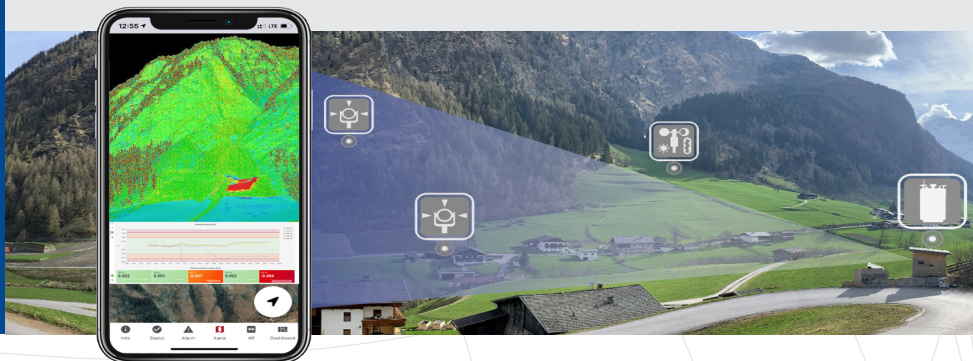


Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“
Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)

Beiträge zum 214. DVW-Seminar am
8. und 9. Dezember 2022 in Fulda



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

Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)

Beiträge zum 214. DVW-Seminar am
8. und 9. Dezember 2022 in Fulda

Redaktion:
Christoph Holst
Agnes Weinhuber

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



Schriftenreihe des DVW
Band 104
Wißner-Verlag

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

www.dvw.de
INTERGEO®

Schriftenreihe des DVW
Band 104

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 ausgewählten 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.geodaesie.info.

Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):
Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022). DVW-Schriftenreihe, Band 104,
Augsburg, 2022, S. x–y.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

ISBN: 978-3-95786-329-4
ISSN 0940-4260

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

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg
Bildnachweis Cover: DMT GmbH

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: Scanning mit Qualitätssicherung

Eike Koller Berit Jost Andreas Wieser Christoph Holst Heiner Kuhlmann Bestimmung einer Referenzgeometrie zur Prüfung von Laserscannern	9
---	---

Andreas Wieser Laura Balangé Peter Bauer Tobias Gehrmann Jan Hartmann Christoph Holst Berit Jost Heiner Kuhlmann Werner Lienhart Mehdi Maboudi Karam Mawas Tomislav Médic Jens-André Paffenholz Florian Pollinger Eva Rafeld Florian Schill Volker Schwieger Erfahrungen aus einem koordinierten Vergleich aktueller Scanner	23
--	----

Florian Schill Daniel Wujanz Jens Hartmann Christoph Holst Jens-André Paffenholz Ringversuch zur Bestimmung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Z+F IMAGER 5016 Serie	39
--	----

Session 2: Scanning natürlicher Oberflächen

Mieke Kuschnerus Roderik Lindenbergh Quantifizierung von Baggararbeiten an der niederländischen Küste mit 4D-Laserdaten	65
---	----

Daniel Czerwonka-Schröder Permanentes Laserscanning im alpinen Umfeld – Zeit- und raum- kontinuierliche Datenerfassung geomorphologischer Prozesse	77
--	----

Corinna Harmening Simone Ott Ramon Butzer Bastian Steinhoff-Knopp Jens-André Paffenholz Punktwolkenbasierte Bestimmung von starkregeninduzierten Bodenabträgen	93
---	----

Jonas Bömer Stefan Paulus Anne-Katrin Mahlein Nutzung von Laserscans zur Ableitung von Sortenbeschreibungs- merkmalen in Zuckerrüben	105
--	-----

Session 3: Scanning heute und morgen

Verica Erić | Matthias Sturmfels
Mapping und Prozessierung mit NavVis in der Automobilindustrie _____ 129

Christoph Herbst | Gian-Philipp Patri
Technologie, Innovation, Fortschritt und Einzigartigkeit anhand des
Beispiels „all new BLK360“ _____ 141

Bastian Plaß | Thomas Klauer
Digital Flash LiDAR Punktwolken – Consumer-Produkt oder geodätische
Zukunftstechnologie? _____ 151

Session 4: Scanning der bebauten Umwelt

Florian Zimmermann | Rainer Krahe | Thomas Artz
Wasser, Muscheln und luftige Höhen – Herausforderungen für den
TLS-Einsatz an der Wasserstraße _____ 171

Jens-André Paffenholz | Anette Eltner | Ulrike Dingerdissen | Holger Flatt |
Harry Fast | Sören Loges | Stefan Ostrau | Matthias Soot | Alexandra Weitkamp
3D-Punktwolkenbasierte Umgebungserfassung für die Detektion
klimarelevanter Immobilienparameter _____ 187

Vorwort

Terrestrisches Laserscanning (TLS) – ein Thema, das die geodätische Fachwelt nun schon seit vielen Jahren beschäftigt und auch zukünftig beschäftigen wird. Getrieben von messtechnischen Weiterentwicklungen, fortschrittlichen Automatisierungsmöglichkeiten in der Erstellung von Laserscans und immer effizienter werdenden Softwareprogrammen zur Analyse der Massendaten, ist der Laserscanner mittlerweile ein Standardinstrument der geodätischen Praxis. Nicht nur besitzt der Laserscanner das Potenzial, etablierte Aufgabenstellungen effizienter zu lösen; vielmehr erschließen sich durch das TLS eine Vielzahl neuer, vor allem interdisziplinärer Fragestellungen. Dadurch hat das Laserscanning großes Potenzial, die geodätische Expertise weiter in Nachbardisziplinen hineinzutragen und vor allem auch den geodätischen Berufsstand in der breiten Öffentlichkeit bekannter zu machen.

Grundlage des Erfolgs des TLS in der Geodäsie ist, dass die Fachwelt ein gutes Verständnis von der verbauten Messtechnik hat, dass die Genauigkeit des Messprodukts zumindest grob abgeschätzt werden kann und dass es Austauschplattformen gibt, in denen Erfahrungswerte geteilt werden können. Genau diese Ziele verfolgt das DVW-Seminar „Terrestrisches Laserscanning 2022“ und die darauf basierende Schriftenreihe. Das diesjährige TLS-Seminar greift hierbei insbesondere vier Themenfelder auf: Scanning mit Qualitätssicherung, Scanning natürlicher Oberflächen, Scanning heute und morgen und Scanning der bebauten Umwelt.

International hoch anerkannte 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 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 danke ich hiermit allen, die an der Entstehung dieses Tagungsbandes durch ihre sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Beiträge mitgewirkt haben.

Christoph Holst

Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design,
Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie

Session 1:

Scanning mit Qualitätssicherung

Bestimmung einer Referenzgeometrie zur Prüfung von Laserscannern

Eike Koller | Berit Jost | Andreas Wieser | Christoph Holst | Heiner Kuhlmann

1 Einleitung

Das Terrestrische Laserscanning erfreute sich in den letzten Jahren zunehmender Beliebtheit und erfuhr in vielen Anwendungen große Akzeptanz. Einer der Hauptgründe hierfür ist der vielfältige Einsatzzweck. Terrestrische Laserscanner (TLS) werden erfolgreich für Aufgaben mit geringeren Genauigkeitsanforderungen wie Bestandsaufnahmen, aber auch für komplexe Anwendungen wie Deformationsanalysen eingesetzt (Vosselman und Maas 2010).

Besonders für die letztgenannten Anwendungen ist es von Bedeutung, Kenntnis über die Qualität der verwendeten Laserscanner und der von ihnen erzeugten Punktwolken zu haben, um fundierte Aussagen über das Messobjekt zu treffen (Holst et al. 2014, Jurek et al. 2017, Kermarrec et al. 2019, Zhao et al. 2019).

Verschiedene instrumentelle, messgeometrische, messobjektabhängige und meteorologische Faktoren beeinflussen die Punktwolke systematisch. Aus diesem Grund soll eine Vorgehensweise etabliert werden, verschiedene TLS zu prüfen und untereinander vergleichen zu können. Mit dieser sollen Aussagen darüber getroffen werden, ob TLS in den von den Herstellern formulierten Spezifikationen arbeiten. Auf Grund der Vielzahl an Einflussfaktoren, welche das Messergebnis beeinflussen können, wird eine Untersuchung empirisch durchgeführt. Hierzu wird eine hochgenaue Referenzgeometrie eines scannbaren Objektes bestimmt und bereitgestellt. Verschiedene Scanner können dann Punktwolken dieses Objektes erstellen, welche mit der Referenzgeometrie verglichen werden.

Bei dem gewählten Objekt handelt es sich um eine ca. 50 m lange und 9,50 m hohe Wand mit einer Sichtbetonoberfläche. Diese Wand ist ein Teil einer Maschinenhalle auf dem Campus Klein-Altendorf (CKA) der Universität Bonn. Diese in [Abb. 1](#) dargestellte Wand wird im Folgenden als „Bonn Reference Wall“ bezeichnet. Die dargestellte Wand, bereits beim TLS-Seminar 2018 vorgestellt (Heinz et al. 2018), wurde verwendet um Aussagen über die Präzision verschiedener Laserscanner besonders hinsichtlich der Messkonfiguration und der Oberflächeneigenschaft des gescannten Objektes treffen zu können. Aufgrund einiger Eigenschaften erweist sich diese Wand für eine Prüfung von TLS als geeignet (siehe Schmitz et al. 2021).

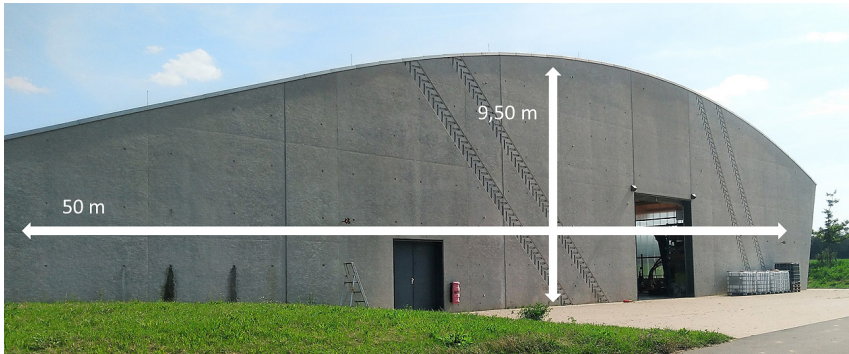


Abb. 1: „Bonn Reference Wall“ auf dem Campus Klein Altendorf

Im Besonderen sind dies

- die Größe der Wand,
- die Stabilität der Wand,
- die Glattheit der Oberfläche.

Ihr Größe erlaubt es, weite Scanfenster abzudecken und verschiedene Messkonfigurationen zu ermöglichen. Des Weiteren ist die Wand Bestandteil einer Maschinenhalle, in dessen inneren sich ein Kalibrierfeld für TLS befindet (siehe Abschnitt 4.2). Hierdurch hat sie ein starkes Fundament. Zudem besteht sie aus einem massiven Baumaterial und kann zunächst als stabil angenommen werden. Hierauf wird in Kapitel 3 noch näher eingegangen. Durch die Glattheit der Sichtbetonoberfläche müssen starke Änderungen der Oberfläche auf kleinem Raum nicht mitmodelliert werden und unerwünschte Glättungseffekte der Punktwolke können vermieden werden (Bitenc et al. 2019).

Untersuchungen von verschiedenen TLS ergaben, dass diese in der Lage sind, Strecken mit einer Standardabweichung von 0,4 mm zu erreichen (Schmitz et al. 2019). Aus diesem Grund soll die Referenzgeometrie eine Standardabweichung in ähnlicher Größenordnung, aber mindestens kleiner als 1 mm, aufweisen. Zudem wird eine räumliche Auflösung von mindestens 2 mm gefordert.

Im Rahmen dieses Beitrages wird anhand des Beispiels der „Bonn Reference Wall“ beschrieben, auf welche Weise eine solche Referenzgeometrie von Oberflächen bestimmt werden kann. Kapitel 2 beschreibt zunächst einen Ansatz mit der Verwendung von Sensoren mit hoher Genauigkeit. Anschließend wird erläutert, auf welche Weise verschiedene TLS und die Mittelung dieser Punktwolken als Referenzgeometrie verwendet werden können. Das Kapitel 3 beschreibt den Umgang mit Deformationen der Wand. Verschiedene Faktoren beeinflussen die Punktwolke systematisch. Kapitel 4 erläutert Ansätze zur Reduktion dieser Systematiken die aus der Realisierung des geodätischen Datums, aus geräte-

internen Abweichungen und aus der Messkonfiguration resultieren. Im Kapitel 5 werden empirische Untersuchungen gezeigt und der Erfolg der Erstellung einer Referenzgeometrie experimentell bewiesen. Kapitel 6 zieht ein Fazit.

2 Methodik

Im Folgenden sollen drei Ansätze zu Erstellung einer Referenzgeometrie der Bonn Reference Wall diskutiert werden:

- Verwendung eines Lasertrackers
- Verwendung eines präzisen Laserscanners
- Verwendung von TLS und Mittelung mehrerer Punktwolken

Die beiden erstgenannten Ansätze verfolgen einen qualitativen Ansatz durch die Nutzung von Sensorik einer höheren Genauigkeitsklasse als TLS, der dritte Ansatz verfolgt einen quantitativen Ansatz und nutzt mehrere TLS, um die Präzision zu steigern und systematische Abweichungen zu reduzieren.

2.1 Verwendung von Sensoren höherer Genauigkeit

Zur Bestimmung der Referenzgeometrie wurden unter anderem zwei unterschiedliche Sensoren verwendet, welche sich durch eine hohe Genauigkeit auszeichnen. Diese sind der Lasertracker AT901B der Firma Leica (Abb. 2 links) sowie der 3D-Scanner 100HSX-SR der Firma Surphaser (Abb. 2 rechts).

Der Lasertracker ist unter Berücksichtigung der Messgeometrie theoretisch in der Lage, 3D-Punkte mit einer Standardabweichung von $30\text{ }\mu\text{m}$ pro Koordinate oder besser zu erstellen. Dieser wird hierfür frontal vor der Wand positioniert und die Wand mit einer vom Lasertracker verfolgten Reflektorkugel abgefahren. Hierbei stellt sich die Größe der Wand als Herausforderung dar. In einem Zeitraum von 8 Stunden konnten lediglich ca. 20 % der Oberfläche durch den



Abb. 2:

Links: Lasertracker Leica AT901B.
Rechts: 3D-Scanner Surphaser
100HSX-SR

Tracker erfasst werden. Zudem können kleine Strukturen durch die Reflektorkugel nicht repräsentiert werden.

Ein weiterer Ansatz war die Nutzung eines 3D-Scanners, welcher in der Lage ist, Distanzen auf kurzen Entfernungen deutlich genauer zu messen als klassische TLS. Analysen zeigen hier allerdings, dass die Präzision der erstellten Punktwolke über die Fläche der Wand sehr inhomogen ist und teilweise die geforderte Standardabweichung übersteigt. Des Weiteren zeigen sich ausgeprägt zyklische Phasenabweichungen in der Punktwolke, welche die Referenzgeometrie systematisch verfälscht (Dorninger et al. 2008).

2.2 Verwendung von Terrestrischen Laserscans

Anstatt einen qualitativen Ansatz zu verfolgen, soll nun die Referenzgeometrie über Mittelung aus einer Vielzahl an Messungen von verschiedenen TLS unterschiedlicher Hersteller und Baureihen erstellt werden. Die Messungen sollen hierbei von kalibrierten TLS in zwei Lagen und in unterschiedlichen Messkonfigurationen erfolgen. Die Referenzgeometrie wird dann durch Mittelung aller Punktwolken erstellt. Dieses Vorgehen soll im Wesentlichen die folgenden Vorteile haben:

- Die Mittelung von Punktwolken reduziert zufällige Abweichungen.
- Unterschiedliche Auftreffwinkel und Distanzen führen zu einer systematischen Beeinflussung der Punktwolke (Soudarissanane 2011). Die hierdurch entstehenden Effekte sollen durch verschiedene Messkonfigurationen und anschließender Mittelung reduziert werden.
- TLS weisen unterschiedliche Restabweichungen hinsichtlich ihrer Kalibrierung auf. Diese beeinflussen somit die Punktwolken systematisch auf unterschiedliche Weise. Durch Mittelung verschiedener Scanner sollen die resultierenden Effekte auf die Punktwolke minimiert werden.

Die Durchführung der Mittelung hat Einfluss auf die abgeleitete Referenzgeometrie. [Abb. 3](#) zeigt qualitativ das Prinzip dieser Mittelung.

Die registrierte Gesamtpunktwolke aller Scans (bestehend aus den schwarzen Punkten) wird zunächst in ein Raster mit passender Größe eingeteilt (gestrichelte Linie). Anschließend wird koordinatenweise der Median der Punkte einer jeden Zelle bestimmt (rote Punkte). Dieser Median entspricht dann einem Kernpunkt, der die Gesamtpunktwolke im Bereich der betreffenden Rasterzelle repräsentiert. Die Gesamtheit aller Kernpunkte ergibt die Punktwolke und stellt die Referenzgeometrie dar.

Potentiell erfährt die Wand in Abhängigkeit zeitvariabler Einflüsse Deformationen. Wenn die gemittelten Scans zu Zeitpunkten mit unterschiedlichen

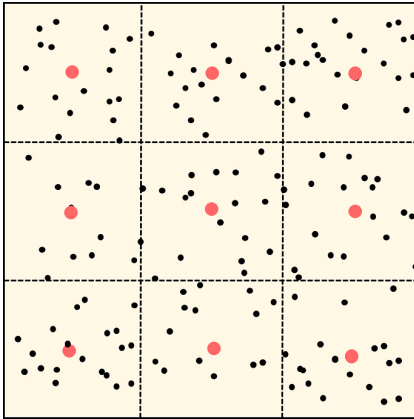


Abb. 3: Schematisches Prinzip der Punktwolkenmittelung

Einflüssen gemacht werden, ist nicht sichergestellt, dass Mittelung auch die Deformation ausreichend reduziert. Daher werden Deformationen zwischen den Scans idealerweise unabhängig von den Punktwolken modelliert und die Punktwolken vor der Mittelung entsprechend korrigiert (siehe Kapitel 3). Zudem sollten alle Effekte, die die einzelnen Punktwolken systematisch beeinflussen bereits vor der Mittelung reduziert sein (siehe Kapitel 4).

3 Deformationsmodell der Wand

In Schmitz et al. (2021) wird gezeigt, dass sich die „Bonn Reference Wall“ im Laufe des Jahres um bis zu 7 mm verformt. Grund hierfür ist sowohl die direkte Sonneneinstrahlung, als auch die Temperatur und Feuchte. Änderungen der meteorologischen Parameter wirken sich direkt auf die aus Holz bestehende Dachkonstruktion aus. Deformationen dieser erzeugen Spannungen im oberen Teil der Wand, was letztlich eine Durchbiegung der Wand zur Folge hat.

Folglich muss ein Deformationsmodell der Wand entwickelt werden, welches in der Lage ist, die Veränderungen der Geometrie, welche durch Umgebungseinflüsse hervorgerufen werden, zu präzisieren, um die Punktwolken der durchgeführten Laserscans um diese Einflüsse korrigieren zu können.

Aus diesem Grund wird in Schmitz et al. (2021) ein konkretes dynamisches Deformationsmodell der „Bonn Reference Wall“ entwickelt. Analysen ergeben, dass die Temperatur zum Zeitpunkt der Messung und die Temperatur eine Stunde zuvor die relevanten Einflussgrößen für die Deformation der Wand sind. Abb. 4 zeigt den Vorteil der Anbringung eines Deformationsmodells. Sie zeigt ein Histogramm von Verschiebungen von Festpunkten auf der Wand aus fünf verschiedenen Epochen relativ zu einer Referenzepoche. Es werden nur Verschiebungen zur Wand dargestellt. Hierbei stellt das blaue Histogramm die Verschiebung ohne Anbringung, und das rote mit Anbringung des Deformationsmodells dar.

