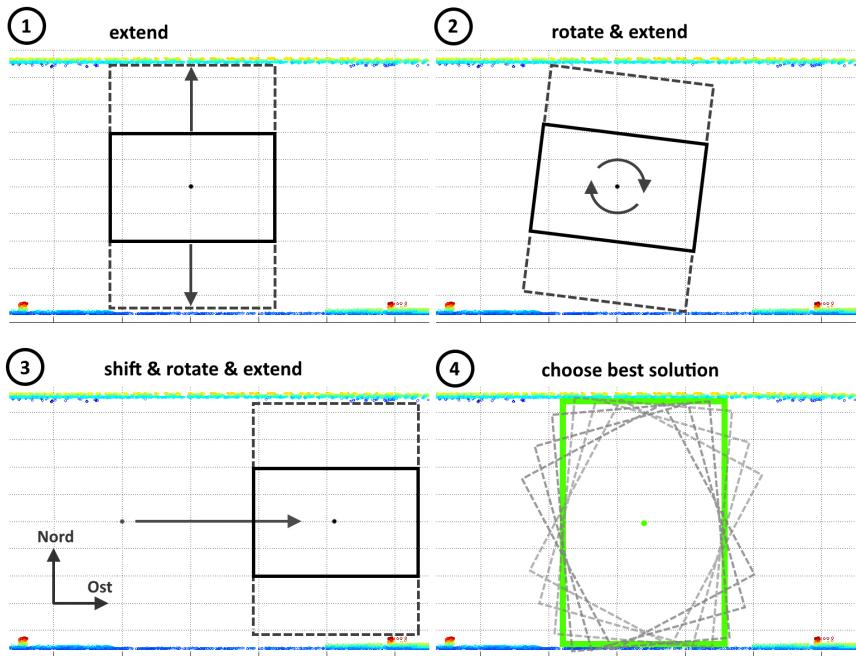


Abb. 13: Ermittlung des optimalen Aufzugschachts durch den „Rotating-Extending-Rectangle-Algorithmus“

Null oder gerade, liegt der Punkt außerhalb des Polygons. Ist die Anzahl ungerade liegt er innerhalb. Da für diese Methode hauptsächlich logische Operatoren angewendet werden, ist die Rechenzeit minimal. Während der Algorithmus nach der maximalen Breite sucht, werden je nach Fahrstuhltyp voreingestellte Längen verwendet. Für den Fall, dass der vorgegebene Grenzwert der Schachtbreite nicht erreicht wird, werden die Daten in das Modul *Fräsvorschau* übergeben.

Die interaktive Fräsvorschau zeigt den Bereich und Betrag des notwendigen Wandabtrags an. In dem Beispiel aus Abb. 14 müssten demzufolge 2,2 m² im zweiten Obergeschoss um 8 mm abgetragen werden, damit ein Aufzugsschacht mit einer vordefinierten Grundfläche entstehen kann. Als Endergebnis wird die Lage und Orientierung des berechneten Aufzugschachts in dem definierten Gebäudekoordinatensystem ausgegeben.

Im weiteren Verlauf können Schnittdarstellungen und Geschoss Höhen aus der digitalen Planungsgrundlage abgeleitet werden, um die Konstruktion des Außenanbaus zu unterstützen (Abb. 15).

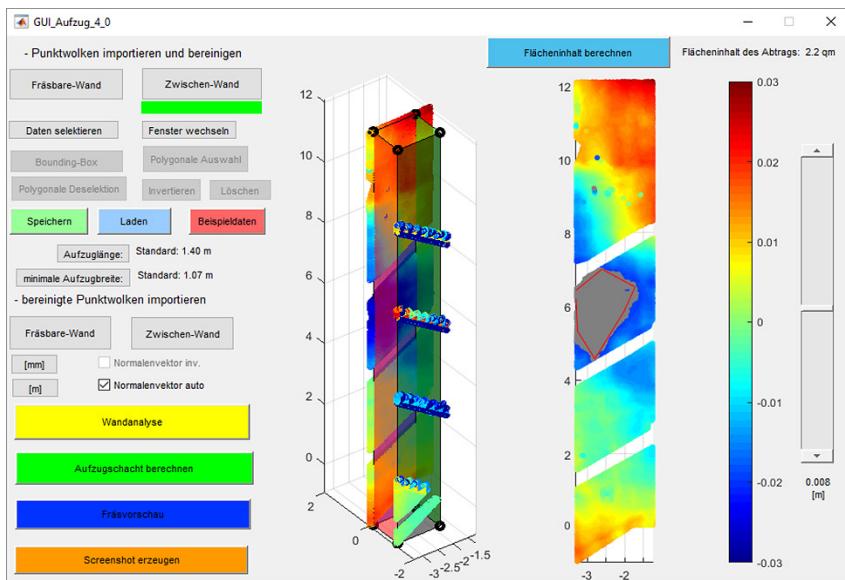


Abb. 14: Auszug aus der entwickelten Software „Aufzug 4.0“ mit berechnetem Aufzugschacht und interaktiver Fräsvorschau

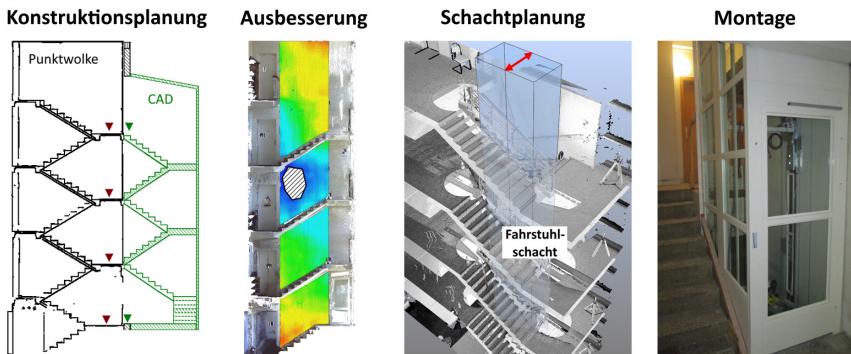


Abb. 15: Aufzug 4.0 Planungsdaten

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Methoden zur Erfassung des Baubestands liegen weit hinter dem Stand der Technik. Sowohl die Aufnahmegenauigkeit, als auch die Einsetzbarkeit von Lotschnur und Gliedermaßstab bei schmalen Treppenhäusern beeinträchtigen die Erfassung des realen Bauzustands. Die komplette Nachrüstung

einer innenliegenden Aufzugsanlage bedarf einer Vielzahl von Arbeitsschritten (Abbruch- und Rückbauarbeiten; Erdarbeiten; Beton- und Stahlbetonarbeiten; Maurerarbeiten; Fenster/Außentüren; Fliesen- und Plattenarbeiten; Natur- und Betonsteinarbeiten; Tischlerarbeiten; Maler-, Lackier- und Tapetzierarbeiten; Metallbauarbeiten) (Fichtler 2017). Wobei fast jedes beteiligte Gewerbe eine Begehung der Baustelle durchführen muss. Diese Faktoren können durch eine dreidimensionale Planungsgrundlage optimiert werden. Aus der Bewertung der inneren und äußeren Genauigkeiten ergibt sich eine Messstrategie zur Beschaffung der Planungsgrundlage, die optimal auf das Vorhaben angepasst ist. Die Auswertestrategie wird auf Grundlage der verifizierten Messdaten optimiert und liefert eine registrierte Punktwolke des Treppenhauses sowie Schnittdarstellungen und die Position des optimalen Aufzugschachts. Ebenfalls können eingefärbte Punktwolken in eine Panorama-Ansicht konvertiert und den weiteren am Bau beteiligten Gewerken zur Verfügung gestellt werden. Durch die entwickelte Software sind neben den Mess- auch die Auswertearbeiten ohne großen Schlußauswand oder externen Dienstleister realisierbar.

Durch die Einbindung der Messdaten in eine BIM-Umgebung erfolgen die Umbauarbeiten innerhalb weniger Tage. Die messtechnisch begleitete Fertigung sichert die Nutzung des optimalen Bauraums und begünstigt damit die KFW-Förderfähigkeit. Unter Anwendung des „Aufzug 4.0“ Mess- und Auswertekonzepts wurden bereits neun Fahrstuhlanlagen erfolgreich nachgerüstet.

Literatur

- Arbenz, P. (2008). 8.4 Fitting Lines, Rectangles and Squares in the Plane. www.inf.ethz.ch/personal/arbennz/MatlabKurs/node85.html, letzter Zugriff 09/2018.
- Fichtler, T. (2017): Dorf Mecklenburg, Anbau an Mehrfamilienhaus. www.krassow-bau.de/objekt/dorf-mecklenburg-anbau-aufzuge-an-mehrfamilienhaus.html, letzter Zugriff 09/2018.
- Großmann, W. (1969). Grundzüge der Ausgleichungsrechnung. Heidelberg: Springer.
- Jeschky, M. (2018): Entwicklung einer „Industrie 4.0“-fähigen Mess- und Auswertestrategie zur Einpassung eines Aufzugschachtes in einen Treppenhausdatenbestand. Masterarbeit. http://digilib.hs-nb.de/file/dbhsnb_derivate_0000002492/Masterarbeit-Jeschky_2018.pdf, letzter Zugriff 09/2018.
- Mechelke, K.; Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2008): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme – Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008. Wichmann, 317–327.
- Wasmeier, P. (2017): Geodetic Transformations: Geodetic Transformations Toolbox – Examples and Background.pdf. <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696-geodetic-transformations>, letzter Zugriff 09/2018.

Kontakt

Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik
Gruppenleiter | Messen von Großstrukturen
Dr.-Ing. Michael Geist | michael.geist@igp.fraunhofer.de

P40, BLK360 und RTC360 – ein Erfahrungsbericht

Martin Burghof

1 Einleitung

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist bereits seit einigen Jahren als eine etablierte Erfassungstechnologie im Vermessungswesen anerkannt. Anwendungsfelder reichen von Bestandsdokumentationen von beispielsweise Gebäuden oder Industrieanlagen zur Schaffung von Planungsgrundlagen bis hin zu Deformationsanalysen von Bauwerken oder technischen Anlagen. Auch die Vorteile einer flächenhaften Erfassung gegenüber punktuellen Verfahren (z. B. Tachymetrie) sind im Vermessungswesen bekannt. Der technische Fortschritt in den Bereichen Hardware und Software der letzten Jahre verändert den Stellenwert des TLS jedoch enorm.

Mit modernen Laserscannern können wir heute einen 360°-Scan mit Fotohinterlegung in einer vielversprechenden Genauigkeit in wenigen Minuten erfassen und diese Daten nahezu live auf einem mobilen Endgerät begutachten. Aber nicht nur hardwareseitig, sondern auch softwareseitig wird die Bearbeitung von Punktwolken in Zeiten einer Cloud-to-Cloud-Registrierung immer komfortabler.

Der technologische Fortschritt im Bereich IT und Software außerhalb der Geodäsie macht die Nutzung von Massendaten in Form einer 3D-Punktwolke möglich und steigert zudem die Attraktivität des TLS. In der Vergangenheit wurden im Bereich der Bestandsdokumentation 3D-Punktwolken fast ausschließlich auf Grundrisse und Querschnitte reduziert und vereinzelt erfolgte die Nutzung eines TruViews zur Gewinnung von planungsrelevanten Details.

Der Planungsprozess wird heute vermehrt direkt in Punktwolken bzw. in daraus abgeleiteten Modellen durchgeführt, wodurch der Mehrwert einer vollständigen flächenhaften Erfassung der Umgebung erst zum Tragen kommt. Auch die Entwicklung des 3D-Modell basierten Prozesses Building Information Modelling (BIM) hin zu einem bundesweiten Standard wird die Attraktivität des TLS weiter steigern, denn mittels TLS können 3D-Daten für BIM-Anwendungen erstellt werden.

Der technologische Fortschritt ist besonders bei der Verwendung der Laser-scanner P40, BLK360 und RTC360 von Leica Geosystems spürbar. Im Folgenden werden daher erste Erfahrungen der neuen Scannertechnologie im praktischen Einsatz dargestellt.