Vor der Korrektur hat die orthogonale Verschiebung Wand eine maximale Größe von 1 mm, nach der Anbringung haben 99 % der Verschiebungen in

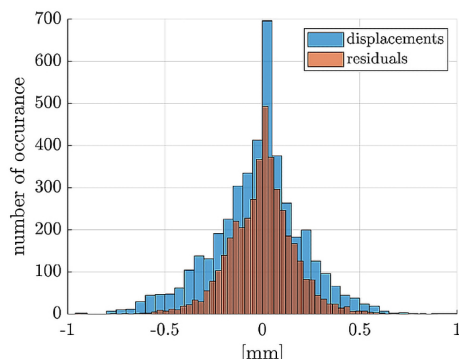


Abb. 4:

Verschiebung der Festpunkte orthogonal zur Wand. Die „displacements“ (blau) zeigen die Verschiebungen vor Anbringung des Deformationsmodells, die „residuals“ (rot) die Verschiebungen nach dessen Anbringung.

diese Richtung nur noch eine maximale Größe 0,5 mm und bei 89 % nur noch eine von 0,25 mm. Die verbleibende Standardabweichung beträgt noch 16 mm, was einer Reduktion von 30 % entspricht.

4 Systematische Abweichungen

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, sollen zur Erstellung der Referenzgeometrie verschiedene Punktwolken von verschiedenen Scannern gemittelt werden. Entstehende Systematiken sollen zuvor reduziert werden. Aus diesem Grund beschreibt Abschnitt 4.1 die Realisierung eines einheitlichen geodätischen Datums und Abschnitt 4.2 thematisiert den Umgang systematischen Instrumentenabweichungen. Abschließend befasst sich der Abschnitt 4.3 mit der Messkonfiguration und deren Einflüssen. Weitere systematische Effekte wie Reflexionseigenschaften der Oberfläche und der Atmosphäre (Friedli 2020) werden aufgrund der Oberflächeneigenschaften der Wand und kurzer Messdistanzen vernachlässigt.

4.1 Realisierung des Datums

Um alle Punktwolken zu einer Referenzgeometrie mitteln zu können, und später Laserscanner an dieser zu evaluieren, ist es notwendig, dass für jede einzelne Messung ein identisches geodätischen Datum vorliegt. Die Qualität der Mittelung und damit die der Referenzgeometrie hängt maßgeblich von der Realisierung eines identischen Datums ab.

Um alle Punktwolken in ein identisches Datum zu überführen, wird zunächst eine zielzeichenbasierte Registrierung durchgeführt. Um hierfür eine möglichst hohe Genauigkeit erreichen zu können, werden die in Janßen et al. (2019) eingeführten BOTA8 (BOnn TArget mit 8-fach Teilung) Zielzeichen verwendet. Mit

diesen Zielzeichen ist die höchste Präzision hinsichtlich der Bestimmung des Mittelpunkts des Zielzeichens zu erwarten. Diese werden gemäß Abb. 5 innerhalb des Messvolumens verteilt.

Fünf Zielzeichen befinden sich, fixiert über magnetische Nester, direkt an der Wand selbst. In einigen Metern Entfernung links und rechts vor der Wand befindet sich jeweils ein weiteres Zielzeichen, welches mit Hilfe eines Statives über einen vermarkten Bodenpunkt zentriert werden kann (siehe Abb. 6). Weitere zwei Zielzeichen befinden am gegenüber liegenden Gebäude, wiederum über magnetische Nester fixiert.

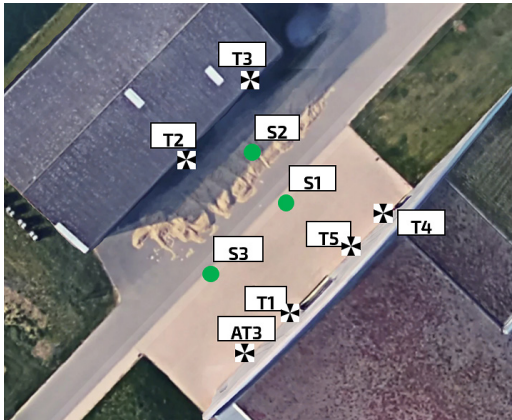


Abb. 5: „Bonn Reference Wall“ mit Zielzeichen und Instrumentenstandpunkten. Kalibrierfeld im Hintergrund



Abb. 6: Zielzeichen über Bodenpunkt

Insgesamt werden so neun Zielzeichen über das gesamte Messvolumen möglichst gleichmäßig verteilt, mit deren Hilfe eine überbestimmte, zielzeichenbasierte Registrierung durchgeführt werden kann. Durch die so entstehende gute Geometrie können hohe Genauigkeiten der Registrierung erwartet werden.

Untersuchungen zeigen aber, dass eine zusätzlich softwarebasierte Feinregistrierung der Punktwolken notwendig ist. Grund hierfür kann die Zentrierunsicherheit der Zielzeichen auf den Stativen sein. Zur Feinregistrierung findet der Iterative-Closest-Points Algorithmus (ICP) Anwendung.

4.2 Systematische Geräteabweichungen

In jedem TLS existieren konstruktionsbedingte mechanische Abweichungen, die zu einer systematischen Beeinflussung der Punktwolke führen. Ähnlich zur Tachymetrie lassen sich einige wesentliche Abweichungen durch eine

Zwei-Lagen-Messung eliminieren. Aus diesem Grund wird hier ein Zwei-Lagen-Scan durchgeführt (Muralikrishnan et al. 2015).

Darüber hinaus versuchen die Hersteller die mechanischen Abweichungen durch eine geeignete Kalibrierung so weit wie möglich zu reduzieren. Diese ist aber durch unterschiedliche Einflüsse über die Zeit nicht zwangsweise konstant (Garcia-San-Miguel und Lerma 2013).

Um eine hoch genaue Referenzgeometrie über verschiedene TLS zu realisieren, werden deshalb alle verwendeten Scanner vor der Durchführung der Messung kalibriert. Das hierfür verwendete Kalibrierfeld wurde in Medic (2020) entwickelt und befindet sich innerhalb der Maschinenhalle.

Die Durchführung einer Kalibrierung vor der Messung führt i. d. R. zu einer Reduktion von systematischen Abweichungen in den Punktwolken. Dies wird durch Abb. 7 gezeigt.

Sie zeigt einen Zwei-Lagen-Vergleich einer unkalibrierten (oben) und einer kalibrierten (unten) Punktwolke durch einen Multi-Scale-Model-To-Model-Vergleich (M3C2) der Leica ScanStation P50. Die Unterschiede von erster und zweiter Lage sind für dieses Beispiel im kalibrierten Fall kleiner.

Zu beachten ist, dass Untersuchungen zeigten, dass besonders bei der Mittelung von Punktwolken eine Kalibrierung nicht immer einen positiven Effekt

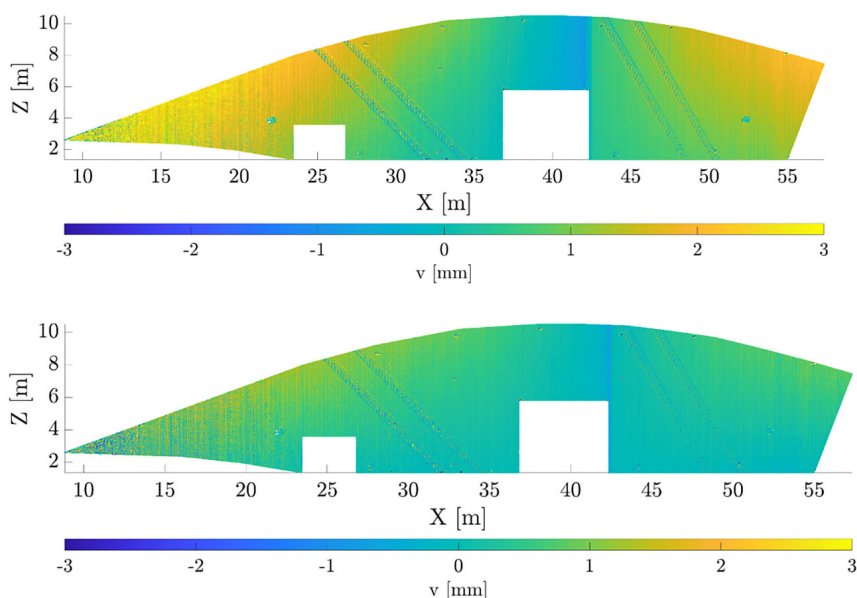


Abb. 7: M3C2-Vergleich von zwei Lagen vor (oben) und nach (unten) der Kalibrierung der Leica ScanStation P50

hat, und systematische Instrumentenabweichungen nicht erfolgreich reduziert werden können. Für die Berechnung der Referenzgeometrie wurden nur Datensätze verwendet, bei denen systematische Abweichungen durch die Kalibrierung reduziert werden konnten.

4.3 Messkonfiguration

Unterschiedliche Auftreffwinkel und Messdistanzen führen zu unterschiedlichen systematischen Abweichungen in der Punktwolke. Besonders die Streckenmessung wird mit zunehmenden Auftreffwinkel und zunehmender Distanz stärker beeinflusst. Aus diesem Grund sind die Standpunkte S1 bis S7 der Laserscanner definiert wie sie in Abb. 5 zu sehen sind. Mit dieser Standpunktverteilung ist gewährleistet, dass die Abstände der Scanner zu der Wand und auch zu den Zielzeichen nicht zu groß sind. Zeitgleich kann jeder Teil der Wand von mindestens einem Standpunkt mit kleinen Auftreffwinkeln gescannt werden.

5 Empirische Untersuchungen

Im Rahmen des koordinierten Vorhabens „COLLECTOR“ (Collaborative scanner test and calibration at Bonn reference wall) wurde die Bonn Reference Wall bereits durch mehrere Institutionen und TLS gescannt. Eine Beschreibung des Vorhabens, die beteiligten Institutionen und verwendete Scanner sind in Wieser et al. (2022) zu finden.

Da eine hochgenaue Referenzgeometrie gesucht ist, sollen nur „High-End-Scanner“ in deren Erstellung Berücksichtigt werden. Konkret liegen zwei durch Mittelung erzeugte Referenzgeometrien vor. Eine dieser ist durch die Mittelung von insgesamt 16 Punktwolken des Zoller&Fröhlich Imager5016 erstellt worden (im Folgenden „Reference 1“ genannt). Alle Daten wurden am selben Tag aufgenommen. Eine zweite Referenzgeometrie (im Folgenden „Reference 2“ genannt) ist durch die Scanner

- Leica ScanStation P50
- Leica HDS7000
- Zoller&Fröhlich Imager5016

entstanden, und besteht aus 22 Scans. Die verwendeten Scanner sind im Besitz verschiedener Institutionen und die erzeugten Punktwolken wurden an verschiedenen Tagen aufgenommen.

Des Weiteren liegen für alle Punktwolken zusätzlich Messdaten über Lufttemperatur und Luftdruck vor, eine Korrektur über ein Deformationsmodell ist

aber noch nicht angebracht. Die Mittelung erfolgte immer mit einer Rastergröße von 2 cm. Mit dieser Auflösung kann die Wand sinnvoll repräsentiert werden. Allerdings ist der Effekt der Rastergröße auf die Referenzgeometrie noch nicht hinreichend untersucht.

Ein Cloud2Mesh-Vergleich (C2M) beider Referenzgeometrien ist in [Abb. 8](#) dargestellt.

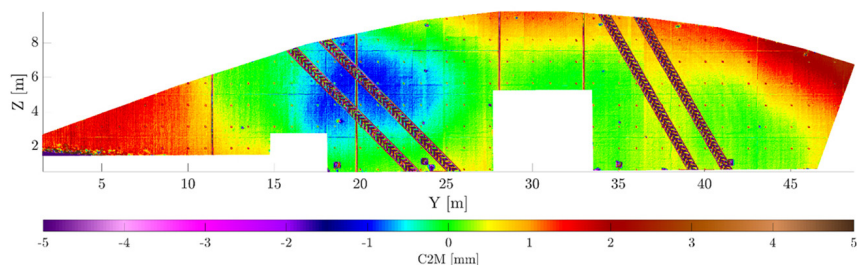


Abb. 8: C2M-Vergleich zwischen Reference 1 und Reference 2

Beide Referenzgeometrien unterscheiden sich um bis zu 5 mm und es sind deutlich Systematiken zu erkennen. Dieser Effekt wird wahrscheinlich durch die Vernachlässigung der Deformationen der Wand bei der Erstellung der Referenzgeometrie Reference 2 hervorgerufen. Besonders die größer werdenden Unterschiede im Randbereich deuten darauf hin. Eine sinnvolle Verwendung dieser Referenzgeometrie ist erst dann möglich, wenn alle verwendeten Punktwolken über ein Deformationsmodell korrigiert werden. Zusätzlich können auch Effekte durch die Realisierung des geodätischen Datums vorhanden sein. Durch erneutes Aufbauen der Zielzeichen an den unterschiedlichen Messtagen und daraus resultierenden Zentrierabweichungen können Systematiken entstehen.

Dennoch können bereits TLS geprüft werden, die Daten am selben Tag aufgenommen haben, an dem auch die Scans für die Referenzgeometrie Reference 1 aufgenommen wurden. Hierzu zeigt [Abb. 9](#) exemplarisch links das Histogramm eines C2M-Vergleichs zwischen Reference 1 und einem „Low-Cost-Scanner“ Leica BLK360 und rechts den C2M-Vergleich zwischen Reference 1 und einem „High-End-Scanner“ Zoller&Fröhlich Imager5010.

Aus diesen Histogrammen können weitere Parameter zur Quantifizierung des Soll-Ist-Unterschiedes abgeleitet werden. In [Tab. 1](#) sind hierfür der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ aufgeführt.

Anhand dieser Daten kann eine Evaluation der Scanner erfolgen. Der Leica BLK360 weist als kostengünstiger Scanner eine höhere Standardabweichung als der Zoller&Fröhlich Imager5010 auf. Auch ist der Betrag des Mittelwertes weiter von Null entfernt, was für noch vorhandene Systematiken sprechen könnte.

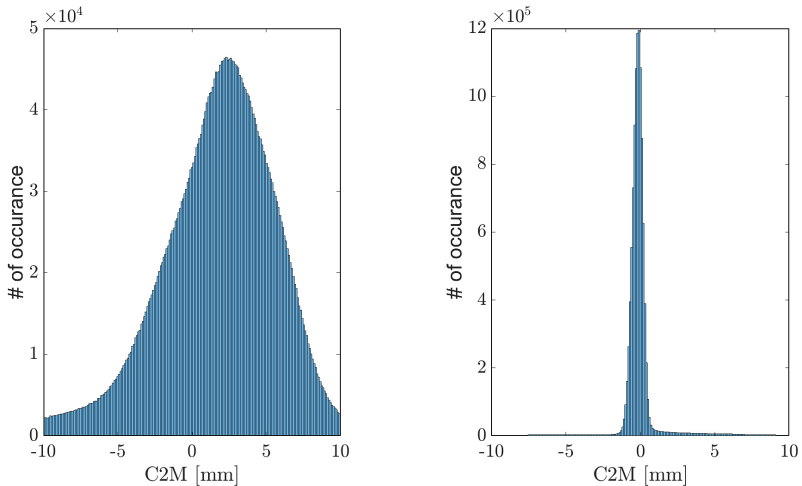


Abb. 9: Histogramm des C2M-Vergleichs von Reference 1 und Leica BLK360 (links) und Reference 1 und Zoller&Fröhlich Imager5010 (rechts)

Tab. 1: Abgeleitete Parameter (Mittelwert und Standardabweichung) der Histogramme aus Abb. 9

Instrument	Mittelwert μ [mm]	Standardabweichung [mm]
BLK360	1,8	3,7
Imager5010	-0,1	1,0

Basierend auf Erfahrung und den Datenblättern entsprechen diese Parameter aber den Erwartungen. Dies bedeutet, dass die Bestimmung einer Referenzgeometrie aus der Mittelung verschiedener Scans vielversprechend ist.

6 Fazit

Es existieren unterschiedliche kalibrierte Punktwolken der „Bonn Reference Wall“ mit dem identischen geodätischen Datum. Diese können gemäß Abschnitt 2.2 gemittelt werden um eine Referenzgeometrie abzuleiten. Auf diese Weise sind bereits zwei Referenzgeometrien bestimmt worden. Hierbei wurde eine durch einen einzelnen Scanner in verschiedenen Scankonfigurationen durch Messungen an einem Tag bestimmt, die andere wurde durch die Mittelung von drei verschiedenen Scannern in unterschiedlichen Scankonfiguration an unterschiedlichen Tagen generiert. Besonders bei der Verwendung von Scans

von unterschiedlichen Messtagen müssen folgende Punkte besondere Beachtung finden:

- Korrektur der Punktwolken über ein Deformationsmodell
- Sorgfältige Realisierung des geodätischen Datums

Potentiell ist die entwickelte Methodik zur Mittelung in dieser Form aber erfolgsversprechend. Zukünftige Arbeiten sollen die Genauigkeit der Referenzgeometrie quantifizieren und Analysen zu einer sinnvollen Anzahl an verschiedenen Scannern liefern. Selbiges gilt für den Mehrwert bzw. den Gewinn der vorherigen Kalibrierung der TLS.

Die zusätzlich vorhandenen Scans können in Zukunft in die Referenzgeometrie mit eingebracht werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich die aktuelle Referenzgeometrie geringfügig ändern wird. Es ist davon auszugehen, dass die Qualität der Referenzgeometrie hierdurch noch weiter gesteigert werden kann.

Literatur

- Bitenc, M., Kieffer, D. S., Khoshelham, K. (2019): Range versus surface denoising of terrestrial laser scanning data for rock discontinuity roughness estimation. *Rock Mech. Rock Eng.* 52(9), 3103–3117. DOI: [10.1007/s00603-019-01755-2](https://doi.org/10.1007/s00603-019-01755-2).
- Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N., Molnár, G. (2008): On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*. 2. 191–204. DOI: [10.1515/JAG.2008.022](https://doi.org/10.1515/JAG.2008.022).
- Friedli, E. (2020): Point Cloud Registration and Mitigation of Refraction Effects for Geomonitoring Using Long-Range Terrestrial Laser Scanning. PhD thesis, ETH Zurich.
- Garcia-San-Miguel, D., Lerma, J. L. (2013): Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 122–136. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2013.02.007](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.02.007).
- Heinz, E., Medić, T., Holst, C., Kuhlmann, H. (2018): Genauigkeitsbeurteilung von Laserscannern anhand realer Messobjekte. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2018 (TLS 2018)*. DVW-Schriftenreihe, Band 93, Wißner Verlag, Augsburg, 41–56.
- Holst, C., Artz, T., Kuhlmann, H. (2014): Biased and unbiased estimates based on laser scans of surfaces with unknown deformations. *Journal of Applied Geodesy* 8, 3, 169–184. DOI: [10.1515/jag-2014-0006](https://doi.org/10.1515/jag-2014-0006).
- Janßen, J., Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019): Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. *Remote Sensing*. 11. 845. DOI: [10.3390/rs11070845](https://doi.org/10.3390/rs11070845).
- Jurek, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2017): Impact of spatial correlations on the surface estimation based on terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy* 11, 3, 143–155. DOI: [10.1515/jag-2017-0006](https://doi.org/10.1515/jag-2017-0006).

- Kauker, S., Holst, C., Schwieger, V., Kuhlmann, H., Schön, S. (2016): Spatio-temporal correlations of terrestrial laserscanning. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten (AVN)* 6/2016, 170–182. Wichmann Verlag, Berlin.
- Kermarrec, G., Paffenholz, J.-A., Alkhatib, H. (2019): How significant are differences obtained by neglecting correlations when testing for deformation: A real case study using bootstrapping with terrestrial laser scanner observations approximated by b-spline surfaces. *Sensors* 19, 17, 3640. DOI: [10.3390/s19173640](https://doi.org/10.3390/s19173640).
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2020): Designing and Evaluating a User-Oriented Calibration Field for the Target-Based Self-Calibration of Panoramic Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing* 12, 15. DOI: [10.3390/rs12010015](https://doi.org/10.3390/rs12010015).
- Muralikrishnan, B., Ferrucci, M., Sawyer, D., Gerner, G., Lee, V., Blackburn, C., Phillips, S., Petrov, P., Yakovlev, Y., Astrelin, A. (2015): Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precis. Eng.*, 40, 139–150. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2014.11.002](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.11.002).
- Schmitz, B., Holst, C., Medic, T., Lichti, D.D., Kuhlmann, H. (2019): How to efficiently determine the range precision of 3D terrestrial laser scanners. *Sensors* 19, 6 (2019), 1466. DOI: [10.3390/s19061466](https://doi.org/10.3390/s19061466).
- Schmitz, B., Kuhlmann, H., Holst, C. (2021): Deformation analysis of a reference wall towards the uncertainty investigation of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy* 15 (3), 189–206. DOI: [10.1515/jag-2020-0025](https://doi.org/10.1515/jag-2020-0025).
- Schofield, W., Breach, M. (2007): *Engineering Surveying*, Sixth Edition; Elsevier, Oxford (UK).
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti M., Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 389–399. Volume 66, Issue 4. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.01.005).
- Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland (UK).
- Wieser, A., Balangé, L., Bauer, P., Gehrmann, T., Gerke, M., Hartmann, J., Holst, C., Jost, B., Kuhlmann, H., Lienhart, W., Maboudi, M., Mawas, K., Médic, T., Paffenholz, J.-A., Pollinger, F., Schill, F., Schwieger, V. (2022): Erfahrungen aus einem koordinierten Vergleich aktueller Scanner. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)*. DVW-Schriftenreihe, Band 104, Wißner Verlag, Augsburg, 23–38. (Dieser Tagungsband)
- 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. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006).
- Zhao, X., Kermarrec, G., Kargoll, B., Alkhatib, H., Neumann, I. (2019): Influence of the simplified stochastic model of tls measurements on geometry-based deformation analysis. *Journal of Applied Geodesy* 13, 3, 199–214. DOI: [10.1515/jag-2019-0002](https://doi.org/10.1515/jag-2019-0002).