2 Laserscanner von Leica Geosystems – ein Überblick

Die 3D-Laserscanner P40, BLK360 und RTC360 (Abb. 1) des Herstellers Leica Geosystems sind in ihren Merkmalen sehr unterschiedlich. Sie stehen nicht in Konkurrenz zueinander, sondern bilden gemeinsam ein Scanner-Portfolio. Um die Vorteile jedes Sensors optimal zu nutzen, müssen diese anwendungsspezifisch eingesetzt werden. Oftmals ergeben sich durch einen kombinierten Einsatz



Abb. 1: Die Laserscanner P40, RTC360 und BLK360 (Leica Geosystems)

Synergieeffekte.

Die P40 ist der älteste der hier beschriebenen Sensoren. Sie zeichnet sich in erster Linie durch ihre enorme 3D-Punktgenauigkeit aus, die gemäß Herstellerangaben bei 3 mm auf 50 m liegt. Die hohe Genauigkeit dieses Sensors spiegelt sich außerdem in dem verbauten Zwei-Achs-Kompensator mit einer Genauigkeit von 1,5" (Herstellerangabe) wider. Weiterhin zeichnet sich die P40 durch ihre hohe maximale Reichweite von 270 m und die Robustheit gegenüber schwierigen Umweltbedingungen aus. Somit lassen sich große Gebiete mit hoher Genauigkeit und Horizontierung auch unter schwierigen äußeren Bedingungen erfassen.

Die P40 hat bei äußeren Abmessungen von $238 \times 358 \times 395$ mm ein Gesamtgewicht von 14 kg. Dies sorgt auf der einen Seite für eine gewisse Standsicherheit auch bei Wind, erschwert jedoch auf der anderen Seite die Handhabung bei schwer zugänglichen Bereichen im Außendienst.

Die Scangeschwindigkeit der P40 für einen 360°-Scan mit Fotohinterlegung beträgt bei einer Auflösung von 3,1 mm auf 10 m knapp 12 Minuten. Unter Berücksichtigung von Rüstzeiten lassen sich höchstens vier Standpunkte innerhalb einer Stunde realisieren. Die Fotohinterlegung nimmt den Großteil der Zeitspanne pro Aufnahme ein, sodass die Zeiter sparnis durch Reduzierung der Scanauflösung kaum sinnvoll erscheint. Durch Verzicht auf die Bildaufnahmen kann hingegen mehr als die Hälfte der Zeit bei der Datenaufnahme eingespart

werden, jedoch hat sich gezeigt, dass der zusätzliche Informationsgehalt der Bildaufnahmen nicht nur eine Erleichterung bei der Registrierung bedeuten kann, sondern in der Regel auch für die Endnutzer einen Mehrwert darstellt.

Der BLK360 hat verglichen mit der P40 mit 6 mm auf 10 m eine deutlich geringere 3D-Punktgenauigkeit. Die Reichweite von 0,6 bis 60 m liegt ebenfalls deutlich unterhalb der Spezifikation der P40. Die Horizontierung der Punktwolke wird zudem mittels Inertial Measurement Unit (IMU) realisiert. Dabei handelt es sich lediglich um eine grobe Horizontierung. Daher ist eine Horizontierung der Punktwolke mittels Passpunkten oder über die Punktwolke selbst erforderlich.

Mit einer Höhe von 165 mm und einem Durchmesser von 100 mm erreicht der BLK360 ein Gesamtgewicht von ungefähr 1 kg. Diese Kompaktheit des Sensors kombiniert mit einer Messgeschwindigkeit von unter 3,5 Minuten für einen 360°-Scan mit Fotohinterlegung und einem Punktabstand von 10 mm auf 10 m verdeutlicht die Stärken dieses Sensors. Ein Einsatz des BLKs bietet sich für Anwendungen mit einem niedrigeren Genauigkeitsanspruch sowie für schwer zugängliche Objekte an.

Außerdem erfolgt eine automatische Registrierung der Punktwolken während der Aufnahme mit Hilfe der Software Recap von Autodesk auf einem Tablet. Allerdings hat diese vor Ort Registrierung gewisse Schwächen und kann lediglich als Vor-Registrierung verstanden werden. In Abb. 2 ist links beispielhaft ein Ergebnis der automatischen Registrierung mittels Recap dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Scanaufnahme eines Parkplatzes. Die Aufnahme mit dem BLK360 erfolgte im Kreis. Der Abstand der Scanstandpunkte lag dabei zwischen 5 und 10 m. Die automatische Registrierung lieferte das Ergebnis wie in Abb. 2 links dargestellt. Es ist eine klare Verdrehung der obersten Parkreihen zu

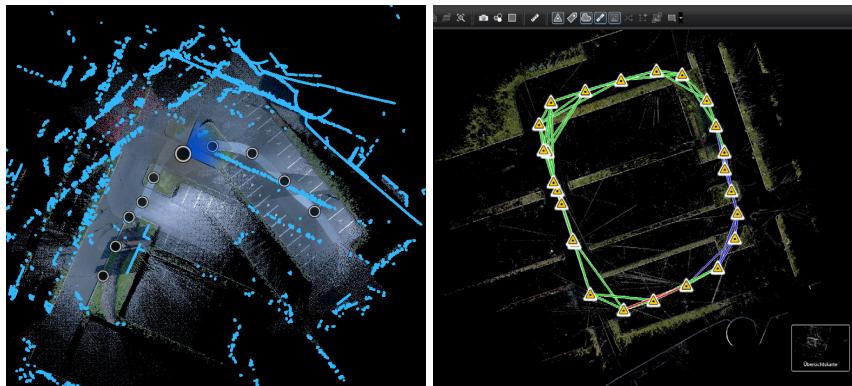


Abb. 2: Scan eines Parkplatzes: fehlerhafte automatische Registrierung in ReCap (links) und Ergebnis der manuellen Registrierung in Cyclone Register 360 (rechts)

erkennen. Im rechten Teil der Abbildung sind die verknüpfte Punktwolke nach Bearbeitung im Innendienst sowie die Lage der Standpunkte dargestellt.

Bei der Betrachtung der Produktspezifikationen des RTC360 wird schnell deutlich, dass dieser hinsichtlich Genauigkeit und Handhabung als Zwischenlösung der beiden Sensoren P40 und BLK360 verstanden werden kann. Mit 3D-Punktgenauigkeiten von 1,9 mm auf 10 m und 5,3 mm auf 40 m liefert dieser Sensor im Nahbereich im Vergleich zu der P40 gleichwertige Genauigkeiten. Die Reichweite liegt mit 0,5 bis 130 m im Mittelfeld zwischen P40 und BLK360. Die Horizontierung erfolgt wie beim BLK360 IMU basiert mit einer Genauigkeit von 3' und entspricht daher ebenfalls einer Grob-Horizontierung.

Hinsichtlich der äußeren Abmessungen von $120 \times 240 \times 230$ mm und einem Gesamtgewicht von 6 kg befindet sich der RTC360 ebenfalls im Mittelfeld. Die Scangeschwindigkeit für einen 360°-Scan mit Fotohinterlegung und einer Auflösung von 3 mm auf 10 m beträgt weniger als 3 Minuten.

Der RTC360 zeichnet sich weiterhin durch einige neuartige Funktionen aus. Zu diesen Funktionen zählen u. a. die Erfassung der Fotos in verschiedenen Belichtungsstufen sowie das Visual Inertial System (VIS), welche für mehr Komfort bei der Erfassung von 3D-Punktwolken sorgen. Die Bildaufnahme in verschiedenen Belichtungsstufen ermöglicht die nachträgliche Regulierung der Belichtung direkt im TruView. Das VIS zeichnet die Bewegungen während des Standpunktwechsels auf und liefert dadurch eine vollautomatische Vorregistrierung im Feld.

Als Transportbehälter für den RTC360 ist ein Spezialrucksack erhältlich. Bei der Datenaufnahme im Aufsendienst kann die Nutzung des Rucksacks sehr angenehm sein, z. B. beim Klettern durch stark verbaute Bereiche oder beim Aufstieg von Leitern oder schmalen Treppen.

Eine Gegenüberstellung der Sensorspezifikationen aller drei Sensoren kann der nachfolgenden Tab. 1 entnommen werden.

Bei der Auswahl des optimalen Laserscanners für die jeweilige Anwendung zählt nicht immer „je genauer desto besser“. Die Genauigkeit bleibt zwar nach wie vor ein wichtiges Auswahlkriterium jedoch ist beispielsweise der Einsatz des BLK360 mit niedrigerer Genauigkeit aus Gründen der Handhabung im Außen- dienst oder auch der Wirtschaftlichkeit oftmals einem Einsatz der P40 vorzuziehen. Bei einer Anwendung mit entsprechendem Genauigkeitsanspruch können die Kriterien Scangeschwindigkeit, Transport und Zugänglichkeit des Messobjektes die Minderung der Messgenauigkeit rechtfertigen. Durch den RTC360 als neuen Sensor in der Leica-Reihe wird die Flexibilität bei der Auswahl des optimalen Sensors nochmals deutlich gesteigert. Im Folgenden sollen an Hand einzelner Anwendungsbeispiele die Vorteile einzelner Sensoren hervorgehoben werden. Des Weiteren wird der Mehrwert durch einen kombinierten Einsatz der Sensoren P40, BLK360 und RTC 360 aufgezeigt. Es sei angemerkt, dass

Tab. 1: Produktspezifikationen gemäß Herstellerangaben (Leica Geosystems)

	P40	RTC360	BLK360
3D-Punktgenauigkeit	3,0 mm @ 50 m 6,0 mm @ 100 m	1,9 mm @ 10 m 2,9 mm @ 20 m 5,3 mm @ 40 m	6,0 mm @ 10 m 8,0 mm @ 20 m
Reichweite	270 m	0,5–130 m	0,6–60 m
Horizontierung	Zwei-Achs-Kompensator (1,5")	IMU basiert (3')	IMU basiert
Scangeschwindigkeit inkl. Bildaufnahmen	~12 Minuten 3,1 mm @ 10 m	~3 Minuten 3 mm @ 10 m	~3,5 Minuten 10 mm @ 10 m
Abmessungen [mm]	238 × 358 × 395	120 × 240 × 230	Höhe: 165 Ø: 100
Gewicht	14 kg	6 kg	1 kg
Betriebstemperatur	-20 bis +50°C	-5 bis +40°C	+5 bis +40°C
Anschaffungskosten	~72.000 €	~48.000 €	~16.000 €

der RTC360 erst seit Ende September diesen Jahres von den Autoren eingesetzt wird, so dass sich große Teile auf den Unterschied zwischen BLK360 und P40 beschränken.

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Topographisches Bestandsaufmaß inkl. Dimensionierung von Schachtbauwerken

Für eine bevorstehende Kanalbaumaßnahme wurde ein topographisches Bestandsaufmaß für ein städtisches Tiefbauamt tachymetrisch durchgeführt. Der angefertigte Bestandsplan enthielt neben den üblichen topografischen Elementen die Lage aller Kanaldeckel sowie Kanaldeckel- und Sohlhöhen des beauftragten Gebietes. Im Nachgang entstand dann von Seiten des Auftraggebers das Interesse die Dimensionierung der Schachtbauwerke zu ermitteln.

Im Austausch mit dem Kunden wurde schnell klar, dass der Einsatz eines 3D-Laserscanners hier vorzuziehen war. Neben dem erhöhtem Komfort für das Vermessungsteam, welches den Abstieg in das Schachtbauwerk vermeiden konnte, konnte von Seiten der Stadt die Gasfreimessung entfallen, die vor dem Betreten der Schächte aus Sicherheitsgründen erforderlich gewesen wäre.