Kontakt

M.Sc. Eike Koller | M.Sc. Berit Jost | Prof. Dr. Heiner Kuhlmann
Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG), Universität Bonn
Nussallee 17, 53121 Bonn
e.koller@igg.uni-bonn.de | b.jost@igg.uni-bonn.de | heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

Prof. Dr. Andreas Wieser
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich
Stefano-Franscini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz
andreas.wieser@geod.baug.ethz.ch

Prof. Dr. Christoph Holst
Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie, Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
christoph.holst@tum.de

Erfahrungen aus einem koordinierten Vergleich aktueller Scanner

Andreas Wieser | Laura Balangé | Peter Bauer | Tobias Gehrmann |
Jan Hartmann | Christoph Holst | Berit Jost | Heiner Kuhlmann |
Werner Lienhart | Mehdi Maboudi | Karam Mawas | Tomislav Médic |
Jens-André Paffenholz | Florian Pollinger | Eva Rafeld |
Florian Schill | Volker Schwieger

1 Einleitung

Terrestrische Laserscanner und Software für die Punktwolkenverarbeitung haben einen hohen Reifegrad erreicht und stellen in vielen Anwendungsbereichen eine essenzielle Grundlage für die 3D-Aufnahme und Modellierung dar. Im Gegensatz zur einfachen Bedienung der Scanner und zu den gut etablierten Workflows für die Punktwolkenverarbeitung, ist es nach wie vor sehr schwierig, die Genauigkeit der Punktwolken oder daraus abgeleiteter Größen zu präzisieren. Das liegt zum einen an den vielen und nur beschränkt vom Benutzer oder Hersteller kontrollierbaren Einflüssen wie den Eigenschaften der gescannten Oberflächen oder systematischen instrumentellen Abweichungen. Andererseits sind die in den Datenblättern angeführten Indikatoren für die Genauigkeit häufig nicht hinsichtlich ihrer Praxisnähe optimiert, sondern auf objektive Reproduzierbarkeit und kompakte Darstellung ausgerichtet.

Von dieser Einschätzung ausgehend hat die Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel (GKGM e. V.) ein koordiniertes Vorhaben („COLLECTOR“) zur experimentellen Untersuchung einer Auswahl terrestrischer Laserscanner verschiedener Hersteller initiiert. Zehn Institutionen (siehe [Tab. 1](#)) haben zu COLLECTOR beigetragen. Ziel war es, einen möglichst repräsentativen und umfangreichen Datensatz für nachfolgende Untersuchungen bereitzustellen. Diese Untersuchungen sollten unter anderem die praxisrelevante Beurteilung (i) der Unsicherheiten der Punktwolken und (ii) der Bedeutung benutzerseitiger Scanner-Kalibrierung umfassen. Sie sollten die Möglichkeit eröffnen, verschiedene Scanner ausgewogen miteinander zu vergleichen. Außerdem sollte der Datensatz die Forschung und Entwicklung im Bereich des terrestrischen Laserscannings generell bereichern.

Im vorliegenden Beitrag stellen wir den für die Untersuchungen gewählten Anwendungsfall „flächenhaftes Monitoring einer Betonwand“ sowie erste Erkenntnisse aus den Auswertungen vor. Um hohen Nutzen des kollaborativ

Tab. 1: An COLLECTOR beteiligte Forschungsgruppen

Institution	Abteilung
ETH Zürich	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP)
Leibniz Universität Hannover	Geodätisches Institut (GIH)
Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Abteilung 5 Fertigungsmesstechnik (PTB)
TU Braunschweig	Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP)
TU Clausthal	Institute of Geo-Engineering (IGE)
TU Darmstadt	FG Geodätische Messsysteme und Sensorik (GMSS)
TU Graz	Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme (IGMS)
TU München	Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie (GDS)
Universität Bonn	Institut für Geodäsie und Geoinformation (IGG)
Universität Stuttgart	Institut für Ingenieurgeodäsie (IIGS)

erzeugten Datensatzes und Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten, wurden alle Scans nach einem standardisierten Schema aufgenommen und prozessiert. Die verwendeten Scanner wurden für die hier beschriebenen Arbeiten nicht extra vorab (herstellenseitig) gewartet oder kalibriert und auch sonst nicht speziell vorbereitet. Sie repräsentieren eine Stichprobe von Instrumenten verschiedenen Alters, verschieden umfänglichen und rauen Gebrauchs, verschiedener Hersteller und Typen, und selbst innerhalb der Typen verschiedener Firmware und verschiedenen Wartungszustands. All diese Aspekte beeinflussen die konkreten qualitativen und quantitativen Ergebnisse, sind in der Analyse jedoch nicht gesondert berücksichtigt, es sei denn wir erwähnen das im Einzelfall explizit. Aus diesem Grund lassen die Resultate keine Beurteilung zu, ob Scanner bestimmter Hersteller oder Typen qualitativ besser oder schlechter sind als andere Scanner, sondern gelten zunächst nur für den betreffenden Scanner mit seinem individuellen Zustand zum Zeitpunkt der Messung. Die hier vorgestellten Resultate sind dennoch interessant, weil die Scanner eben nicht speziell vorbereitet wurden, die diskutierten Aspekte über einzelne Scanner hinaus auftreten können und in der Praxis relevant sind.

Der Beitrag ist wie folgt strukturiert: In Abschnitt 2 stellen wir die gescannte Wand, den standardisierten Ablauf für die Datenerfassung und Auswertung sowie die verwendeten Scanner vor. In Abschnitt 3 fassen wir die Erfahrungen und Erkenntnisse im Zusammenhang mit systematischen Abweichungen zusammen,

in Abschnitt 4 die im Zusammenhang mit der Punktwolkenvisualisierung und Punktwolkenverarbeitung. Der Beitrag schließt mit Zusammenfassung und Ausblick in Abschnitt 5.

2 Datenerfassung und Auswertekonzept

Die Scans für die Untersuchungen wurden an der etwa 50 m breiten und bis zu 9,5 m hohen Betonwand (siehe Abb. 1 oben) einer Halle am Campus Kleinaltendorf der Universität Bonn durchgeführt. Diese „Bonner Referenzwand“ eignet sich aufgrund ihrer Größe und annähernd ebenen Oberfläche, der Möglichkeit zur Georeferenzierung mit Hilfe von Scan-Targets (Pfeiler und vermarkte

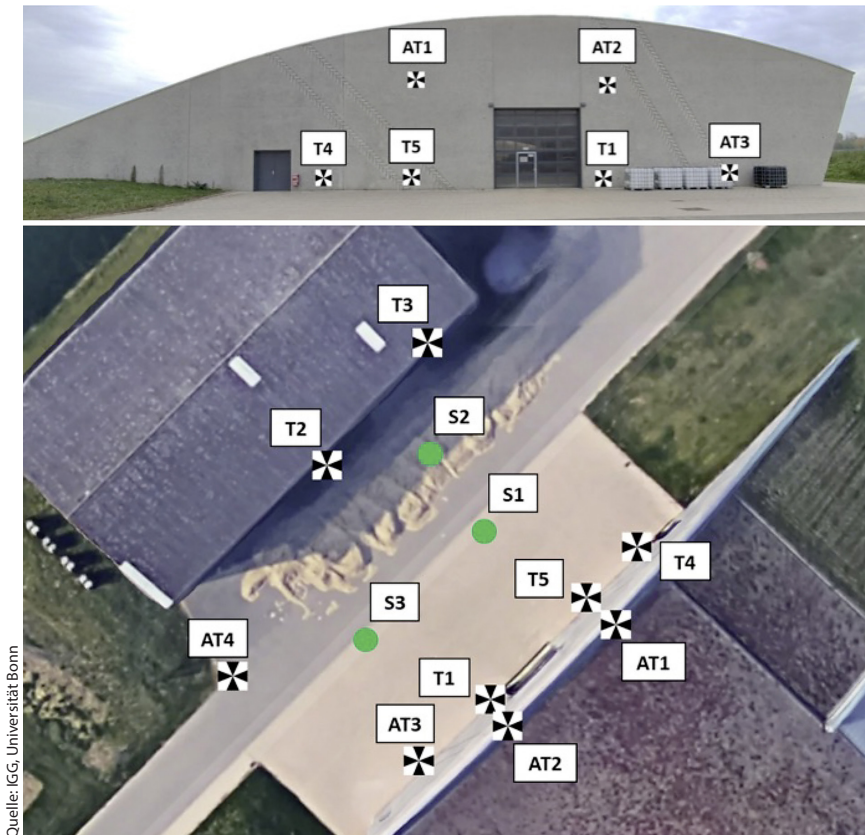


Abb. 1: Referenzwand (oben) und Draufsicht auf Situation (unten) mit Scan-Standpunkten S1-S3 und Referenzpunkten (Zieltafelsymbol, nicht maßstäblich)

Punkte im Umkreis von etwa 200 m, Magnethalterungen zur Aufnahme von 1,5"-Kugeln an der Wand selbst) sowie der relativ hohen Stabilität gut für derartige Zwecke. Ein Bereich im Inneren der Halle ist für die benutzerseitige Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern vorbereitet (Medić et al. 2020). Details zur Referenzwand, insbesondere auch zu den Deformationen über einen Tag (sub-mm bis wenige mm) und über mehrere Monate (bis etwa 7 mm), finden sich in Schmitz et al. (2021) und Koller et al. (2022).

Die Datenerfassung umfasste standardisierte Scans der Referenzwand im Außenbereich und, für Panoramascanner, zusätzlich Scans im Innenbereich gemäß dem Vorschlag von Medić et al. (2020) für die Kalibrierung. Die Kalibrier-scans wurden vor, nach oder zwischen den Scans im Außenbereich durchgeführt. Der maximale zeitliche Abstand zwischen den Scans der Referenzwand und der Kalibrierung betrug damit wenige Stunden. Insgesamt wurden im Rahmen von COLLECTOR etwa 20 Scanner eingesetzt. Der Pool von Instrumenten, die für diese Untersuchung organisiert werden konnte, umfasste ein bis fünf Scanner der folgenden Typen: Faro Focus3D S 120 und X 330; Leica HDS7000, BLK360, RTC360, P-Serie; Riegl VZ-2000; Trimble X7; Zoller+Fröhlich IMAGER 5010 und 5016.

Zur Georeferenzierung wurden BOTA8 Scan-Targets (Janßen et al. 2019), auf den koordinativ bereits bekannten Punkten T1 bis T5 (siehe [Abb. 1](#)) montiert. Die Scans im Außenbereich umfassten dann mindestens zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Scans von Standpunkt S1 und einen von Standpunkt S3 aus, welche etwa einen Abstand von 10 m von der Wand und voneinander haben (siehe [Abb. 1](#)). Dabei wurde der Scanner gezielt jeweils so aufgebaut, dass der Übergang zwischen erster und zweiter Lage bei Panoramascannern etwa in der Richtung orthogonal zur Referenzwand erfolgt, und zwischen den beiden Scans auf S1 um etwa 180° weitergedreht wird. Diese Vorgehensweise verspricht, Abweichungen der Kalibrierung des Scanners gut sichtbar zu machen, da sich mehrere dieser Abweichungen in den unterschiedlichen Lagen verschieden auswirken und damit an der Nahtstelle zwischen den Lagen im Panoramascan sowie beim Vergleich von Punktwolken derselben Oberfläche in erster und zweiter Lage zeigen.

Auch für die wählbaren Scanparameter wurden Vorgabewerte definiert und je nach Scanner entweder entsprechend eingestellt oder bestmöglich approximiert, z. B. Scanauflösung 0,3 mrad, höchste Qualitätsstufe, automatische Neigungskorrektur aus. Akklimatisation der Scanner wurde nach Möglichkeit entsprechend den Empfehlungen des Herstellers sichergestellt, oder durch einen später nicht verwendeten, ersten Scan unmittelbar vor den weiteren. Zusätzlich wurden über alle Scans hinweg, vor allem zu Dokumentationszwecken (bisher jedoch nicht für rechnerische Korrektur von Messdaten), die atmosphärischen Bedingungen aufgezeichnet und allfällige Besonderheiten, wie z. B. beim Scannen nach Regenfällen Nässe des Bodens, festgehalten.

Die in COLLECTOR vereinbarten, standardisierten Auswerteschritte sind in Abb. 2 dargestellt. Sie umfassen primär das Target-basierte Georeferenzieren der originalen (vom Scanner ausgegebenen) Punktwolken, das Zuschneiden, sodass nur noch Punkte der Referenzwand vorliegen, und schließlich ausgewählte Vergleiche der Punktwolken zur Berechnung und Visualisierung von Unterschieden. Für die Scanner, für die auch Kalibriermessungen vom selben Tag aus dem Inneren der Halle vorlagen, wurden anhand dieser die Kalibrierdaten entsprechend Medić et al. (2020) berechnet, die entsprechenden Korrekturen an die originale Punktwolke angebracht und die weiteren Prozessierungsschritte mit diesen „kalibrierten Punktwolken“ unabhängig von der vorherigen Prozessierung der originalen Punktwolken wiederholt.

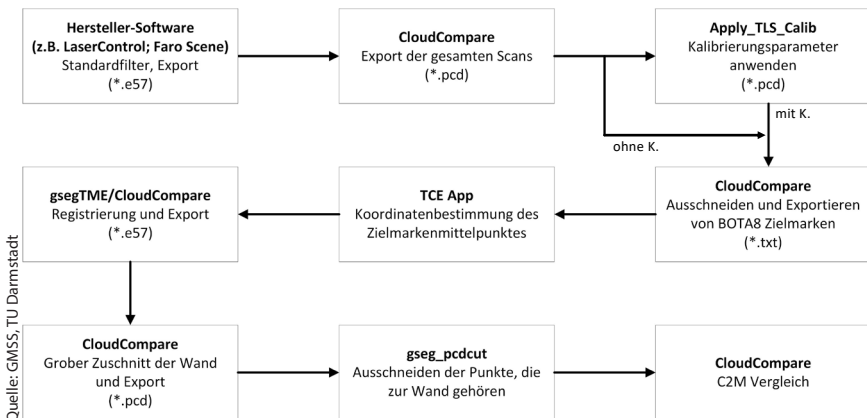


Abb. 2: Benutzte Programme und Workflow

Konkret wurden die vom Scanner ausgegebenen Punktwolken mit Software des betreffenden Herstellers in einem Standardformat exportiert. Allenfalls verfügbare Standardfilter dieser Software, z. B. zur Detektion und Elimination wahrscheinlicher Ausreißer, wurden dabei angewendet. Für die Georeferenzierung wurden die Punktwolken in unmittelbarer Umgebung der Targets manuell ausgeschnitten und diese Punktwolkenteile in einer vom IGG bereitgestellten, proprietären Matlab Toolbox (TCE App) für die Berechnung der Target-Zentren eingesetzt. Die Toolbox basiert auf Janßen et al. (2019). Die Transformationsparameter wurden robust unter Verwendung einer vom IGP/ETH bereitgestellten, ebenfalls proprietären Matlab Funktion (gsegTME) geschätzt, welche Module von Craymer (2020) verwendet. Mit Hilfe dieser Parameter wurde schließlich die Georeferenzierung durch Transformation der gesamten Punktwolke durchgeführt. Dafür wurde neben Matlab in der Regel noch Cloud Compare (www.cloudcompare.org) eingesetzt.

Anhand der im übergeordneten Koordinatensystem bekannten Lage der Referenzwand wurden die georeferenzierten Punktwolken dann, mit Hilfe eines weiteren proprietären Programms (gseg_pcdcut, lauffähig unter Windows) so zugeschnitten, dass nur noch Punkte enthalten sind, deren Orthogonalprojektion auf eine vordefinierte Ebene innerhalb eines ebenfalls vordefinierten Polygons liegt. Ebene und Polygon wurden so gewählt, dass sie die Oberfläche der Referenzwand gut approximieren, ohne jedoch Punkte zu enthalten, die näher als ca. 40 cm an den Kanten der Wand liegen.

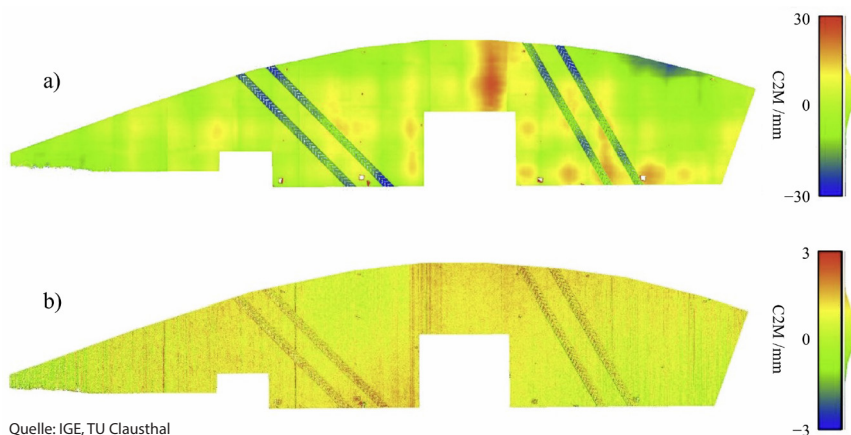


Abb. 3: Exemplarische Resultate für einen Scanner Leica P20: C2M-Abweichungen (a) zwischen Punktwolke von S1 und Referenzebene (dominant: Unebenheit der Oberfläche), (b) zwischen Punktwolke von S1 und von S3 (dominant: Unsicherheiten aufgrund von Georeferenzierung, Auftreffwinkel, Distanz, Kalibrierung, Messrauschen)

Schließlich wurden mit Cloud Compare Cloud-to-Mesh (C2M)-Abweichungen (siehe z. B. Lague et al. 2013) der Punktwolken von einer vordefinierten Referenzfläche sowie zwischen Paaren von Scans berechnet und visualisiert (siehe Abb. 3). Als Referenzfläche diente zunächst die an einen willkürlich ausgewählten Scan bestangepasste Ebene, später ein Mesh basierend auf der Mittelung mehrerer Scans (siehe Koller et al. 2022). Der paarweise Vergleich von Scans wurde einerseits für die beiden Scans von S1 aus durchgeführt, andererseits für die beiden Scans mit annähernd gleicher Scannerorientierung von S1 und S3 aus. Der erste Vergleich zeigt daher die Auswirkung eines Lagewechsels auf die Scans, der zweite zeigt auffällige Effekte, die von Distanz und Auftreffwinkel abhängen. Alle Resultate enthalten Abweichungen aufgrund der Unsicherheiten der Georeferenzierung (RMS der Restklaffungen in der Regel in Größenordnung von 1,5 mm bzw. 0,12 mrad), der auffälligen Deformation der

Referenzwand zwischen den Scans (Größenordnung sub-mm beim Vergleich der Punktwolken desselben Scanners und Tags) und beim Vergleich einzelner Punktwolken mit der Referenzebene auch aufgrund der Unebenheit der realen Oberfläche (Größenordnung mm bis cm) sowie der Deformation über längere Zeiträume (Größenordnung mm).

3 Systematische Abweichungen

3.1 Erkennen und Quantifizieren

Relevante systematische Abweichungen können in den Punktwolken aus Abweichungen in der Registrierung bzw. Georeferenzierung resultieren, aus nicht mehr aktueller oder unzureichender Kalibrierung (Holst et al. 2016), sowie, abhängig von Distanz und Auftreffwinkel, infolge räumlicher Mittelung über den jeweiligen Laserspot (Chaudhry et al. 2021), infolge intensitätsabhängiger Distanzverzerrung (Zámečníková et al. 2014), oder infolge materialabhängiger Eindringeffekte (Lenda et al. 2015). Im Allgemeinen sind diese Abweichungen so klein (sub-mm bis wenige cm), dass man sie an *einer* Punktwolke allein nicht direkt feststellen kann, sondern erst durch den Vergleich mit ausreichend genauen Referenzdaten (z. B. durch Scannen von Probekörpern oder Szenen mit bereits bekannter Geometrie) oder durch den Vergleich verschiedener Scans derselben Szene.

Hinweise auf systematische Abweichungen in Scans ergeben sich durch Diskrepanzen an der Nahtstelle, wo die zuerst gescannten Profile und die zuletzt gescannten bei einem 360°-Scan aneinanderstoßen oder sich sogar geringfügig überlappen. Auch zwischen überlappenden Punktwolken derselben Flächen von verschiedenen Standpunkten oder mit verschiedener Orientierung des Scanners können häufig Diskrepanzen an dieser Nahtstelle festgestellt werden, die entlang ebener Schnitte durch die Punktwolke auftreten, welche die Scannerstandpunkte und die jeweilige Stehachse enthalten. Beispiele dafür finden sich etwa in Lichti et al. (2019), Medić et al. (2020) oder in [Abb. 5](#) (oben) im vorliegenden Beitrag.

Um bei hohen Genauigkeitsanforderungen das Risiko nicht erkannter systematischer Abweichungen zu reduzieren, empfehlen wird daher für die Praxis, (i) die Scans so anzulegen, dass es passende Überlappungen für die Detektion solcher Diskrepanzen gibt, (ii) Scans möglichst in zwei Lagen durchzuführen, und (iii) falls mit zeitabhängigen, distanz- oder auftreffwinkelabhängigen Systematiken gerechnet werden muss, stark überlappende Scans zu verschiedenen Zeiten und von verschiedenen Standpunkten aus durchzuführen.

3.2 Zyklische Distanzabweichungen

Beim Vergleich der Datensätze aus COLLECTOR haben sich bei mehreren Scannern zwischen den von S1 und S3 aufgenommenen Punktwolken Abweichungsmuster mit konzentrischen Kreisen gezeigt (siehe z. B. Abb. 4). Ursachen außerhalb der Scanner (z. B. potentielle Deformation zwischen den Scans, oder Artefakte aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit) können in den vorliegenden Fällen ausgeschlossen werden. Die Muster weisen klar auf zyklische Distanzabweichungen der Scanner hin, wie sie von elektrooptischen Distanzmessern (Rüeger 1996) bekannt sind.

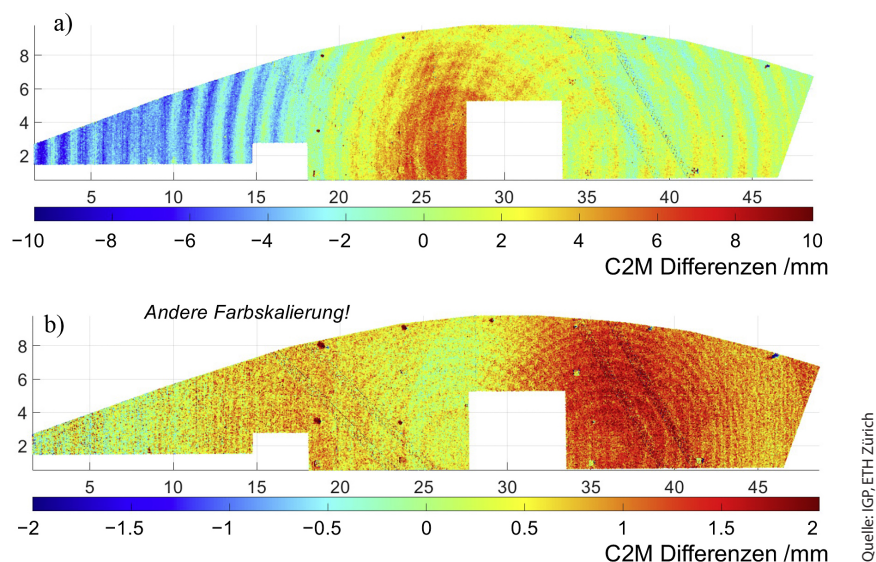


Abb. 4: C2M-Differenzen zwischen Scans von zwei verschiedenen Standpunkten:

(a) Faro Fokus 120S, (b) Leica RTC360

Einzelne wenige Scanner haben in der vorliegenden Untersuchung und im vorliegenden Distanzbereich bis etwa 30 m zyklische Abweichungen von etwa 10 mm oder mehr gezeigt. Bei vielen Scannern konnten zyklische Abweichungen im Bereich bis höchstens 2 mm festgestellt werden, oder aber gar nicht. Da diese Abweichungen nicht nur von der Entfernung abhängen, sondern auch von der Signalintensität, ist die Prüfung und Kalibrierung aufwändig, und die Abweichungen können in der Regel nur durch Vergleich von Punktwolken mit hochgenauen Referenzflächen oder durch Scannen derselben Oberflächen unter verschiedenen Entfernungen aufgedeckt werden. Sie beeinflussen die Punktwolken

jedoch auch, wenn sie nicht aufgedeckt werden, und beeinträchtigen dann etwa die Registrierung und Georeferenzierung, die benutzerseitige Kalibrierung bzw. Selbstkalibrierung, und je nach Konfiguration auch die Ableitung geometrischer Größen aus den Punktwolken.

Als Anwender muss man sowohl bei phasenbasierten Scannern als auch bei Scannern mit Pulsdetektion oder Kombinationsmessverfahren mit zyklischen Abweichungen rechnen. Obwohl zumindest einzelne Hersteller zyklische Abweichungen bestimmen und durch Kalibrierung reduzieren dürften, sind Verfahren zur unabhängigen Prüfung und Kalibrierung solcher Abweichungen noch nicht etabliert, sondern derzeit Gegenstand von Forschung. Aus Anwendungssicht ist daher zu empfehlen, den Scanner durch Testscans zu untersuchen, die etwa der hier vorgestellten Konfiguration entsprechen und die Entfernungsbereiche abdecken, für welche in projektbezogenen Scans hohe Genauigkeit erforderlich ist.

3.3 Kalibrierung

Die im Scanner anfallenden rohen Messwerte von der Distanzmesseinheit und den Winkelencodern müssen aufgrund der Konstruktion der Scanner und der unvermeidlichen Abweichungen des einzelnen Scanners von der idealisierten, korrekten Geometrie korrigiert werden, sodass die resultierende Punktwolke in einem (scannereigenen) kartesischen Koordinatensystem vorliegt. Die von den Herstellern verwendeten Modelle bzw. Formeln dafür sind für die Benutzer normalerweise unbekannt. Die durch werkseitige Kalibrierung bestimmten Parameter für diese Korrekturen sind aufgrund zeitlicher Veränderungen des Scanners sowie äußerer Einflüsse (z. B. durch Temperaturänderungen und Transport) nicht beliebig lange gültig. Untersuchungen haben außerdem gezeigt, dass es möglich ist, Scanresultate qualitativ zu verbessern, wenn durch Selbstkalibrierung oder benutzerseitige Kalibrierung kurz vor bzw. nach den projektbezogenen Scans neue/weitere Korrekturparameter bestimmt werden, siehe z. B. Lichti (2007) und Medić et al. (2019).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung hat sich gezeigt, dass die benutzerseitige Kalibrierung eines Scanners kurz vor oder nach den projektbezogenen Scans in vielen Fällen nicht zu einer deutlichen qualitativen Verbesserung der Punktwolken führt, und in manchen Fällen sogar zu einer Verschlechterung. [Abb. 5](#) zeigt für vier ausgewählte Scanner die C2M-Abweichungen von einer nicht-ebenen Referenzfläche (Mesh) für die originale Punktwolke („ohne K.“) und für die mit den Parametern nach Medić et al. (2020) korrigierte Punktwolke („mit K.“). Diese Resultate zeigen nicht nur die Abweichungen der Scans selbst, sondern auch die der Referenzfläche, welche aus mehreren Scans unterschied-

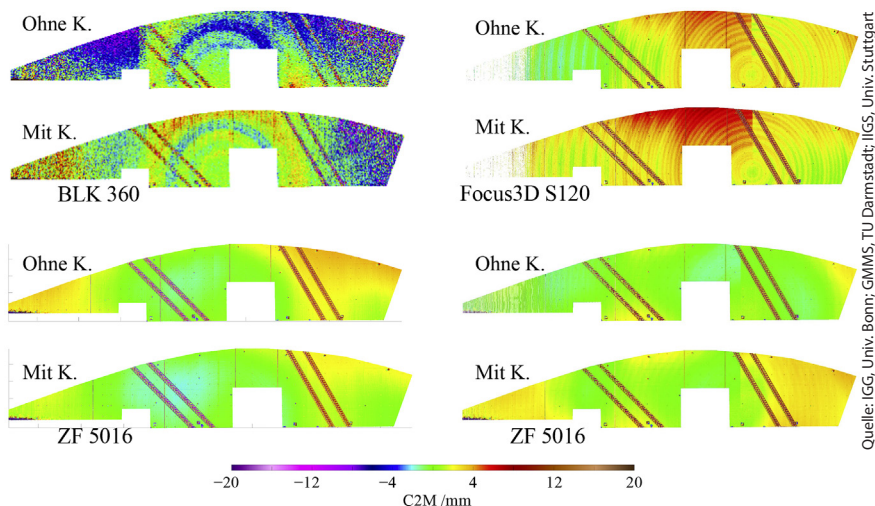


Abb. 5: C2M-Abweichungen zwischen einer Referenzfläche und Scans vor (ohne) bzw. nach (mit) Korrektur um die Parameter aus der benutzerseitigen Kalibrierung für vier verschiedene Scanner (siehe Text für Erläuterung)

licher Scanner durch Mittelung berechnet wurde, siehe auch Koller et al. (2022). Dennoch fällt auf, dass etwa in den Fällen eines bestimmten Faro Focus3D S 120 (rechts oben) und eines Zoller+Fröhlich IMAGER 5016 (rechts unten) die Punktwolke nach der benutzerseitigen Kalibrierung sogar größere Abweichungen als vorher zeigt, und sich z.B. der Übergang zwischen erster und zweiter Lage deutlicher abzeichnet.

Bei einzelnen Scannern, z.B. Leica RTC360, scheiterte die benutzerseitige Kalibrierung derzeit noch daran, dass die ausgegebene Punktwolke nicht auf ein in Bezug auf den Scanner selbst festes und für den Benutzer nachvollziehbares Koordinatensystem bezogen werden konnte. Die Schätzung und spätere Anwendung der Kalibrierparameter setzt ein solches Koordinatensystem jedoch voraus. Eine ähnliche Problematik ergab sich auch bei den Zoller+Fröhlich Scannern, bei denen im Scanner je nach Scanparametern unterschiedliche Korrekturfunktionen bzw. Parameter angebracht werden. Teilweise hatten die COLLECTOR-Teilnehmenden aus Effizienzgründen für die Kalibrierscans jedoch andere Scannereinstellung verwendet als für die Scans im Außenbereich. In diesen Fällen liefert die Kalibrierung Parameter die sich im Grunde auf ein anderes scannereigenes Koordinatensystem beziehen als bei der Anwendung, da die benutzerseitige Kalibrierung nicht von den rohen Encoder-Messwerten der Scanner ausgehen kann (diese werden in der Regel nicht ausgegeben), sondern nur von den Koordinaten in der ausgegebenen Punktwolke.

Weitere Einschränkungen für die Anwendbarkeit der vorab bestimmten Scannerkalibrierung ergeben sich möglicherweise durch Temperaturänderungen und den Transport des Scanners zwischen den Standpunkten. Schließlich ist es auch möglich, dass die Teilmenge an Parametern, die mit dem Verfahren nach Medić et al. (2020) in der Halle bestimmt werden konnte, für die Anwendung auf die Referenzwand nicht ausreichend, nicht repräsentativ, oder aufgrund der Korrelationen zwischen den geschätzten Parametern einfach nicht auf die andere Scankonfiguration übertragbar sind. All dies zeigt für allerhöchste Genauigkeitsansprüche (mm bis sub-mm) Bedarf an weiteren Untersuchungen und möglicherweise insbesondere Bedarf an Selbstkalibrierung direkt im Zuge der jeweiligen Projektskans.

Wiederum bleibt als Empfehlung für die Praxis vorerst nur, durch Scans von unterschiedlichen Standpunkten und mit ausreichender Redundanz und passender Überlappung für Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle zu sorgen. All-fällige Selbstkalibrierung oder benutzerseitige Kalibrierung müsste durch entsprechende Software und standardisierte Datenformate unterstützt werden, die einerseits bestmögliche Schätzung der Kalibrierparameter gewährleisten, andererseits auch den Austausch dieser Parameter zwischen verschiedenen Softwarepaketen und die korrekte Verbesserung der Punktwolken um diese Parameter ermöglichen. Sie müssten auch ausschließen, dass Punktwolken unbeabsichtigt mehrfach oder mit inkompatiblen Parametersätzen „korrigiert“ werden. Ebenfalls hilfreich wäre Firmware, die es für Panoramascanner ermöglicht, Scans bei Bedarf in zwei vollen Kreislagen durchzuführen, also während des Scans eine volle Drehung um 360° durchzuführen, und die aus den beiden Drehungen um je 180° erhaltenen Punktwolken geeignet zu mitteln. In Analogie zur Totalstation wäre in diesem Fall mit einer deutlichen Reduktion auch zeitvariabler Exzentrizitäten und Nichtorthogonalitäten im Scanner zu rechnen. Hier gibt es also sowohl wissenschaftlichen Forschungsbedarf als auch Bedarf an Standardisierung und an herstellerseitiger Weiterentwicklung der Firmware.

4 Punktwolkenweiterverarbeitung und -visualisierung

4.1 Visueller Eindruck

Wenn Abweichungen von Punktwolken visuell und nicht rein quantitativ beurteilt werden, kann durch ungünstige Visualisierung leicht ein falscher Eindruck entstehen. Im Zuge der Diskussionen von COLLECTOR Resultaten hat sich gezeigt, dass der visuelle Eindruck bei der Darstellung derselben Abweichungen mit derselben Farbcodierung in Cloud Compare und in Matlab zu deutlich unterschiedlicher Darstellung und damit Wahrnehmung der Situation führte.

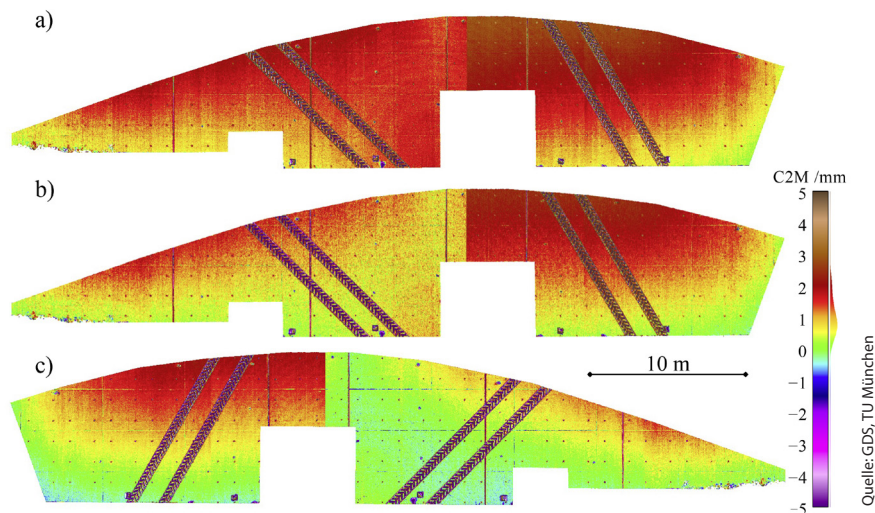


Abb. 6: C2M-Abweichungen einer Punktwolke von einer Referenzfläche bei drei verschiedenen Visualisierungen (a) Cloud Compare von vorne, (b) Matlab von vorne, (c) CloudCompare von hinten

Abb. 6 zeigt einen solchen Fall; alle drei Grafiken zeigen dieselbe Punktwolke, bei der die C2M-Abweichungen von einer Referenzfläche als zusätzliches Attribut der einzelnen Punkte gespeichert ist und dann als Farbe dargestellt wird. Bei der Visualisierung in Cloud Compare dominieren die dem Betrachter nächstliegenden Punkte jeweils den visuellen Eindruck. Weist die Punktwolke in bestimmten Bereichen hohe Streuung auf, dann hängt dieser Eindruck stark von der Blickrichtung ab. Dies ist in Abb. 6 der Fall. Bei Blick von vorne (Abb. 6a) dominieren die näher am Betrachter liegenden und etwa 2 bis 3 mm von der Referenzfläche entfernten (hier rot dargestellten) Punkte, bei Blick von hinten (Abb. 6c) die deutlich weniger von der Referenzfläche abweichenden (hier grün dargestellten) Punkte. Matlab bietet mehr Konfigurationsmöglichkeiten für die grafische Darstellung und liefert, je nach Wahl der Symbolgröße für die Punkte, nochmals einen anderen Eindruck.

Auch bei sorgfältiger Wahl der Visualisierungsmittel und -einstellungen (wie Punktsymbol, Punktgrößen und Farbschema) erscheint es uns empfehlenswert, den visuellen Eindruck durch Wechsel von Blickrichtung und Darstellungsform zu überprüfen, und gegebenenfalls alternative Darstellungen, z. B. Schnitte statt Ansichten, oder separate Darstellungen von Bias und Rauschen innerhalb gleitender Nachbarschaft zu wählen.

4.2 Intensität

Grundsätzlich eignen sich die in der Punktwolke zusätzlich zu den Koordinaten verfügbaren Intensitätswerte sowohl zur Unterstützung der Punktwolkenuisualisierung als auch für verschiedene Zwecke im Zusammenhang mit der Weiterverarbeitung der Punktwolken, etwa für die Abschätzung des Distanzmessrauschens (siehe Wujanz et al. 2017, Schill et al. 2022), oder für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit (siehe z.B. Burton et al. 2011, Suchocki et al. 2020).

Dabei ist jedoch zu beachten, dass es für die Intensitätswerte in Punktwolken keine etablierten Standards gibt, wie diese mit den physikalisch relevanten Parametern, etwa Reflektivität oder empfangener Strahlungsenergie, zusammenhängen, noch in welchen Einheiten und mit welchem Wertebereich Intensitäten in den Punktwolken angegeben werden. Die Wertebereiche und die physikalische Interpretation können daher zwischen verschiedenen Scannern und selbst zwischen verschiedenen Scans mit demselben Instrument stark unterschiedlich sein. Dies ist bei der Weiterverwendung von Intensitätswerten selbstverständlich zu beachten.

Es gibt Scanner, die dem Benutzer verschiedene Varianten von Intensitätswerten zur Auswahl anbieten und deren Hersteller diese auch mit Bezug zu den physikalischen Parametern erklären, etwa wenn die empfangene Signalleistung unter Berücksichtigung der Entfernung in Reflektivität umgerechnet und als solche ausgegeben wird. Es gibt jedoch auch Scanner bzw. herstellereigene Software, die die Intensitätswerte abhängig vom Scan unterschiedlich normiert, so dass diese Werte von Scan zu Scan variieren.

Bereits ein Firmware-Update kann ausreichen, um den Zusammenhang der Intensitätswerte mit den für Messrauschen oder Oberflächenbeschaffenheit relevanten Größen völlig zu ändern. Dies ist in [Abb. 7](#) visualisiert. Sie zeigt die Intensitätswerte eines Scanners bei wiederholten Scans auf unterschiedlich stark aber diffus reflektierende Ebenen in Abhängigkeit von der Entfernung für dieselbe experimentelle Konfiguration vor (oben) und nach (unten) einem Firmware-Patch, welches die standardmäßig bei diesem Scanner ausgegebenen, „distanzunabhängigen“ Intensitätswerte durch Werte ersetzt, die die Abnahme der Signalstärke mit steigender Entfernung wiedergeben. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von z.B. Pfeifer et al. (2007), Tan et al. (2016) oder Heinz et al. (2018) entspricht der Intensitätsverlauf selbst nach dem Firmware-Patch erst ab einer Entfernung von etwa 10 m der Erwartung, und selbst dann nicht der idealisierten quadratischen Abnahme mit der Entfernung.