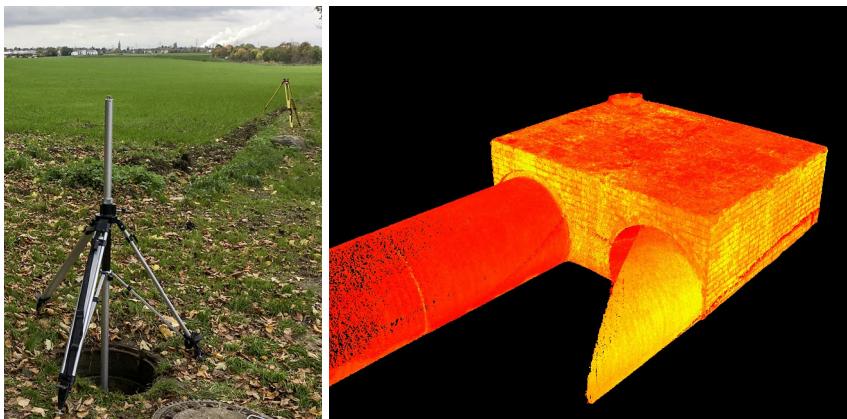


Abb. 3: Aufnahmesituation beim Scanning eines Schachtbauwerkes (BLK360) (links) und Punktwolke eines Schachtbauwerkes (rechts)

Außerdem versprach sich das Tiefbauamt durch die zusätzlich zu den Grundrissen verfügbare Punktwolke und Fotodokumentation in Form eines TruViews einen deutlichen Mehrwert. Das Aufmaß der Schachtbauwerke wurde mit dem BLK360 ausgeführt. Dieser wurde dazu kopfüber in die Schächte herabgelassen und über das Tablet wurden die Scans gestartet ([Abb. 3](#) links).

Der Einsatz des BLK360 bot sich an dieser Stelle an, da er aufgrund seiner Kompaktheit problemlos in die Schächte heruntergelassen werden konnte. Da die Genauigkeit des BLK360 an dieser Stelle absolut ausreichend war, ist die erheblich verkürzte Scandauer ebenfalls als Vorteil gegenüber der P40 zu nennen. Außerdem kann der Einsatz des BLK360 auch als Risikominimierung verstanden werden, da die Last auf das verwendete Kurbelstativ aufgrund des erheblich geringeren Gewichtes des BLK360 minimiert wurde und somit ein Abrutschen des Scanners in den Schacht unwahrscheinlicher wurde.

[Abb. 3](#) zeigt rechts beispielhaft eines der gescannten Schachtbauwerke. Die Qualität der generierten Punktwolke ist zur Ableitung der Dimensionierung des Schachtbauwerkes absolut zufriedenstellend. Aufgrund der geringen Zielweiten liegt eine sehr hohe Auflösung der Punktwolke vor, so dass die einzelnen Backsteine und die dazwischen befindlichen Fugen erkennbar sind.

3.2 Gebäudeaufmaß zur Ableitung von Grundrissen und Verkaufsflächen

Für den Betreiber eines Einkaufcenters einer Kreisstadt in NRW sollte ein Einkaufscenter gescannt werden. Neben der Lieferung eines TruViews zu Präsenta-

tionszwecken sollten Grundrisspläne und Verkaufsflächen für die Vermarktung ermittelt werden. Die Scanaufnahme der knapp 20.000 m² großen Fläche erfolgte mit der P40 auf einem rollbaren Stativ und es wurden insgesamt ca. 250 Standpunkte in ca. 64 Stunden Außendienst erfasst. Der aus der Punktwolke abgeleitete Grundriss ist für das 1. Obergeschoss in Abb. 4 dargestellt. Im Grundriss sind vor allem im Bereich links sehr viele kleine Räume zu erkennen. In der großen in grün dargestellten Verkaufsfläche befindet sich ein Geschäft des Einzelhandels mit vielen Verkaufsregalen, so dass auch in diesem Bereich viele Instrumentenstandpunkte erforderlich waren, um die gesamte Fläche aufzunehmen.

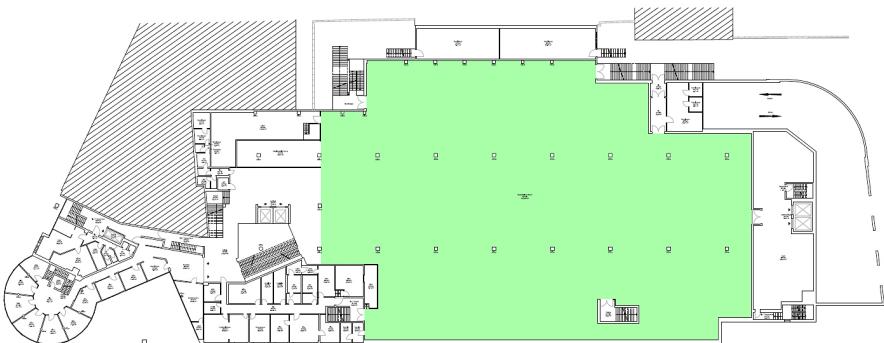


Abb. 4: Grundriss der Scanaufnahme eines Einkaufcenters

Ein bezogen auf die Gesamtfläche zwar deutlich kleineres aber vergleichbares Projekt wurde kurze Zeit später in einem ehemaligem Café durchgeführt. Für dieses Objekt sollten für Verkaufszwecke ebenfalls Grundrisspläne angefertigt werden. Die Scanaufnahme der ca. 600 m² erfolgte mit dem BLK360. Es wurden insgesamt ca. 80 Standpunkte in ca. sechs Stunden gescannt. In Abb. 5 ist ein aus der Punktwolke abgeleiteter Grundriss des Erdgeschosses dargestellt.