Wenn die Intensitäten für quantitativen Zwecke genutzt werden sollen, ist es unbedingt erforderlich, die betreffenden Modelle an den jeweiligen Scanner anzupassen und sicherzustellen, dass die zur Verfügung stehenden Intensitätswerte

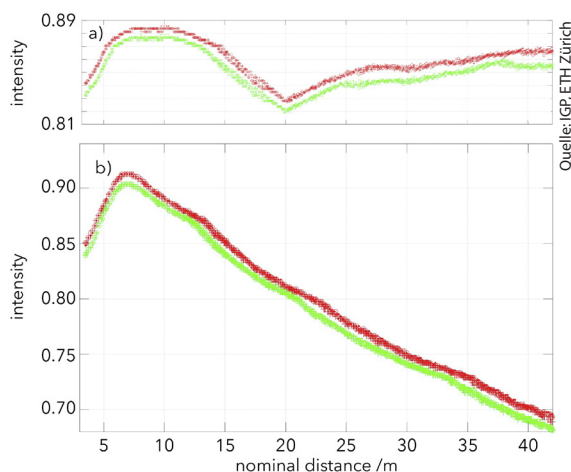


Abb. 7:

Von einem Faro Focus3D ausgegebene Intensitätswerte in Abhängigkeit von der Entfernung für zwei ebene Oberflächen homogener Reflektivität vor (oben) und nach (unten) Firmware-Patch

auch nach einem Firmware-Update sowie für die verwendeten Scan- und Exporteinstellungen den Modellannahmen entsprechen.

5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag haben wir ein kollaboratives Forschungsvorhaben (COLLECTOR) beschrieben, an dem zehn Institutionen beteiligt waren, die sich mit der Qualitätsbeurteilung und Kalibrierung terrestrischer Laserscanner beschäftigen. Sie haben Scans der Bonner Referenzwand nach einem standardisierten Ablauf durchgeführt, georeferenziert und hinsichtlich der Unterschiede zwischen Paaren von Scans sowie der Unterschiede zu Referenzflächen analysiert.

Obwohl detaillierte Analysen der Punktwolken und weitergehende Forschung noch ausstehen, haben sich bereits interessante Erkenntnisse ergeben. Diese sind hier kurz vorgestellt. Sie betreffen vor allem das Aufdecken und die zeitliche Variabilität systematischer Abweichungen, die auf unzureichende Kalibrierung der Scanner zurückgeführt werden können und Größenordnungen von einigen mm bis, in Ausnahmefällen, über 1 cm aufwiesen. Es hat sich gezeigt, dass die benutzerseitige Kalibrierung der Scanner vor Ort in vielen Fällen entgegen der ursprünglichen Erwartung keine Verbesserung der Resultate lieferte. Wir führen das einerseits auf hohe zeitliche Variabilität der (wahren) Parameter zurück, andererseits auf Limitationen bei der Übertragung der (korrelierten) Parameter auf andere Messkonfigurationen sowie den noch nicht ausreichenden Zugang zu originären Messdaten der Scanner.

Zusätzlich sind wir im Beitrag kurz auf Herausforderungen im Zusammenhang mit der Visualisierung eingefärbter Punktwolken eingegangen (Eindruck kann stark von verwendeter Software und Blickwinkel abhängen), sowie auf die Verwendung von Intensitätswerten aus den Punktwolken für quantitative Zwecke (fehlende Standards für Wertebereich, Bezug und mathematischen Zusammenhang mit Strahlungsleistung).

Dank

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden finanziell von der Gesellschaft zur Kalibrierung Geodätischer Messmittel (GKGM e. V.) unterstützt. Prof. Markus Gerke war an der Diskussion von Resultaten beteiligt.

Literatur

- Burton, D., Dunlap, D. B., Wood, L. J., Flaig, P. P. (2011): Lidar intensity as a remote sensor of rock properties. *Journal of Sedimentary Research*, 81(5). DOI: [10.2110/jsr.2011.31](https://doi.org/10.2110/jsr.2011.31).
- Chaudhry, S., Salido-Monzú, D., Wieser, A. (2021): A Modeling Approach for Predicting the Resolution Capability in Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing* (13), 615. DOI: [10.3390/rs13040615](https://doi.org/10.3390/rs13040615).
- Craymer, M. (2020): Geodetic Toolbox. MATLAB Central File Exchange. www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15285-geodetic-toolbox.
- Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., Holst, C. (2018) Strategy for Determining the Stochastic Distance Characteristics of the 2D Laser Scanner Z + F Profiler 9012A with Special Focus on the Close Range. *Sensors* (18), 2253. DOI: [10.3390/s18072253](https://doi.org/10.3390/s18072253).
- Holst, C., Neuner, H., Wieser, A., Wunderlich, T., Kuhlmann, H. (2016): Calibration of Terrestrial Laser Scanners. *AVN* 123, 147–157.
- Janßen, J.: Medic, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019): Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design. *Remote Sensing* 11(7), 845. DOI: [10.3390/rs11070845](https://doi.org/10.3390/rs11070845).
- Koller, E., Jost, B., Wieser, A., Holst, C., Kuhlmann, H. (2022): Bestimmung einer Referenzgeometrie zur Prüfung von Laserscannern. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)*. DVW-Schriftenreihe, Band 104, Wißner-Verlag, Augsburg, 9–22. (Dieser Tagungsband)
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (82), 10–26.
- Lenda, G., Marmol, U., Mirek, G. (2015): Accuracy of Laser Scanners for Measuring Surfaces made of Synthetic Materials. *PFG* 2015(5), 357–372. DOI: [10.1127/pfg/2015/0273](https://doi.org/10.1127/pfg/2015/0273).
- Lichti, D. D. (2007): Error modelling, calibration and analysis of an am–cw terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (61), 307–324. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.10.004).

- Lichti, D. D., Glennie, C. L., Al-Durgham, K., Jahraus, A., Steward, J. (2019): Explanation for the seam line discontinuity in terrestrial laser scanner point clouds. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing* 154, 59–69. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2019.05.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.012).
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2019): Automatic in-situ self-calibration of a panoramic TLS from a single station using 2d keypoints. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences IV-2/W5*, 413–420. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-413-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-413-2019).
- Medić, T., Kuhlmann, H., Holst, C. (2020): Designing and evaluating a user-oriented calibration field for the target-based self-calibration of panoramic terrestrial laser scanners. *Remote Sensing* 12(1), 15. DOI: [10.3390/rs12010015](https://doi.org/10.3390/rs12010015).
- Pfeifer, N., Dorninger, P., Haring, A; Fan, H. (2007): Investigating terrestrial laser scanning intensity data: Quality and functional relations. In *Proc. Int. Conf. Opt.*, 328–337. http://publik.tuwien.ac.at/files/pub-geo_1932.pdf.
- Rüeger, J. M. (1996): *Electronic distance measurement: an introduction*. Springer Verlag, Berlin – New York. 392 S.
- Schill, F., Wujanz, D., Hartmann, J., Holst, C., Paffenholz, J.-A. (2022): Ringversuch zur Bestimmung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Z+F IMAGER 5016 Serie. In: DVW e.V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)*. DVW-Schriftenreihe, Band 104, Wißner-Verlag, Augsburg, 39–62. (Dieser Tagungsband)
- Schmitz, B., Kuhlmann, H., Holst, C. (2021): Deformation analysis of a reference wall towards the uncertainty investigation of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy* 15(3), 189–206. DOI: [10.1515/jag-2020-0025](https://doi.org/10.1515/jag-2020-0025).
- Suchocki, C., Damińska-Suchocka, M., Katzer, J., Janicka, J., Rapiński, J., Stałowska, P. (2020): Remote detection of moisture and bio-deterioration of building walls by time-of-flight and phase-shift terrestrial laser scanners. *Remote Sensing*, 12(11), 1708. DOI: [10.3390/rs12111708](https://doi.org/10.3390/rs12111708).
- Tan, K., Cheng, X., Ding, X., Zhang, Q. (2016): Intensity Data Correction for the Distance Effect in Terrestrial Laser Scanners. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(1), 304–312. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2497310](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2497310).
- 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. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.12.006).
- Zámečníková, M., Wieser, A., Woschitz, H., Ressler, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy* 8(4), 311–326. DOI: [10.1515/jag-2014-0016](https://doi.org/10.1515/jag-2014-0016).

Kontakt

Prof. Dr. Andreas Wieser
ETH Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Stefano-Franscini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz
andreas.wieser@geod.baug.ethz.ch

Ringversuch zur Bestimmung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Z+F IMAGER 5016 Serie

Florian Schill | Daniel Wujanz | Jens Hartmann | Christoph Holst |
Jens-André Paffenholz

1 Einleitung

Die Entscheidung, ob ein Messmittel für eine gestellte Aufgabe in puncto Unsicherheit ausreicht bzw. dafür geeignet ist, wird in der Regel auf Grundlage von Datenblättern getroffen. In der Tachymetrie etwa werden entsprechende Angaben zur Unsicherheit in Datenblättern durch Regularien wie die ISO 17123-3 (2019) spezifiziert. Dies ermöglicht zum einen den direkten Vergleich verschiedener Sensoren, zum anderen kann darüber hinaus die im Feld erreichbare Unsicherheit durch Varianz-Kovarianz-Fortpflanzung abgeschätzt werden. Dies ist insbesondere bei Ingenieurvermessungen wie etwa Deformationsmessungen oder Nachweisen der erreichten Unsicherheit im BIM-Bereich (Level of Accuracy – LOA) wesentlich.

Bei terrestrischen Laserscannern (TLS) ist die Ausgangslage unübersichtlich. Alle Hersteller beziehen sensorspezifische Unsicherheitsangaben der reflektorlosen Distanzmessung, welche eine Schlüsselkomponente von Laserscannern ist, auf individuelle und sehr spezifische Messkonfigurationen, etwa auf unterschiedliche Zielweiten oder variierende Oberflächeneigenschaften. Dies hat zur Folge, dass weder Vergleiche untereinander noch belastbare Abschätzungen für vom Datenblatt abweichende Szenarien möglich sind (Wujanz und Gieltsdorf 2022).

Diese Ausgangslage führt dazu, dass Nutzer dieser Technologie de facto keine belastbaren Nachweise über die erreichte Unsicherheit für die von ihnen erzeugten Produkte liefern können. Hinzu kommt, dass in den meisten Fällen unzutreffende Unsicherheitsangaben aus Datenblättern direkt an die Endkunden weitergeben werden, die diese Informationen häufig ohne zu hinterfragen weiterverwenden.

Ein Grund für diese Ausgangslage liegt in der Komplexität der Messtechnik selbst begründet, deren Unsicherheit durch zahlreiche Einflüsse beeinträchtigt wird, die nicht alle in Datenblättern berücksichtigt werden können. Einen allgemeinen Überblick über Einflussgrößen auf die Ergebnisse aus Laserscannern

geben Lipkowski und Mettenleiter (2019). Der Großteil der veröffentlichten Studien zum Thema Einflussgrößen widmete sich:

- der Objektdistanz (Elkhrachy und Niemeier 2006),
- den Oberflächeneigenschaften (Zámečníková et al. 2014),
- dem Auftreffwinkel des emittierten Signals (Zámečníková et al. 2015, Soudarissanane 2006, Soudarissanane et al. 2011).

Zwar sind einzelne Einflüsse hinreichend untersucht, jedoch ist dadurch nicht geklärt, wie diese zu einem allumfassenden Fehlerbudget zusammengefasst werden können. Darüber hinaus steht man in der Praxis vor dem Problem, dass viele Einflüsse nicht erfasst werden oder bestimmbar sind, wie etwa der lokale Reflexionsgrad einer Oberfläche oder die atmosphärischen Begebenheiten.

Zur Lösung des Problems kann jedoch auf Informationen zurückgegriffen werden, die Laserscanner standardmäßig erfassen. Neben den 3D-Koordinaten wird für jeden Messpunkt auch ein Intensitätswert erfasst, der sich aus dem Verhältnis von gesendeter und empfangener Signalstärke des am Objekt reflektierten Messsignals ergibt. Da die Unsicherheit der Phasenmessung direkt mit dem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) des reflektierten Signals gekoppelt ist (Wujanz et al. 2017) enthält der Intensitätswert sämtliche Auswirkungen der auf den Messprozess wirkenden Effekte (Oberflächenreflexion, Messgeometrie, Atmosphäre usw.). Der letztgenannte Aspekt liegt in der Laser-RADAR-Gleichung begründet, in der alle Einflussgrößen inhärent berücksichtigt sind (Wagner et al. 2006, Wujanz et al. 2018). Im Gegensatz zur Angabe von diskreten Werten, die lediglich unter bestimmten Umgebungsbedingungen und Aufnahmekonfigurationen aussagekräftig sind, werden bei sogenannten intensitätsbasierten stochastischen Modellen stetige Funktionen angegeben, die das zu erwartende Messrauschen mit der gemessenen Intensität verbinden. Kurzum kann aus der erfassten Intensität das Messrauschen abgeleitet werden, auch wenn die Messkonfiguration und die Umgebungsbedingungen nicht bekannt sind. Der Intensitätswert ist jedoch nur dann nutzbar, wenn vom Hersteller der Zugriff auf den Rohwert ermöglicht wird z. B. Zoller+Fröhlich, Riegl, Faro (als ASCII oder mit speziellem Firmwareupdate).

Zahlreiche Studien, die im folgenden Abschnitt diskutiert werden, haben diese Methode erfolgreich an verschiedenen Scannern durchgeführt und dabei unterschiedliche Messkonfigurationen zur Ableitung von intensitätsbasierten stochastischen Modellen entwickelt. Aus Sicht der Praxis stellt sich folglich die Frage, ob Zeit zur Ableitung eines solchen Modells investiert werden sollte oder ob für Scanner des gleichen Typs ein allgemeingültiges und möglicherweise bereits publiziertes Modell genutzt werden kann.

Der vorliegende Beitrag beleuchtet diese Frage und legt zunächst in Abschnitt 2 den aktuellen Stand der Forschung dar. In Abschnitt 3 wird der Ring-

versuch im Detail vorgestellt, während in Abschnitt 4 die Prozessierung der Daten im Fokus steht. Die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 5 diskutiert. In Abschnitt 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein kurzer Ausblick gegeben.

2 Bisherige Arbeiten

Erste Arbeiten zu intensitätsbasierten stochastischen Modellen finden sich in Wujanz et al. (2017). Darin wurde die grundsätzliche Eignung der Vorgehensweise am Beispiel eines Z+F IMAGER 5006h für diverse Objektdistanzen, Auftreffwinkel und Materialien unterschiedlichster Charakteristik nachgewiesen. Das Messrauschen konnte durch wiederholte Distanzmessungen im 1D-Modus bestimmt werden. In einer darauf aufbauenden Studie (Wujanz et al. 2018) stand die Übertragbarkeit auf andere Instrumente (Leica P40 und Riegl VZ400i) im Fokus. Da nicht alle Scanner Hersteller die wiederholte Distanzmessung im 1D-Modus aus Gründen des Arbeitsschutzes (Arbeitsschutzverordnung 2022) freigeben, wurde ein alternatives Verfahren zur Ableitung des stochastischen Modells vorgestellt, dass auf ausgeglichenen Ebenen basierte.

In Schmitz et al. (2019) wurde das Messrauschen ebenfalls aus Abweichungen zu ausgeglichenen Ebenen für die TLS Modelle Leica HDS6100 (baugleich mit der Z+F 5006i-er Serie) und der Leica ScanStation P20 abgeleitet.

In Heinz et al. (2018) wurde ein stochastisches Modell für einen Z+F PROFILER 9012A abgeleitet, der für den Einsatz auf Mobile-Mapping-Plattformen gedacht ist. Da entsprechende Scanner, wie der Name suggeriert, nur über eine Ablenkachse verfügen, können ausschließlich Profile erfasst werden. Bei einer Nutzung im primären Anwendungszweck wird durch Bewegung des Scanners im Objektraum die Abtastung um eine weitere Raumrichtung erweitert. Die Ableitung des intensitätsbasierten stochastischen Modells erfolgte durch Beobachtung von Ebenen, wobei das Messrauschen aus wiederholten Profilmessungen abgeleitet wurde.

Bis dato wurden für die in Tab. 1 aufgeführten TLS intensitätsbasierte stochastische Modelle abgeleitet. Dabei wurde immer lediglich ein einzelnes Seriengerät untersucht, teilweise mit unterschiedlichen Regressionsmodellen und/oder einer anderen Erfassungsmethode (1D vs. 3D). Diese Untersuchungen zielten hauptsächlich auf die Methodik ab, jedoch sind die abgeleiteten Modelle nicht für die Praxis nutzbar, da die Übertragbarkeit auf ein anderes Serienmodell nicht nachgewiesen wurde.

Unabhängig von der gewählten Strategie zur Ableitung des intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Distanzmessung gilt es im Rahmen von Messreihen unter variierenden Aufnahmekonfigurationen das jeweilige Mess-

Tab. 1: Überblick über intensitätsbasierte stochastische Modelle für die Distanzmessung in der Literatur

Wujanz et al. 2017	Z+F I5006h	1D	*1
Wujanz et al. 2018	Z+F I5006h	3D	
	Riegel VZ-400i	3D	*2
	Leica P40	3D	*3
Heinz et al. 2018	Z+F P9012A	2D	
Schmitz et al. 2019	Leica P20	3D	*4
	Z+F I5006i / Leica HDS 6100	3D	

*1 Regressionsanalyse ohne Parameter c ; *2 Impulslaufzeit Scanner; *3 Funktionaler Zusammenhang zwischen Rohintensität und angezeigtem Wert über persönlichen Kontakt; *4 nur bis 20 m gültig, da die angezeigten Intensitäten entfernungsabhängig skaliert werden)

rauschen in Abhängigkeit von der vorliegenden Intensität zu bestimmen. Dabei ist es entscheidend, eine möglichst große Bandbreite an Intensitäten abzudecken, wobei niedrige Signalstärken z. B. bei großen Objektdistanzen und „dunklen“ Oberflächen die Form der Funktion maßgeblich beeinflussen. Aus diesen Messkonfigurationen lässt sich dann aus den beobachteten Streuungen der Distanzmessungen und den registrierten Intensitäten ein funktionaler Zusammenhang ableiten, der als intensitätsbasiertes stochastisches Modell der Distanzmessung bezeichnet wird (Wujanz et al. 2017).

Allgemein gilt der folgende Zusammenhang:

$$s_D = a I^b + c \tag{1}$$

Die Bestimmung eines solchen intensitätsbasierten stochastischen Modells ist aus mathematischer Sicht ein Problem der nichtlinearen Regressionsanalyse. Das dabei verwendete Modell besteht aus einer unabhängigen Variable (Prädiktor) und einer abhängigen Variable (Response). Im konkreten Fall ist der Prädiktor die registrierte Intensität I und die Response, die abgeleitete Distanzmessunsicherheit s_D aus wiederholten Messungen, siehe [Abb. 1](#).

Der Parameter a beschreibt dabei den Skalierungsfaktor der Distanzstandardabweichung s_D . Die Krümmung des Graphen wird durch den Parameter b bestimmt und der Parameter c fügt ein konstantes weißes Rauschen (Grundrauschen, Offset bezogen auf Nulllevel) hinzu. Die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Form des Graphen sind allerdings hoch korreliert und wirken nicht getrennt voneinander (Kermarrec et al. 2018), sodass diese immer in Kombination betrachtet werden müssen.

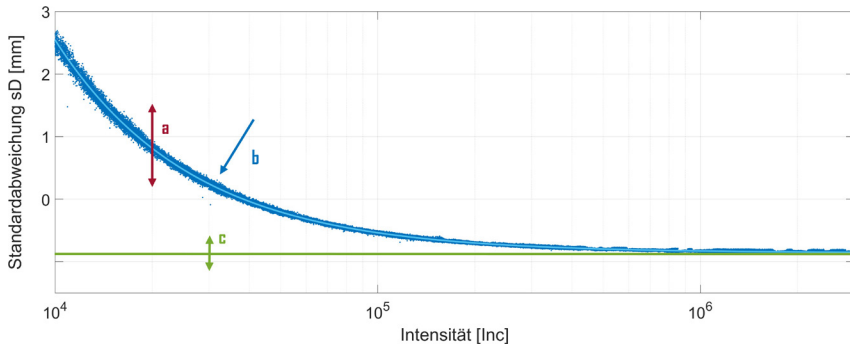


Abb. 1: Auswirkung der einzelnen Parameter des intensitätsbasierten stochastischen Modells

Aus der Analyse zusammengehöriger Messreihen von Distanzmessungen und Intensitäten werden Wertepaare für eine Regressionsanalyse gebildet, siehe [Abb. 1](#), in dunkelblau, mit denen der Zusammenhang (hellblau) zwischen Distanzmessunsicherheit und Intensität modelliert werden kann. Prinzipiell wird die Streuung einer Distanzmessreihe s_D mit einem repräsentativen Intensitätswert I_k verglichen bzw. als Variablenpaar (Response, Prädiktor) einer Regressionsanalyse betrachtet. [Abb. 1](#) zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen der Größe der Distanzmessunsicherheit und der Intensität für einen Z+F IMAGER 5016 des Ringversuches bei einer Lasermessrate von 1100 kHz. Mit einem so definierten stochastischen Modell kann für jede Distanzmessung auf der Basis des gleichzeitig erfassten Intensitätswertes ein Qualitätsmaß in Form einer Standardabweichung vorhersagt werden, dass sich anschließend mittels Varianzfortpflanzung mit den Unsicherheiten der Winkelencoder zu den gesuchten Unsicherheitsangaben für die Koordinaten von dreidimensional ermittelten Objektpunkten verarbeiten lässt.

3 Vorstellung des Ringversuchs zur Ableitung eines allgemeingültigen intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Distanzmessung der Z+F IMAGER 5016 Serie

Um die Defizite für die Praxis der vorhergehenden Untersuchungen zu überwinden und so ein allgemein nutzbares intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Distanzmessung abzuleiten, wurden insgesamt acht Z+F IMAGER 5016 untersucht. Diese decken die Baujahre bis einschließlich 2020 ab und stellen somit eine repräsentative Stichprobe der gesamten Serie dar. Für alle Geräte

wurde dieselbe Berechnungsstrategie verwendet, um im Endeffekt vollständig vergleichbare Ergebnisse zu generieren.

Die Scanner stammen von der Universität Bonn (IGG), der TU Clausthal (IGE), der TU Darmstadt (GMSS) und der Leibniz Universität Hannover (GIH), darüber hinaus wurden vier Leihgeräte von Zoller+Fröhlich zur Verfügung gestellt. Dafür möchten sich die Autoren an dieser Stelle noch einmal herzlich bedanken.

Neben der Ableitung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Scannerserie, also der Beantwortung der Frage *„Messen alle TLS bei gleicher Intensität mit der gleichen Unsicherheit?“* konnte außerdem noch geklärt werden, dass unterschiedliche **Probekörpermaterialien** keinen signifikanten Einfluss auf die Modellbestimmung haben.

3.1 Messkonzept

Für 3D-TLS wurden in der Literatur bis dato zwei Ansätze zur Ableitung von Distanzmessunsicherheiten umgesetzt: 1D-Modus (Wujanz et al. 2017) und 3D-Modus (Wujanz et al. 2018, Schmitz et al. 2019). Grundsätzlich werden bei beiden Ansätzen Probekörper unterschiedlicher Reflexivität in unterschiedlichen Entfernungen angemessen, umso möglichst den gesamten nutzbaren Intensitätsbereich (siehe Abschnitt 3.2.3) abzudecken.

Im 1D-Modus werden dazu die Horizontal- und Vertikaldrehung des TLS abgeschaltet, sodass ein einzelner Messpunkt wiederholt sehr hochfrequent angemessen wird. Dieser Messmodus ist nach der (Arbeitsschutzverordnung 2022) nicht augensicher und muss vom Hersteller freigegeben werden. Der TLS befindet sich nicht in einem normalen Betriebsmodus: Aufgrund der fehlenden Rotation wird keine Messung der Referenz durchgeführt, was zu einer erhöhten Temperaturdrift führen kann, außerdem können Speckle-Effekte das Distanzmessrauschen beeinflussen (Hering 2017).

Bei dem Auswerteanatz im 3D-Modus wird ein möglichst planarer Probekörper angemessen, als Distanzmessrauschen werden die Abweichungen zu einer ausgleichenden Ebene durch die gemessene Punktwolke angenommen. Die Planarität des Probekörpers muss deshalb deutlich unterhalb der Messunsicherheit des TLS liegen, da das Ergebnis ansonsten entsprechend verzerrt wird. Der TLS befindet sich in einem normalen Betriebsmodus, sodass keine weiteren Maßnahmen zu treffen sind.

Beide Ansätze liefern pro Messung ein Paar aus Distanzmessunsicherheit und Intensität, sodass mit vertretbarem Aufwand lediglich eine kleine Stichprobe (je-weils < 100 Messungen) erfasst werden konnte.

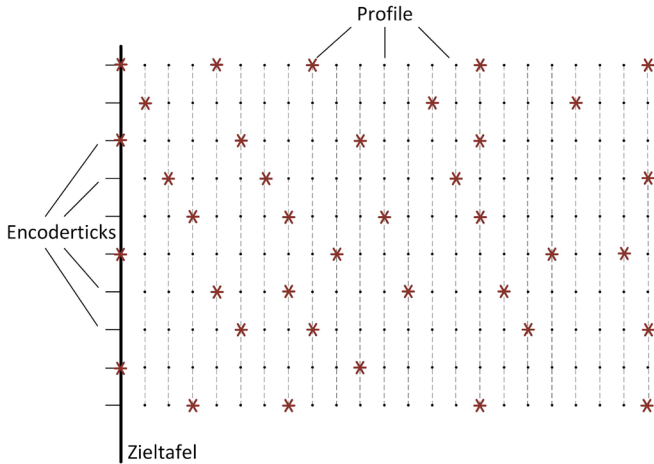


Abb. 2:
Darstellung der
profilweisen
Erfassung eines
Probekörpers
und die daraus
entstehenden
Encodertick-
Messreihen

Für Profillaserscanner (z. B. Profiler 9012a) wurde von Heinz et al. (2018) eine weitere Methodik vorgeschlagen, die auf wiederholten Profilmessungen aufbaut und somit ebenfalls in einem normalen Betriebsmodus durchgeführt werden kann. Jeder Scan besteht dabei aus Hunderten überlagerten Scanprofilen, siehe [Abb. 2](#).

Die Messungen werden dann anhand ihres Vertikalwinkels (Vertikalenncoderwert) sortiert. So entsteht für jeden existierenden Vertikalenncoderwert eine Messreihe, für die angenommen werden kann, dass immer derselbe Punkt angemessen wurde. Aus diesen Messreihen kann die Streuung der Distanz s_D und aus den Intensitätswerten eine mittlere Intensität I_k berechnet werden. Durch dieses Vorgehen kann pro Messung eine Vielzahl an auswertbaren Paaren aus Distanzmessunsicherheit und Intensität generiert werden.

Aufgrund der Vorteile dieser Methodik wurde für die Umsetzung des Ringversuches sich an der Vorgehensweise in Heinz et al. (2018) orientiert. Für die Messung werden jedoch 3D-TLS (Z+F IMAGER 5016) verwendet, die im Profilmodus betrieben werden, d. h. der Horizontalwinkel wird konstant gehalten, sodass lediglich der hochfrequent rotierende Vertikalspiegel verwendet wird. Der 3D-TLS befindet sich somit ebenfalls in einem normalen Betriebsmodus, sodass keine weiteren Maßnahmen zu treffen sind. In diesem Zusammenhang werden im nächsten Abschnitt zunächst die relevanten Parameter des Z+F IMAGER 5016 kurz thematisiert.

3.2 Z+F IMAGER 5016

Die vom Hersteller zur Verfügung stehenden Angaben zur Distanzmessunsicherheit beruhen für den Z+F IMAGER 5016 auf der Lasermessrate 137 kHz und reichen von 0,2 mm (weiß, Reflexionsgrad 80 % in 10 m) bis 9,6 mm (schwarz, Reflexionsgrad 14 % in 200 m). Für höhere bzw. niedrigere Lasermessraten, siehe Tab. 2, müssen die Angaben mit dem Faktor $\sqrt{2}$ skaliert werden. Der Faktor entspricht der Verringerung der Unsicherheit bei der Mittelung zweier gleichgenauer Messungen.

Tab. 2: Übersicht der Lasermessraten des Z+F IMAGER 5016 in kHz für die Kombination aus Auflösung und Qualitätseinstellung

	Low	Balanced	Quality+	Quality++
preview	–	34	–	–
low	137	68	34	–
middle	275	137	68	34
high	550	275	137	68
super high	1100	550	275	137
ultra high	–	1100	550	275
extremly high	–	–	1100	550

3.2.1 Unsicherheit des Vertikalwinkels (Vertikalencoder)

Aufgrund der deutlich niedrigeren Herstellerangabe zur Vertikalwinkel-Messunsicherheit des Z+F IMAGER 5016 ($0,004^\circ$) im Vergleich zum Z+F Profiler 9012A ($0,02^\circ$) können jedoch deutlich größere Probekörper verwendet werden: theoretisch bis zu knapp 1,5 m. Praktisch wurden jedoch 1 m große Probekörper eingesetzt, von denen lediglich ein Ausschnitt von 0,8 m verwendet wurde. So konnte der Messablauf unkompliziert umgesetzt werden, ohne dass Probleme an den Probekörperkanten auftraten.

3.2.2 Auflösung des Vertikalwinkels (Vertikalencoder)

Der Vertikalencoder der Z+F IMAGER 5016 hat eine Auflösung von 200.000 Encoderticks pro 360° . Je nach Kombination aus Lasermessrate (34, 68, 137, 275, 550, 1100 kHz) und Rotationsgeschwindigkeit (7, 14, 27, 55 RPS) wird davon pro Profil ein gewisser Anteil (1250–80.000) der möglichen Encoderticks getroffen.

Da die Verteilung über die Encoderticks relativ gleichmäßig stattfindet, sind nach einer gewissen Zeitspanne alle Encoderticks mit einer gleichmäßigen Anzahl an Messungen besetzt. Wenn die Lasermessrate halbiert wird, verdoppelt sich die Messdauer, bis alle Encoderticks mit der gleichen Anzahl an Messungen belegt sind.

Bei einer angedachten Anzahl von ~1000 Messungen pro Encodertick dauert die Erfassung eines einzelnen Scans bei 1100 kHz ca. 3 Minuten, bei 34 kHz hingegen würde dies schon 98 Minuten dauern. Bei einer über den Intensitätsbereich verteilten zweistelligen Gesamtscananzahl pro TLS ist dies zeitlich nicht mehr realisierbar, daher wurde sich für den Ringversuch auf zwei Lasermessraten: 1100 kHz und 550 kHz beschränkt. Die weiteren Lasermessraten wurden lediglich exemplarisch anhand von jeweils 5 Scans mit einem Scanner erfasst. Diese wurden genutzt, um die Gültigkeit der Skalierung der Modelle nachzuweisen.

3.2.3 Definition Intensitätsmessbereich

Der Intensitätsmessbereich des Z+F IMAGER 5016 liegt per Definition zwischen 0 und 5.307.070 Inkrementen [Inc], wobei Messungen unter 5000 Inkrementen von der Herstellersoftware direkt herausgefiltert werden. Der Intensitätsmesswert ist für die Bestimmung des intensitätsbasierten stochastischen Modells von zentraler Bedeutung und wird daher in Abschnitt 4 detaillierter thematisiert.

3.3 Messkonfiguration/Probekörper

Um möglichst einen Großteil des Intensitätsbereiches abzudecken, müssen Probekörper mit unterschiedlichen radiometrischen Eigenschaften in unterschiedlichen Entfernungen eingesetzt werden. Für diesen Zweck bieten sich zunächst spezielle Reflexionsstandards an, die mit einem Reflexionsgrad von 2 % bis 99 % erhältlich sind. Zusätzlich wurden noch preisgünstigere Alternativen eingesetzt. Somit kamen im Rahmen des Ringversuches insgesamt 3 unterschiedliche Materialien zum Einsatz:

- Spectralon: weist einen äußerst hohen und gleichmäßigen Reflexionsgrad auf und wird daher vielfach als Reflexionsstandard verwendet. Das Reflexionsverhalten entspricht einem Lambert'schen Reflektor, Spectralon reflektiert also sehr diffus bzw. matt.
- Lackierte Multiplexplatten (Holz): Auswahl unterschiedlicher matter Lackierungen aus dem Baumarkt, schwarz (Tafelkreidelack), grün, grau und weiß.
- Bedruckte Alucoreplatten: Aluminium-Verbundplatten, bestehend aus zwei Deckblechen und einem Wabenkern aus Aluminium. Diese wurden mit unterschiedlichen Graustufen bedruckt.



Abb. 3: Verwendete Probekörper: Links: Spectralon, Mitte: bedruckte Alucoreplatten, rechts: lackierte Multiplexplatten

Grundsätzlich sind lediglich die Reflexionsgrade der Spectralon Targets bekannt, die bei dem in [Abb. 3](#) links dargestellten Probekörper in 5 Abstufungen von 5 % bis 95 % reichen. Aufbauend auf diesen Angaben konnten für die weiteren Probekörper auf Basis der gemeinsamen Messungen approximative Werte für die weiteren Probekörper abgeleitet werden, siehe [Tab. 3](#).

Im Endeffekt definiert der Probekörper mit dem niedrigsten Reflexionsgrad den notwendigen Distanzmessbereich, mit dem ein Großteil des Intensitätsmessbereiches (10.000 – 3.000.000 Inc) abgedeckt wird. Entsprechend den Angaben in [Tab. 3](#) reicht bei Spectralon und Holz bereits eine maximale Messentfernung von ungefähr 60 m aus, während bei den bedruckten Alucoreplatten Messentfernungen von bis zu 115 m notwendig sind.

Dabei haben größere Messentfernungen gleich mehrere Nachteile: Zunächst wird ein deutlich größeres räumliches Areal für die Messungen benötigt, die Anzielung der Probekörper ist schwieriger und benötigt mehr Zeit. Der Hauptnachteil ist jedoch die mit der Entfernung abnehmende Anzahl an Messungen,

Tab. 3: Reflexionsgrade der eingesetzten Probekörper

Spectralon	Lackiertes Holz*	Bedrucktes Alucore**
95 %	~ 95 %	~ 99 %
50 %	~ 50 %	~ 95 %
20 %	~ 10 %	~ 50 %
10 %	~ 3 %	~ 20 %
5 %	–	–

* Approximation auf der Grundlage von Messungen mit demselben Scanner auf beide Materialien;

** Approximation auf der Grundlage von Messungen mit verschiedenen Scannern auf beide Materialien; Spectralon wird für * und ** als Referenz verwendet

die noch auf den Probekörper treffen. Es wird somit bei gleicher Messdauer deutlich weniger Messinformation generiert. Somit sollten immer kürzere Messentfernungen bevorzugt werden.

4 Daten und Prozessierung

Die Profilmessung mit dem Laserscanner erzeugt für jeden Objektpunkt in jedem Profil ein Wertetripel, bestehend aus Distanzmessung, Vertikalencodermessung und einer Intensität. Die Messungen der Distanz und des Vertikalencoders entsprechen dabei denen eines gewöhnlichen Polarmessgerätes. Die zusätzlich aufgezeichnete Intensität repräsentiert die empfangene Signalstärke des am Objektpunkt reflektierten Distanzmesssignals.

Diese Messreihen werden im Folgenden als Encodertick-Messreihen bezeichnet und sind die Grundlage für die weitere Datenanalyse. Diese Analyse liefert über die berechnete Streuung der Messreihen hinaus quantitative Werte für die Unsicherheiten von Distanzen und Intensitäten.

Dabei ist zu beachten, dass die verfügbaren Messwerte das Ergebnis einer Diskretisierung von analogen Messwerten sind. Dies ist insbesondere für die Intensitäten von Bedeutung, da dieser auch als Quantisierung bezeichnete Vorgang in diesem Fall mit einer intensitätsabhängigen nichtlinearen Zuordnung durchgeführt wird. Wegen seiner Bedeutung für die weitere Auswertung wird er im nächsten Abschnitt zunächst ausführlich beschrieben.

4.1 Quantisierung des Intensitätsmesswerts

Die vorliegenden Intensitätswerte sind quantisierte Werte, d. h. alle Intensitätsmesswerte in einem bestimmten Intervall (sog. Quantisierungsintervall) wurden einem Intensitätswert I_k der k -ten Quantisierungsstufe zugeordnet.

Die Quantisierungsintervalle q werden mit zunehmenden Intensitätswerten I_k größer. Durch diese Vergrößerung wird vom Hersteller eine annähernde (d. h. abschnittsweise) logarithmische Zunahme angestrebt, die ein möglichst konstantes Signal-Rausch-Verhältnis über den gesamten Intensitätsbereich für die (quantisierten) Intensitäten I_k gewährleisten soll. Tab. 4 zeigt, für welche Abschnitte des verfügbaren Intensitätsbereichs I welche Intervallgrößen q vom Hersteller zur Angabe des Intensitätswertes I_k verwendet werden.

Die Intervallgrößen q sind somit die äquidistanten Abstände der Intensitätswerte, die in Abb. 4 zur Veranschaulichung sowohl linear als auch logarithmisch dargestellt sind. Insbesondere in der rechten (logarithmischen) Darstellung ist gut zu erkennen, dass die logarithmische Zunahme der Abstände vom Hersteller

nicht durchgängig umgesetzt wurde; insbesondere fehlen die Intervallgrößen $q = 64, 128$ und 256 für eine bessere Annäherung an den logarithmischen Anstieg.

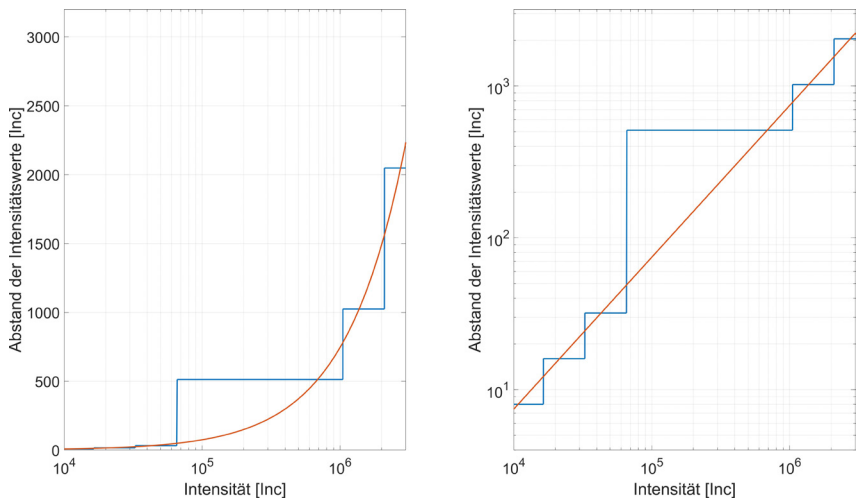


Abb. 4: Verteilung der Abstände der Intensitätswerte für den Z+F IMAGER 5016.
Links: linear, rechts: logarithmisch

Tab. 4: Verteilung der Quantisierungsintervalle über den Intensitätsbereich (Z+F IMAGER 5016)

Quantisierungsintervall q [Inc]	Intensitätsbereich [Inc]
4	4.096 – 8.188
8	8.192 – 16.376
16	16.384 – 32.752
32	32.768 – 65.504
512	65.536 – 1.048.064
1.024	1.048.576 – 2.096.128
2.048	2.097.152 – 4.192.256

Die Einheit [Inc] steht für Inkrement, das die Größe eines quantisierten Intensitätswertes I_k angibt.

4.2 Vorverarbeitung der Messdaten

Aufgrund der enormen Datenmengen kann eine manuelle Qualitätskontrolle der einzelnen Messreihen nicht mehr stattfinden. Daher wurde ein Vorverarbeitungskonzept erarbeitet, dass verzerrte Messreihen möglichst automatisch korrigiert oder zumindest eliminiert. Zusätzlich werden durchgehend robuste Schätzer und entsprechende Streuungsmaße eingesetzt, umso möglichst wenige Verzerrungen in den Auswerteergebnissen zu erhalten.

Zunächst wird dabei jeweils der Median aller gemessenen Distanzen für jede Encodertick-Messreihe und dessen Streuung berechnet (43.a). Es werden diejenigen Einzelmessungen der Messreihe entfernt, die um mehr als die dreifache Medianstandardabweichung vom Median der Encodertick-Messreihe abweichen. Dasselbe Vorgehen wird anschließend auf Basis der Intensitäten wiederholt. In einem letzten Schritt werden sämtliche Encodertick-Messreihen aussortiert, die aus weniger als 700 Messpunkten bestehen. Nach der Vorverarbeitung liegen pro Scanner insgesamt zwischen 23.500 und 250.000 verbleibende Encodertick-Messreihen vor.