Bei der Erfassung von Innenräumen von Geschäftsräumen zur Ableitung von Grundrissflächen oder zur Erzeugung von Präsentationsgrundlagen (TruView) zur Vermarktung dieser Räumlichkeiten ist die Genauigkeit des BLK360 in der Regel ausreichend. Der Einsatz des BLK360 bringt meist einen zeitlichen Vorteil im Außendienst mit sich. Beim Vergleich der beiden oben beschriebenen Projekte wird deutlich, dass die Geschwindigkeit (Scanstandpunkte/Stunde) bei dem Projekt „Café“ mit über 13 Scanstandpunkten/Stunde mehr als dreimal so hoch war wie die Geschwindigkeit in dem Projekt Einkaufcenter, die knapp unter vier Scans pro Stunde lag.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Geschwindigkeit in einem Scanprojekt auch auf andere Weise bewertet werden kann. Bei der Ableitung der Geschwindigkeit als erfasste Fläche pro Stunde ergibt sich bei dem Projekt

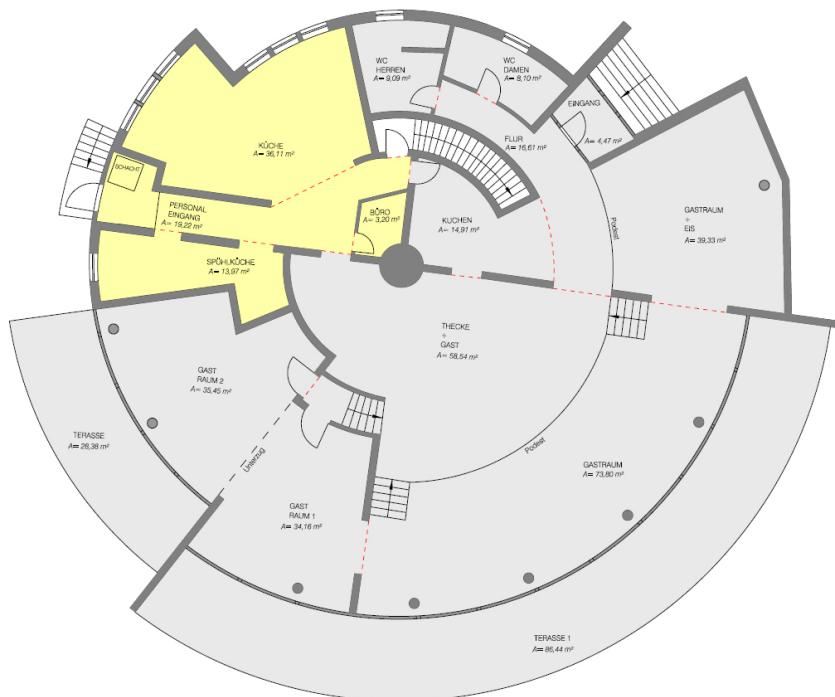


Abb. 5: Grundriss der Scanaufnahme eines Cafés

Einkaufscenter mit über 300 m² pro Stunde gegenüber 100 m² pro Stunde beim Projekt Café eine wesentlich höhere Geschwindigkeit. Dies ist auf die höhere Reichweite der P40 zurückzuführen.

Es wird deutlich, dass ein Vergleich der Systeme P40 und BLK360 aufgrund einer Quote von Scans pro Stunde nicht direkt möglich ist. Der BLK360 erfasst aufgrund der geringeren Reichweite pro Scan weniger Fläche als die P40. Aufgrund von Hindernissen in der Örtlichkeit ist für ein vollständiges Innenaufmaß ein vermehrtes Umbauen des Laserscanners erforderlich und die volle Reichweite der P40 kann nur selten voll ausgeschöpft werden. Daher lassen sich die hier beschriebenen Aufnahmen in der Regel mit dem BLK360 effektiver und komfortabler realisieren.

Der Einsatz des BLK360 im Projekt Einkaufscenter hätte sicherlich mehr als 250 Standpunkte benötigt. Aufgrund der überwiegend kurzen Zielweiten liegt die Vermutung nahe, dass der Einsatz des BLK360 die vor Ort Aufnahme dennoch deutlich beschleunigt hätte. Denn auch eine Verdopplung der Standpunkte auf 500 Stück wäre innerhalb von 40 Stunden gut umsetzbar gewesen. Dies entspricht einer Reduzierung der Zeit im Außendienst um über 30 %.

3.3 Deformationsmessung an einem Hohlträger

Im Zuge einer regelmäßigen Wartung einer Krananlage in einem Stahlwerk erfolgte im Jahr 2016 ein 3D-Laserscan eines Hohlträgers. Bei dem Hohlträger handelt es sich um eine Stahlkonstruktion, die sich unterhalb einer Fahrschiene der Laufkatze der Krananlage befindet (Abb. 6). Die Punktwolke des Hohlträgers ist in Abb. 7 dargestellt.

Die Messung soll in einem regelmäßigen Turnus wiederholt werden und die Messung aus dem Jahr 2016 soll als Urmessung dienen. Ziel der Wiederholungsmessungen ist es Verformungen des Hohlträgers festzustellen. Die zweite Messepochе erfolgte im Jahr 2017.

Die Scanaufnahmen beider Epochen erfolgten mit der P40, da hier ein hoher Anspruch an die Genauigkeit der Punktwolke vorlag. Zu Testzwecken wurde bei der Messung im Jahr 2017 zusätzlich mit dem BLK360 gescannt. Der Hohlträger wurde dabei jeweils von innen gescannt.

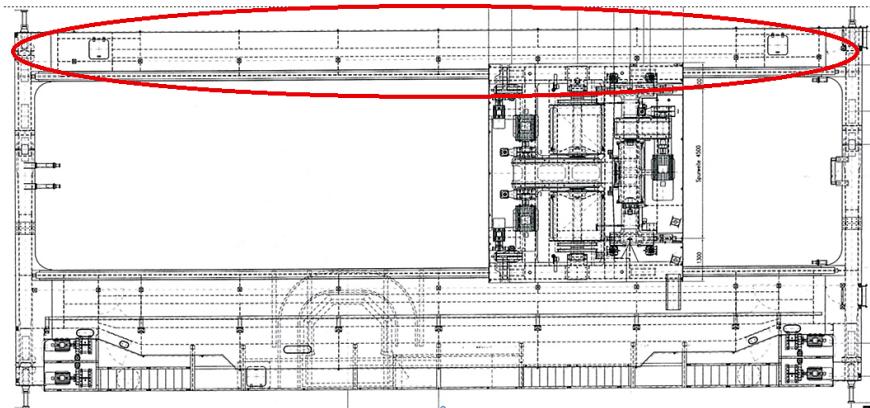


Abb. 6: Technische Zeichnung zur Krananlage

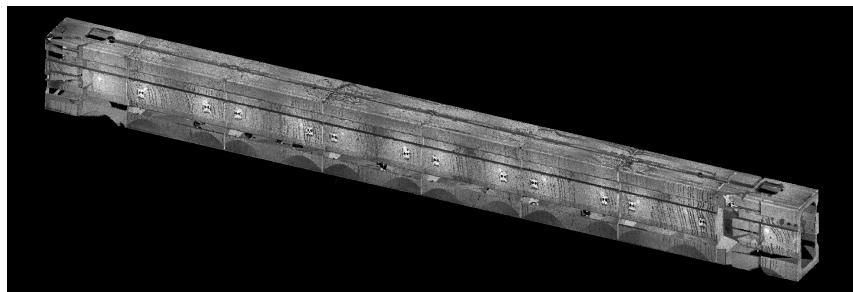


Abb. 7: Scanaufnahme des Hohlträgers der Krananlage

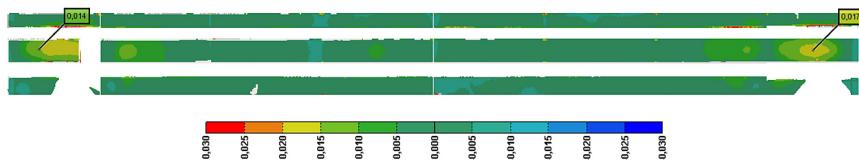


Abb. 8: Vergleich der zweiten Messepoke zur Urmessung einer Wand des Hohlträgers (Abweichungen in [m])

Die Auswertung der Messung aus dem Jahr 2017 erfolgte in Form von Querschnitten und Falschfarbenbildern. In Abb. 8 ist beispielhaft ein Falschfarbenbild einer Wand des Hohlträgers dargestellt. In der Darstellung sind Abweichungen der entsprechenden Wand des Innenraums von bis zu 17 mm zu erkennen.

Zum Vergleich der Punktwolken von P40 und BLK360 wurde an einer definierten Stelle des Hohlträgers ein Querschnitt ausgewertet. Dieser Querschnitt ist in Abb. 9 dargestellt. Darin enthalten sind insgesamt drei Punktwolken. Die in grün dargestellte Punktwolke stammt von der P40. Die rote und gelbe Punktwolke stammen aus verschiedenen Aufnahmen mit dem BLK360. Die Lagerung der Punktwolken erfolgte über definierte Punkte im Inneren des Hohlträgers die mittels Zielmarken signalisiert wurden. Mit Hilfe der Darstellung in Abb. 9 können die Scans der P40 mit denen des BLK360 verglichen werden.

Auf der rechten Seite liegen die Punktwolken gut aufeinander und auf der linken Seite ist ein klarer Versatz zu erkennen. Insgesamt weicht die rote Punktwolke des BLK360 von der grünen Punktwolke der P40 um bis zu 11 mm ab. Die gelbe Punktwolke des BLK360 weist eine maximale Abweichung von 20 mm gegenüber der Punktwolke der P40 auf. Die Abweichungen können durch die

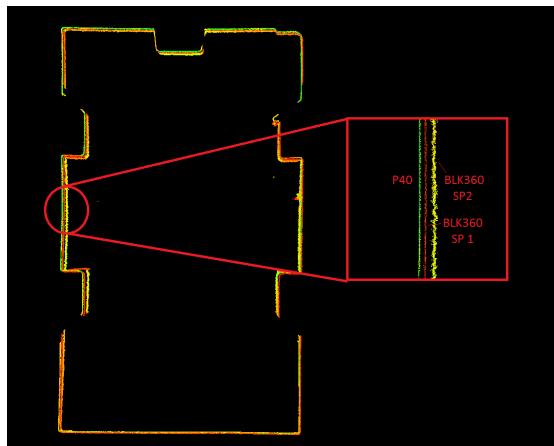


Abb. 9:
Vergleich der Punktwolken
P40 und BLK360 an Hand
eines Querschnitts des
Hohlträgers

niedrigere 3D-Punktgenauigkeit des BLK360 erklärt werden. Hinzu kommt, dass aufgrund der Breite des Hohlträgers von 1300 mm die Messung sehr nah am minimalen Messbereich des BLK360 erfolgte und diesen sogar teilweise unterschritten hat. Die ungleichmäßige Verteilung der Abweichungen deutet zudem auf eine schlechte Lagerung der Punktwolken des BLK360 hin. Außerdem fällt im Detailausschnitt der Abb. 9 das deutlich höhere Rauschen des BLK360 gegenüber der P40 auf. Es kann festgehalten werden, dass der BLK360 für derartige Messaufgaben ungeeignet ist.

3.4 Mehrwert durch den kombinierten Einsatz von P40, BLK360 und RTC360

Im Zuge der Planung eines neuen Mahlwerks in einem Zementwerk sollte eine Bestandsaufnahme für den planungsrelevanten Bereich erfolgen. Die so erzeugte Punktwolke dient den Anlagenbauern als Planungsgrundlage. Der zu scannende Bereich umfasste den Außenbereich um den Wärmetauscher, die 7. Etage und das Dach des Wärmetauschers, sowie das Erd- und Kellergeschoss umliegender Gebäude. Das Kellergeschoss und Teile des Erdgeschosses sind sehr kleinräumig mit Zielweiten unter 10 m, so dass der BLK360 in diesen Bereichen gut eingesetzt werden konnte.

Mit der P40 wurden die Außenbereiche gescannt. Auf Grund weitläufiger Bereiche kam dort die hohe Reichweite der P40 zum Tragen. Beispielsweise sollte der ca. 70 m hohe Wärmetauscher von außen vollständig aufgenommen werden. Da zusätzlich ein Aufmaß der 7. Etage und des Dachgeschosses erfolgen sollte und diese Aufnahmen mit den weiteren Aufnahmen auf dem Boden verknüpft

werden sollten, erfolgte zusätzlich ein Scan vom Balkon der 7. Etage.