5 Ergebnisse des Ringversuchs: Ableitung eines allgemeingültigen intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Z+F IMAGER 5016 Serie

Zur Ableitung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells werden üblicherweise (siehe Abschnitt 2) alle Paare von Standardabweichung und mittlerer Intensität aus allen Messungen einer Lasermessrate zusammengenommen und mittels einer Regressionsanalyse ausgewertet.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen im 1D- und 3D-Modus liegt in der aktuellen Messkonfiguration jedoch eine deutlich größere Datenbasis vor. Die Verteilung dieser Messungen ist insgesamt gesehen jedoch nicht optimal bzw. inhomogen über den Intensitätsbereich verteilt.

Bei einer Messung eines Probekörpers in kurzer Distanz werden viel mehr Encodertick-Messreihen generiert, ungefähr 5000 in 5 m Entfernung als während einer Messung in 60 m, wo nur noch gut 400 Messreihen entstehen. Da mit der Entfernung bei gleichem Ziel die gemessene Intensität abnimmt, liegen im niedrigen Intensitätsbereich deutlich weniger Messwerte vor. Für die Regressionsanalyse ist jedoch insbesondere der niedrige Intensitätsbereich entscheidend, da hier viel stärkere Änderungen im Verlauf bzw. der Steigung der zu bestimmenden Modellfunktion auftreten, siehe auch [Abb. 5](#).

Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird die Kenntnis über die Quantisierungsstufen genutzt, siehe Abschnitt 4.1. Sämtliche Encodertick-Messreihen

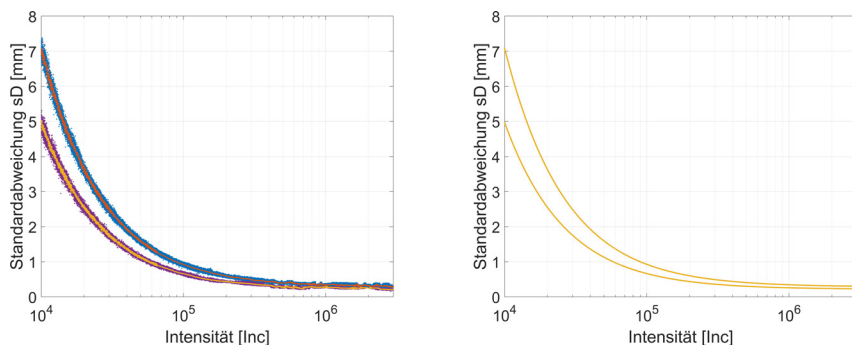


Abb. 5: Exemplarische Darstellung der Eingangsdaten und der Ergebnisse der Regressionsanalyse für 1100 kHz und 550 kHz. Links: Rohdaten, überlagert mit gemittelten Wertepaaren pro Quantisierungsstufe. Rechts: Ergebnisse der entsprechenden Regressionsanalysen

werden der nächstliegenden Quantisierungsstufe zugeordnet und die Auswertungen anschließend gemittelt, siehe [Abb. 5](#) auf der linken Seite. Durch diesen Schritt liegen im Bereich zwischen 10.000 Inc und 3.000.000 Inc, maximal 6232 Paare aus Intensität und Standardabweichung vor. Dadurch wird die Verteilung der Messwerte über den Intensitätsbereich homogenisiert, der niedrige Intensitätsbereich wird sogar etwas stärker betont, da aufgrund der kleineren Quantisierungsintervalle hier mehr mögliche Intensitätswerte vorhanden sind.

Durch die konsequente Umsetzung von robusten Schätzern und die Vorverarbeitung der Messdaten liegen anschließend keine relevanten Ausreißer mehr vor. Somit ist eine robuste Schätzung nicht notwendig. Dementsprechend wurde eine nicht robuste nichtlineare Regressionsanalyse mit kombiniertem Fehlermodell (Seber und Wild 2003) verwendet. Das Ergebnis der Regressionsanalyse ist für die beiden gemessenen Lasermessraten 1100 kHz und 550 kHz in [Abb. 5](#) auf der rechten Seite exemplarisch für den Z+F IMAGER 5016 der TU Darmstadt (GMSS) dargestellt.

Mit diesem TLS wurde die Bestimmung des intensitätsbasierten stochastischen Modells insgesamt dreimal durchgeführt:

- Vor der Herstellerkalibrierung auf Multiplexplatten
- Vor der Herstellerkalibrierung auf Spectralon Targets
- Nach der Herstellerkalibrierung auf Multiplexplatten

Die drei abgeleiteten stochastischen Modelle weisen lediglich maximale gegenseitige Abweichungen im hundertstel Millimeter Bereich auf. Dies lässt den Schluss zu, dass durch die punktuelle Auswertung an den Encodertick-Positionen, keine hohen Anforderungen an die Probekörper vorhanden sind und so auch günstigere Alternativen zu Spectralon problemlos eingesetzt werden

können. Darüber hinaus bleibt das abgeleitete Modell in diesem Fall auch nach der Herstellerkalibrierung gültig.

5.1 Allgemeingültiges intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Z+F IMAGER 5016 Serie

Ziel des Ringversuches ist die Ableitung eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für die Distanzmessung der Z+F IMAGER 5016 Serie.

Dabei steht insbesondere die Nutzbarkeit für die Praxis im Vordergrund, siehe auch Abschnitt 5.2. Daher ist der Kernpunkt der Untersuchung der Übergang zu einem „Serienmodell“.

Die gemeinsame Auswertung wird dabei ebenfalls auf Basis der den Intensitätsstufen zugeordneten und gemittelten Messungen durchgeführt. Pro Scanner und Lasermessrate liegen somit maximal 6232 Paare aus Intensität und Standardabweichung vor. Durch die durchgeführte Mittelbildung wird der Beitrag der einzelnen Scanner zur gemeinsamen Modellbildung homogenisiert, sodass eine umfangreichere Datenerhebung bei einzelnen Scannern nicht zu einer Dominanz bei der Modellbildung führen.

Neben der eigentlichen Modellbildung siehe [Abb. 6](#) (1100 kHz) und [Abb. 7](#) (550 kHz) jeweils in schwarz, wurden auf Basis der nichtlinearen Regressionsanalyse auch Konfidenzintervalle abgeleitet. Dabei muss zwischen Konfidenzintervallen für die Modellbildung bzw. für die Prädiktion einer zukünftigen Einzelmessung unterschieden werden. In [Abb. 6](#) und [Abb. 7](#) ist dementsprechend das jeweilige Konfidenzintervall (95 %) für die Prädiktion einer Einzelmessung in blau hinterlegt. Darüber hinaus ist der Bereich, in dem alle Einzelmodell der acht Scanner liegen, rot markiert (vgl. [Abb. 5](#): exemplarisches Einzelmodell). Es zeigt sich, dass hier eine vollkommene Überdeckung der Einzelmodelle durch das entsprechende Konfidenzintervall vorliegt.

Um einer Fehlinterpretation aufgrund der logarithmischen Skalierung der x-Achse vorzubeugen, ist in [Abb. 6](#) und [Abb. 7](#) zusätzlich in einem kleineren Plot der Intensitätsbereich zwischen 100.000 und 3.000.000 Inc vergrößert dargestellt. Dieser Bereich entspricht knapp 97 % des ausgewerteten Intensitätsbereiches. In diesem Bereich liegt

- ... der Maximalwert der Standardabweichung bei der Lasermessrate 1100 kHz bzw. 550 kHz bei 1 mm bzw. 0,7 mm,
- ... der Variationsbereich aller Einzelmodelle für die Lasermessrate 1100 kHz bzw. 550 kHz (Spannweite: Minimum Maximum) unter 0,14 mm bzw. 0,13 mm,
- ... das prädizierte Konfidenzintervall für die Lasermessrate 1100 kHz bzw. 550 kHz unter $\pm 0,13$ mm bzw. $\pm 0,12$ mm.

Lediglich in den restlichen 3 % des untersuchten Intensitätsbereiches (10.000–100.000 Inc) werden größere Werte angenommen.

Zusammengefasst zeigt sich also, dass unter Berücksichtigung der Konfidenzintervalle eine erfolgreiche Ableitung eines Serienmodells erreicht werden

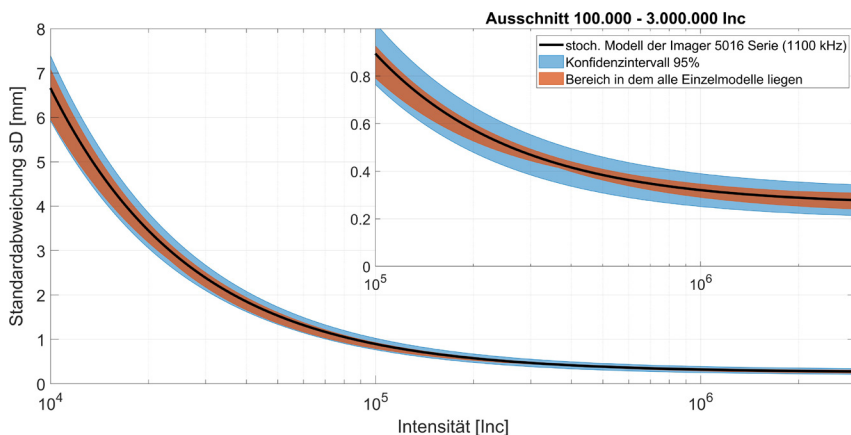


Abb. 6: Allgemeingültiges intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Lasermessrate 1100 kHz (schwarz); überlagert mit dem Bereich, den die einzelnen Modelle überdecken (rot), und dem Konfidenzintervall aus der nichtlinearen Regressionsanalyse (blau).

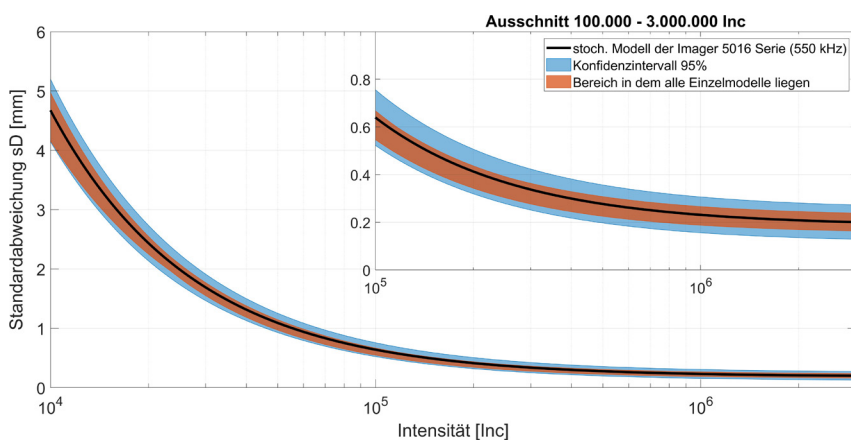


Abb. 7: Allgemeingültiges intensitätsbasiertes stochastisches Modell für die Lasermessrate 550 kHz (schwarz); überlagert mit dem Bereich, den die einzelnen Modelle überdecken (rot), und dem Konfidenzintervall aus der nichtlinearen Regressionsanalyse (blau).

konnte. Dabei liegen die auftretenden Abweichungen für den Großteil des untersuchten Intensitätsbereiches in der Größenordnung der Distanzmessauflösung oder deutlich darunter.

Durch die Ableitung des entsprechenden Konfidenzintervalls und dessen Nutzung insbesondere als obere Schranke stehen dem Nutzer jetzt prinzipiell zwei Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung:

- Verwendung des intensitätsbasierten stochastischen Modells (schwarze Linie) unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Standardabweichungsbestimmung für die jeweilige Intensität.
- Verwendung der oberen Intervallgrenze als Worst Case Abschätzung, es wird üblicherweise eine niedrigere Unsicherheit mit der Messung erreicht als im Modell angegeben wird.

In [Abb. 8](#) sind die Modelle für alle Lasermessraten des IMAGER 5016 dargestellt und die entsprechenden Modellparameter sind in [Tab. 5](#) zusammengefasst. Von den sieben möglichen Lasermessraten wurden 1100 kHz und 550 kHz tatsächlich untersucht, für die restlichen Lasermessraten wurden die angegebenen Modelle auf Basis von skalierten Versionen und exemplarischen Messungen abgeleitet.

Die Zulässigkeit der Skalierung zw. den Lasermessraten konnte zunächst anhand eines Vergleichs des Modells der Lasermessrate 550 kHz mit einem skalierten Modell auf Basis der Lasermessrate 1100 kHz nachgewiesen werden. Dabei lagen die Abweichungen zwischen skaliertem und gemessenem Modell im Bereich weniger hundertstel Millimeter. Darauf aufbauend wurden mit dem TLS der TU Darmstadt zusätzlich exemplarische Messungen mit weiteren Lasermessraten durchgeführt, insbesondere im niedrigen Intensitätsbereich. Auch hier zeigt der Vergleich der gemessenen Paare aus Intensität und Standardabweichung mit den skalierten Modellen eine sehr gute Übereinstimmung. Daraus lässt sich schließen, dass die Modelle für alle weiteren Lasermessraten aus den beiden untersuchten Lasermessraten abgeleitet werden können.

Ein alternativer Anwendungsansatz ist die Verwendung der oberen Konfidenzintervallgrenze als Worst Case Abschätzung der Distanzmessunsicherheit, siehe [Abb. 9](#) und [Tab. 6](#). Dies hat für den Einsatz in der Praxis den Vorteil, dass in dieser Standardabweichungsangabe direkt die Unsicherheit der Bestimmung berücksichtigt wird. Der Nutzer ist im Endeffekt auf der sicheren Seite, da die tatsächliche Unsicherheit der jeweiligen Distanzmessung unterhalb der dargestellten Modelle liegt.

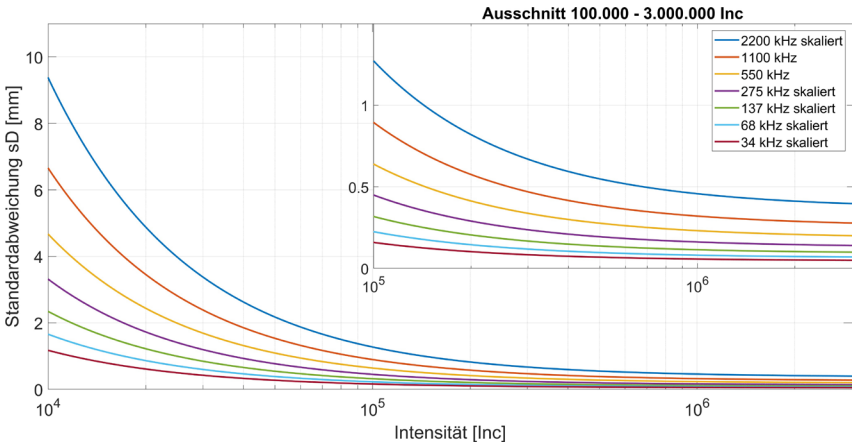


Abb. 8: Allgemeingültige intensitätsbasierte stochastische Modelle für alle Lasermessraten des Z+F IMAGER 5016, teilweise auf Basis von skalierten Versionen der beiden untersuchten Lasermessraten 1100 kHz und 550 kHz

Tab. 5: Parameter der allgemeingültigen intensitätsbasierten stochastischen Modelle für alle Lasermessraten des Z+F IMAGER 5016

Parameter	a [mm/Inc]	B [-]	C [mm]
2200 kHz*	88315	-0,998	0,37
1100 kHz	64959	-1,002	0,26
550 kHz	42611	-0,994	0,19
275 kHz*	31224	-0,998	0,13
137 kHz*	22079	-0,998	0,09
68 kHz*	15612	-0,998	0,06
34 kHz*	11039	-0,998	0,05

* Nicht gemessen, auf Basis skaliertter Versionen von 1100 kHz und 550 kHz berechnet

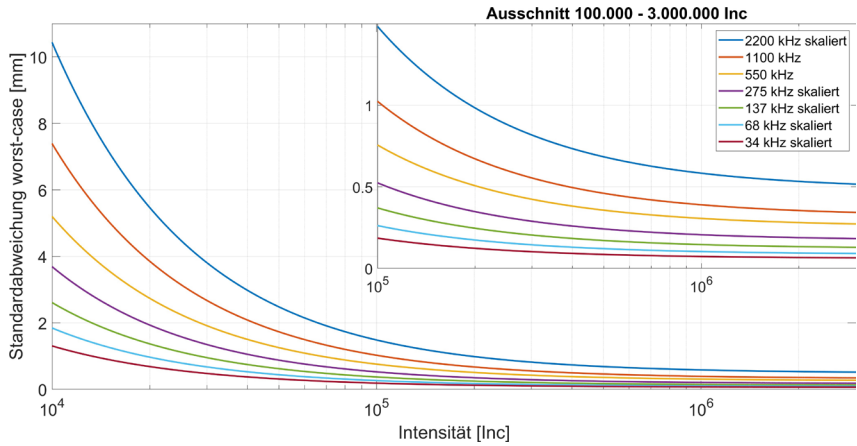


Abb. 9: Worst Case-Abschätzung für alle Lasermessraten des Z+F IMAGER 5016 unter Verwendung der oberen Konfidenzintervallgrenze, teilweise auf Basis von skalierten Versionen der beiden untersuchten Lasermessraten 1100 kHz und 550 kHz

Tab. 6: Parameter der Worst Case Abschätzung für alle Lasermessraten des Z+F IMAGER 5016 unter Verwendung der oberen Konfidenzintervallgrenze

Parameter	a [mm/Inc]	B [-]	C [mm]
2200 kHz*	97537	-0,998	0,48
1100 kHz	71779	-1,002	0,32
550 kHz	46958	-0,994	0,26
275 kHz*	34485	-0,998	0,17
137 kHz*	24384	-0,998	0,12
68 kHz*	17242	-0,998	0,09
34 kHz*	12192	-0,998	0,06

* Nicht gemessen, auf Basis skaliertter Versionen von 1100 kHz und 550 kHz berechnet

5.2 Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis

Der folgende Abschnitt ermöglicht es sämtlichen Nutzern eines Z+F IMAGER 5016 eine Punktwolke um stochastische Angaben zu erweitern. Dies lässt sich unkompliziert mit dem Command Line Mode der Software CloudCompare (CloudCompare 2022) umsetzen. Es muss lediglich die aktuelle Version von CloudCompare auf dem PC installiert sein.

Nach der Prozessierung in LaserControl müssen die Punktwolken mit dem primären Ansichtsmodus „Linear“ aus Z+F LaserControl im e57-Format exportiert werden. Dabei ist wichtig, dass die Intensität das letzte Scalar field in den Dateien ist. Anschließend kann mit dem folgenden Skript die Prozessierung aller Scandateien innerhalb eines Ordners durchgeführt werden.

```
@echo off
setlocal enabledelayedexpansion
:: Installationspfad CloudCompare eingeben
set CloudCompare_Path="C:\Program Files\CloudCompare\CloudCompare.exe"
:: Parameter a, b, c für entsprechende Lasermessrate auswählen,
:: hier am Beispiel Worst Case Modell 137 kHz
set a=24384
set b=-0.998
set c=0.12
:: auslesen Scan Liste aller e57-Dateien, alternative Dateiformate möglich
for /f "delims=" %%f IN ('dir /b /a-d /s "*.e57") do (set Scan_Liste=!Scan_Liste! -O "%%f")
:: Prozessierung mit CloudCompare
%CloudCompare_Path% -SILENT -AUTO_SAVE OFF %Scan_Liste% ^
-FILTER_SF 5000 5000000 ^
-SF_ARITHMETIC Last log ^
-SF_OP Last mult %b% ^
-SF_ARITHMETIC Last exp ^
-SF_OP Last mult %a% ^
-SF_OP Last add %c% ^
-RENAME_SF Last "Standardabweichung [mm]" ^
-REMOVE_SF 1 ^
-SAVE_CLOUDS
endlocal
pause
```

Dazu das Skript markieren, kopieren und in einem Text-Editor einfügen, den Installationspfad und die Parameter a, b, c entsprechend anpassen und die Datei direkt in dem Ordner mit den e57-Scandateien als .bat-Datei abspeichern. Durch Doppelklicken der bat-Datei werden sämtliche Scandateien (im e57-Format) innerhalb des Ordners prozessiert und unter einem neuen Namen abgespeichert, der Ablauf kann in der Eingabeaufforderung überwacht werden. Eine fortgeschrittene Anwendungsmöglichkeit stellen Hartmann und Hartmann (2021) vor, welche im Rahmen einer Varianzfortpflanzung die Einflüsse der

Registrierung als auch des Scanners mithilfe eines intensitätsbasierten stochastischen Modells für Einzelpunkte bestimmen.