Der RTC360 wurde auf dem Dach des Wärmetauschers eingesetzt. Dafür sprach zum einen die Zugänglichkeit des Dachs über eine Leiter (Abb. 10) und zum anderen die höhere Reichweite gegenüber dem BLK360, da die Punktwolke vom Dach mittels Cloud-to-Cloud-Registrierung mit dem Rest verknüpft werden sollte. Dazu sollte vom Dach aus möglichst viel der Umgebung erfasst werden.



Abb. 10: Aufstieg zum Dach des Wärmetauschers

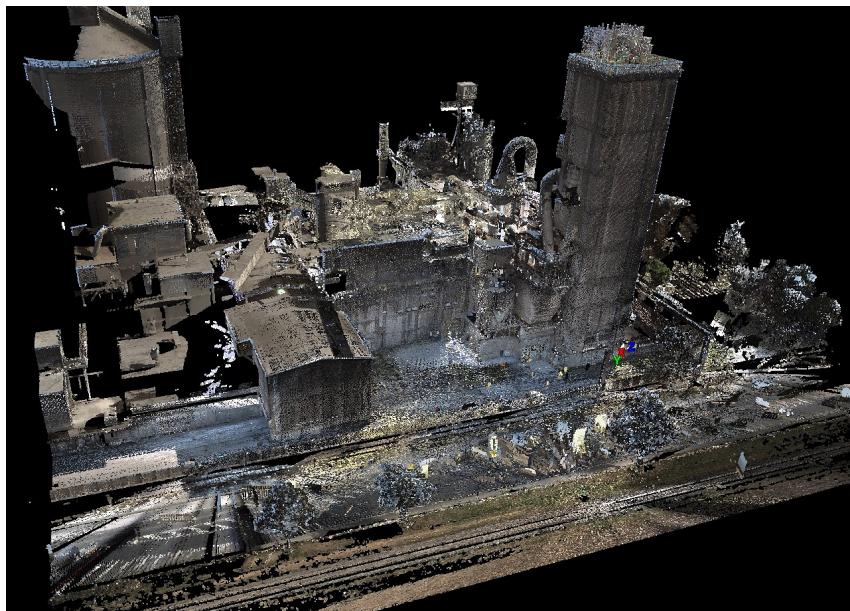


Abb. 11: Registrierte Punktwolke eines Zementwerks im Bereich des Wärmetauschers

Weiterhin wurde der RTC360 in den Zugängen zu den Gebäuden eingesetzt. Beim Übergang zwischen innen und außen traten wechselnde Lichtverhältnisse auf, so dass sich der RTC360 durch die Bildaufnahmen unterschiedlicher Belichtungszeiten hervorhob. Außerdem wurde der RTC360 als Bindeglied zwischen P40 und BLK360 eingesetzt indem die Bereiche zwischen den Außenbereichen und den Kellerräumen mit dem RTC360 gescannt wurden. Dabei handelte es sich für den RTC360 um ideale Reichweiten zwischen 10 und 40 m.

Die Scanaufnahme erfolgte mit den Systemen P40, BLK360 und RTC360. Durch den gezielten Einsatz der verschiedenen Sensoren konnten ihre Stärken optimal genutzt werden. Die Aufnahme im Außendienst konnte effizient und komfortabel in weniger als fünf Stunden ausgeführt werden. Die Registrierung der Punktwolke erfolgte ausschließlich über eine Cloud-to-Cloud-Registrierung. Die Gesamtpunktwolke ist in Abb. 11 dargestellt.

4 Fazit

An Hand der hier aufgezeigten Anwendungsbeispiele wird der technologische Fortschritt der 3D-Laserscanner deutlich. Die Arbeiten im Außendienst werden einfacher, schneller und komfortabler. Die Sensoren P40, BLK360 und RTC360

haben alle ihre Vor- und Nachteile und müssen anwendungsspezifisch eingesetzt werden. Der kombinierte Einsatz der Systeme führt zu einer weiteren Optimierung der Tätigkeiten im Außendienst.

Durch diese Entwicklung bei der Datenaufnahme verlagern sich die Arbeiten mehr und mehr in den Innendienst. Die Verarbeitung der 3D-Punktwolken wird durch die Weiterentwicklung der Softwareprodukte ebenfalls verbessert. Allerdings steigt mit zunehmender Minderung der Scanzeiten auch ein Stück weit die Anzahl der Scanstandpunkte und somit die Menge der zu verarbeitenden Daten an.

Trotz steigender Nachfrage nach 3D-Punktwolken erfolgt im Anschluss an die Registrierung häufig eine Weiterverarbeitung der Scandaten zu Schnitten, Grundrissen und 3D-Modellen. Während die Weitergabe von 2D-Zeichnungen in Form standardisierter Datenformate wie dxf oder dwg meist problemlos erfolgt, treten bei der Weitergabe von 3D-Modellen in standardisierten Datenformaten wie iges oder step häufiger Probleme auf, da die entsprechenden Schnittstellen nicht in allen Softwarepaketen sauber umgesetzt wurden.

Kontakt

Martin Burghof

Vermessungsbüro Stollenwerk & Burghof

Bahnstraße 8, 50126 Bergheim

m.burghof@verm-sto.de

Nach den großen Erfolgen der vergangenen Jahre bietet der DVW auch im Jahr 2018 eine Weiterbildungsveranstaltung mit zugehörigen schriftlichen Beiträgen zum Thema »Terrestrisches Laserscanning« an. Der Schwerpunkt dieses Bandes liegt auf Themen und Fragestellungen, die uns aus der Praxis erreicht haben:

- Welche Genauigkeit hat mein Laserscan(ner)?
- Wie modelliere und registriere ich meine Laserscans?
- TLS in der Infrastruktur
- Aktuelle Anwendungen und Themen

Mit diesem Schwerpunkt möchten wir insbesondere Kolleginnen und Kollegen in der Praxis, aber auch der Forschung oder Ausbildung aus den Bereichen der Geodäsie, der Geoinformation und aus Nachbardisziplinen für das sehr spannende Themenfeld des terrestrischen Laserscannings gewinnen und weiterbilden.



Schriftenreihe des DVW
Band 93 / 2018
Printversion: 29,40 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaezie.info