Die prozessierte Datei beinhaltet anschließend neben der Intensität ein neues Scalar field das die Standardabweichung der Distanzmessung in Millimeter darstellt. In Abb. 10 sind die so prozessierten Ergebnisse für ein Feld der Siegtalbrücke (Schill und Schacht 2021) dargestellt, anhand derer exemplarisch die auftretende Intensitäts- und damit auch Standardabweichungsverteilung erörtert wird.

Das in der Autobahnachse 1050 m lange Bauwerk besteht aus zwei getrennten Spannbetonüberbauten mit einem Durchlaufträger als Bauwerkssystem in Längsrichtung. Das dargestellte Brückenfeld hat eine Spannweite von 105 m und eine Höhe von 100 m. Die Erfassung fand mit der Kombination: ultra high, Quality + (550 kHz) statt.

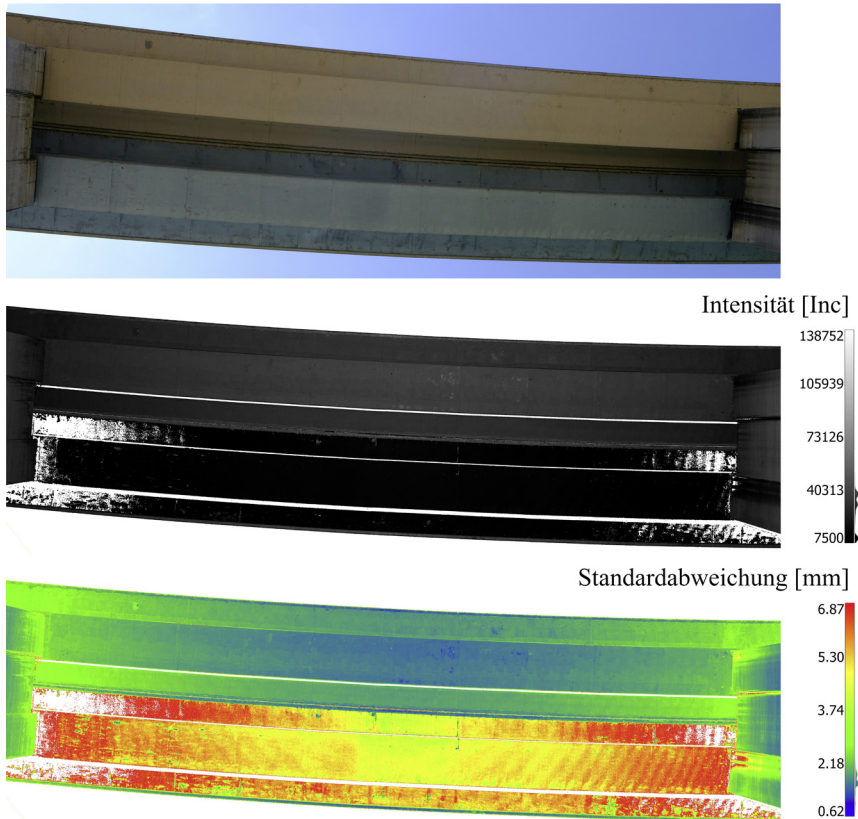


Abb. 10: Spannbetonüberbauten der Siegtalbrücke (von oben nach unten): RGB-Darstellung, Intensitätsdarstellung, Standardabweichungsdarstellung

Wie in der RGB-Darstellung zu erkennen ist, sind die beiden Spannbetonüberbauten unterschiedlich in ihrer Farbgebung. Bereits in der Intensitätsdarstellung zeigt sich, welche Auswirkung die unterschiedliche Lackierung bei gleicher Entfernung zum TLS hat. Der in Abb. 10 obere Spannbetonüberbau weist über die gesamte Länge Intensitätswerte zwischen 20.000 Inc und 50.000 Inc auf. Am unteren Spannbetonüberbau treten hingegen hauptsächlich Intensitätswerte von unter 15.000 Inc auf, in den Randbereichen sogar unter 5000 Inc, die bereits herausgefiltert wurden. Dementsprechend unterscheidet sich auch die Standardabweichungsverteilung, während am oberen Überbau maximale Werte von 2,7 mm erreicht werden, beginnt der Bereich am unteren Überbau erst bei 3,5 mm.

6 Zusammenfassung/Ausblick

Im vorliegenden Beitrag stand die Übertragbarkeit von intensitätsbasierten stochastischen Modellen für die Distanzmessung auf andere TLS der gleichen Serie im Fokus. Dazu wurden acht Zoller+Fröhlich IMAGER 5016 unter vergleichbaren Aufnahmekonfigurationen untersucht. Die Ergebnisse wurden unter Einsatz einer vollkommen identischen Auswertung bestimmt, um die Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit sicherzustellen. Insgesamt betrachtet konnte so nachgewiesen werden, dass eine Übertragbarkeit zulässig ist. Eine ausführlichere Darstellung des Ringversuchs als auch der theoretischen Grundlagen wird in Schill et al. (2023) zu finden sein.

Dies ermöglicht erstmals die Nutzung eines so erzeugten intensitätsbasierten stochastischen Modells für die gesamte Nutzergruppe dieser Modellserie. Dazu wurde im Abschnitt 5.2 ein allgemein nutzbares Skript für die Anwendung in CloudCompare zur Verfügung gestellt.

Im Folgenden sind weitere Erkenntnisse aus dem Ringversuch kurz zusammengefasst:

- Durch die punktuelle Auswertung an einzelnen Vertikalencoder Positionen spielt das Material des Probekörpers keine signifikante Rolle für die Modellableitung.
- Es konnten keine signifikanten Änderungen der Modellparameter durch die reguläre Herstellerkalibrierung festgestellt werden.
- Der Vergleich von gemessen und skalierten Modellen zeigt lediglich zu vernachlässigende Abweichungen.
- Die rein rechnerische Ableitung von Modellen für niedrigere Lasermessraten ist auf Basis von Skalierungen zulässig.

Bei zukünftigen Untersuchungen steht die Verifikation des stochastischen Modells für die neue Generation Zoller+Fröhlich IMAGER 5016A als auch

dem baugleichen Trimble X12 im Fokus, bei denen die Lasermessrate bis auf 2200 kHz erhöht wurde.

Danksagung

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei Fabiola Neumann, Martin Blome und André Jensen bedanken, die bei der Durchführung der Untersuchung beteiligt waren. Darüber hinaus gilt der Dank Professor Eichhorn, Professor Kuhlmann und Professor Neumann für die Bereitstellung der jeweils institutseigenen Sensorik. Ein besonderer Dank gilt der Firma Zoller+Fröhlich für die Bereitstellung von Leihgeräten für die Durchführung des Ringversuches.

Literatur

- Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV) (2022): www.bmas.de/DE/Service/Gesetze-und-Gesetzesvorhaben/arbeitschutzverordnung-optische-strahlung.html, letzter Zugriff 10/2022.
- CloudCompare (version 2.12.4) [GPL software] (2022): www.cloudcompare.org, letzter Zugriff 10/2022.
- Elkhrachy, I., Niemeier, W. (2006): Stochastic Assessment of Terrestrial Laser Scanner. In: Proceedings of the ASPRS Annual Conference.
- Hartmann, J., Hartmann, J. (2021): Qualitätsmodellierung beim statischen und kinematischen Laserscanning. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2021 (TLS 2021), DVW-Schriftenreihe, Band 99, Wißner-Verlag, Augsburg, 47–58.
- Heinz, E., Mettenleiter, M., Kuhlmann, H., Holst, C. (2018): 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. 18(7), 2253.
- Hering, M. (2017): Angewandte statistische Optik in der Weißlicht-Interferometrie: Räumliches Phasenschieben und Einfluss optisch rauer Oberflächen. Dissertation, Heidelberg.
- ISO 17123-3 (2019): Optik und optische Instrumente – Feldprüfverfahren geodätischer Instrumente – Teil 3: Theodolite (ISO 17123-3:2001)
- Kermarrec, G., Alkhatib, H., Neumann, I. (2018): On the Sensitivity of the Parameters of the Intensity-Based Stochastic Model for Terrestrial Laser Scanner. Case Study: B-Spline Approximation. In: Sensors, 18(9), 2964.
- Lipkowski, S., Mettenleiter, M. (2019): Terrestrische Laserscanner – Im Fokus der Genauigkeit. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019), DVW-Schriftenreihe, Band 96, Wißner-Verlag, Augsburg, 75–87.
- Schill, F., Schacht, G. (2021): Berührungslose Überwachung von Brücken mit großer Stützweite. In: Curbach, M., Marx, S., Scheerer, S., Hampel, T. (Hrsg.): 11. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“, Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, Band 55, Dresden, 32–43.
- Schill, F., Wujanz, D., Hartmann, J., Holst, C., Paffenholz, J.-A. (2023): A general intensity-based stochastic model for the rangefinder of the Z+F IMAGER 5016 series. Manuscript in preparation.
- Schmitz, B., Holst, C., Medic, T., Lichti, D.D., Kuhlmann, H. (2019): How to Efficiently Determine the Range Precision of 3D Terrestrial Laser Scanners. In: Sensors. 19(6), 1466.
- Seber, G. A. F., Wild, C. J. (2003): Nonlinear Regression. Wiley-Interscience, 1. Edition.

- Soudarissanane, S. (2016): The geometry of terrestrial laser scanning; identification of errors, modeling and mitigation of scanning geometry. Dissertation, Delft.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 389–399.
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N. (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60, 100–112.
- 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, 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, 18(7), 2187.
- Wujanz, D., Gielsdorf, F. (2022): Not quite capturing reality – Über Datenblätter und Qualitätssicherung im statischen und kinematischen Laserscanning. In: Luhmann/Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2022.
- Z+F IMAGER 5016 Datenblatt (2022): www.zofre.de/laserscanner/3d-laserscanner/z-f-imager-5016, letzter Zugriff 10/2022.
- Zámceniková, M., Neuner, H., Pegritz, S., Sonnleitner, R. (2015): Investigation on the influence of the incidence angle on the reflectorless distance measurement of a terrestrial laser scanner. In: Österr. Z. Vermess. Geoinform., 103, 208–218.
- Zámceniková, M., Wieser, A., Woschitz, H., Ressler, C. (2014): Influence of surface reflectivity on reflectorless electronic distance measurement and terrestrial laser scanning. In: Journal of Applied Geodesy, 8, 311–326.

Kontakt

Dr.-Ing. Florian Schill
TU Darmstadt Institut für Geodäsie – Fachgebiet Geodätische Messsysteme und Sensorik
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
schill@geod.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Daniel Wujanz
technet GmbH
Am Lehnshof 8, 13467 Berlin
daniel.wujanz@technet-gmbh.com

Dipl.-Ing. Jens Hartmann
Hochschule Anhalt
Bauhausstraße 8, 06846 Dessau
jens.hartmann1@hs-anhalt.de

Prof. Dr.-Ing. Christoph Holst
Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie, Technische Universität München
Arcisstraße 21, 80333 München
christoph.holst@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz
Institute of Geo-Engineering, Technische Universität Clausthal
Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de

Session 2:

Scanning natürlicher Oberflächen

Quantifizierung von Baggerarbeiten an der niederländischen Küste mit 4D-Laserdaten

Mieke Kuschnerus | Roderik Lindenbergh

1 Einleitung

Küstengebiete weltweit unterliegen kontinuierlichen Veränderungen durch eine Vielzahl an sich überlagernder, geomorphologischer Prozesse. Die niederländische Küste ist zu einem Großteil unbefestigt und besteht aus relativ naturbelas- senem, und daher dynamischen Sandstrand mit einem breiten Dünenstreifen. Dank immer stärker ausgeprägten, extremen Wetterbedingungen, verursacht durch den Klimawandel, ist die Beobachtung und Quantifizierung der Küsten- dynamik von großer Bedeutung. Die Verbesserung von Vorhersage-Modellen und die Erforschung der Interaktion der dynamischen Prozesse, ist ein wichtiger Teil der Instandhaltung der Küstengebiete.

Zur systematischen Überwachung der gesamten Küstenregion werden regel- mäßig (jährlich) 3D-Daten mit Airborne Laser Scanning aufgenommen (Jarkus Datensatz, siehe de Vries 2012). Das zeitliche Intervall zwischen den einzelnen Messungen ist allerdings zu hoch im Vergleich zur Dauer und Frequenz der Küs- tendynamik (zum Beispiel Gezeiten, Stürme, etc.), sodass diese Prozesse nicht analysiert werden können. Zur hochfrequentierten Überwachung wurden an einigen Stellen entlang der Küste Videoüberwachungssysteme installiert, um sogenannte Coastal State Indicators zu beobachten und zu quantifizieren, wie zum Beispiel von Jiménez et al. (2007) und Giordano et al. (2014) beschrieben. Satellitendaten eignen sich ebenfalls zur regelmäßigen Beobachtung und Ana- lyse, liefern jedoch nicht die nötige räumliche Auflösung um lokale Prozesse, wie Baggerarbeiten oder Veränderungen durch Wind und Gezeiten über kurze Zeiträume messen zu können (siehe zum Beispiel Castelle et al. 2021).

1.1 Baggerarbeiten

Im Rahmen der Instandhaltung des Sandstrandes werden regelmäßig Bagger- arbeiten im Bereich der Küste ausgeführt (siehe [Abb. 1](#)). Depositionen in der Nähe der Strandaufgänge werden beseitigt, Flächen auf denen Liegestühle und



Abb. 1: Links: Mit Sand bedeckte Strandzufahrt. Rechts: Sandwall angelegt zum Schutz der Terrasse und des Cafégebäudes vor einem Sturm, der anschließend teilweise durch die Witterungsbedingungen erodiert ist.

Windschutz vorgesehen sind, werden geglättet und Sturmschäden werden repariert. Oft werden auch präventiv bei Sturm- und Unwetterwarnungen Sandwalle zum Schutz von Terrassen oder Gebäuden errichtet. Ein Sandstrand ohne Interventionen von Baggerarbeiten ist in der heutigen Zeit kaum noch zu finden. Oft sind gerade zu Zeiten von heftigen Umwelteinflüssen, also auch großen natürlichen Veränderungen des Strandes, Baggerarbeiten omnipräsent (Lazarus et al. 2019).

Für den Erhalt der Küste ist die regelmäßige Überwachung der Baggerarbeiten von großer Bedeutung, auch in Hinsicht auf Regelungen und deren Kontrolle, sowie Auswertung der Umsetzbarkeit und Notwendigkeit ebendieser Regelungen. In den Niederlanden sind Baggerarbeiten, bei denen Sand abgetragen und an anderer Stelle wieder angehäuft wird, bis zu einem vorgeschriebenen Grenzwert (in m^3) pro Querschnitt Strand erlaubt. Mit einem Querschnitt Strand ist ein Streifen des Strandes von den Dünen bis zur Wasserlinie von einem Meter Breite gemeint. Um diese Regel jedoch lückenlos zu überprüfen, fehlt es an systematischen Überwachungsmethoden (siehe auch Kuschnerus et al. 2022). Darüber hinaus sind besagte Baggerarbeiten auch für die Modellierung natürlicher Prozesse von Belang, da Baggerarbeiten gerade auch kurz nach und während großer natürlicher Prozesse stattfinden und diese mit beeinflussen, wie erwähnt durch Lazarus et al. (2019).

1.2 Permanentes Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning konnte in den vergangenen Jahren stets weiter automatisiert werden. Mit der verbesserten Technik und Programmierbarkeit der Instrumente ist ein immer hochfrequenteres Scannen über längere Zeiträume möglich (siehe Wujanz 2016). In einer Studie von 2019 haben Anders et al.

gezeigt, wie mit einem permanent installierten, terrestrischen Laserscanner dynamische Prozesse beobachtet werden können. Anders et al. betonen die Notwendigkeit hochfrequenter Messungen in diesen dynamischen Gebieten.

Auch für andere Anwendungsgebiete gibt es bereits erfolgreiche Beispiele von permanent installierten Laserscannern, wie zum Beispiel zur Überwachung eines von Erdrutschen gefährdeten Hangs (Schröder et al. 2022) oder von Schnee auf einem alpinen Gletscher (Voordendag 2021).

Im Rahmen des CoastScan Projekts (Vos et al. 2022) wurde im Jahr 2019 ein permanenter terrestrischer Laserscanner (PLS) auf dem Balkon eines Hotels in unmittelbarer Nähe des Sandstrandes von Noordwijk in den Niederlanden aufgestellt. Mit dem Laserscanner wird regelmäßig (jede Stunde) und kontinuierlich (über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren (2019–2022)) ein Scan eines 1 km langen Küstenstreifens aufgenommen. Die resultierenden Punktwolken bilden einen 4D-Datensatz (3D + Zeit), der die Evolution und Dynamiken der Küste über den gesamten Zeitraum enthält. Ziel des Projekts ist es, die dynamischen Prozesse für Küstenmanagement und Wissenschaft zu extrahieren und zur weiteren Analyse zur Verfügung zu stellen. Für einen Zeitraum von drei Monaten wurden diese Daten mit Videoaufnahmen von der gleichen Position aus komplementiert.

Im Folgenden wird am Beispiel von Baggerarbeiten demonstriert, wie ein spezifischer Prozess oder ein konkretes, wiederkehrendes Ereignis, aus diesem umfassenden Datensatz extrahiert und quantifiziert werden kann.

2 4D-Laserdaten aus Noordwijk

Der Strand von Noordwijk dient als typisches Beispiel eines urbanen Sandstrandes an der niederländischen Küste. Der Ort wurde außerdem wegen der vorteilhaften Lage des Grand Hotel Huis der Duin in unmittelbarer Nähe zum Strand ausgewählt.

Das Untersuchungsgebiet umfasst einen Küstenstreifen von etwa 1 km Länge und etwa 300 m Breite. Direkt vor der Terrasse des Hotels befindet sich ein Streifen mit Dünen und anschließend der Sandstrand. In der Mitte des Sandstrandes befindet sich das Breakers Beach Café mit einer Terrasse (siehe [Abb. 2](#)).

2.1 PLS-Daten

Für das CoastScan Projekt wurde ein Laserscanner, RIEGL VZ-2000 auf einem Metallfuß auf dem Balkon der 11. Etage des Grand Hotel Huis ter Duin in Noordwijk befestigt (siehe [Abb. 3](#)). Der Fuß des Scanners ist mit einer Klemme



Abb. 2:
Karte der Niederlande mit Noordwijk an der Westküste und Luftbild des Untersuchungsgebiet (in rot markiert) am Strand in Noordwijk mit dem Breaker's Beach Café und Grand Hotel Huis ter Duin



Abb. 3:
RIEGL VZ-2000 Laserscanner befestigt mit Hilfe eines Metallfußes auf dem Balkon des Grand Hotel Huis der Duin ohne (links) und mit (rechts) Schutzgehäuse

am Balkon gesichert, sodass eventuelle Bewegungen des Scanners minimiert werden können. Die Stabilität des Scanners ist auf diese Weise verbessert, unterliegt jedoch trotzdem den Veränderungen des Gebäudes, zum Beispiel durch Sonneneinstrahlung oder durch Wind. Bei Sturm unterliegt der Laserscanner, und dessen Fuß, Vibrationen unabhängig vom Gebäude. Diese können mit dem internen Inklinometer des Laserscanners gemessen werden. In einem Experiment mit externen Inklinometern, die am Fuß befestigt wurden, wurden diese Vibrationen ausgewertet und validiert. Der Effekt auf die 3D-Punktwolken, die während eines Sturmes aufgenommen wurden, konnte nachgewiesen und quantifiziert werden (siehe Kuschnerus und Schröder 2021). Die Vibrationen tragen zu einer höheren Messungenauigkeit bei und verursachen Standardabweichungen auf einer ebenen Referenzfläche (Helikopterlandeplatz (A) in Abb. 4) von bis zu mehreren Zentimetern.

Mit dem permanent befestigten Laserscanner wurden zu jeder vollen Stunde, von Juli 2019 bis Juni 2022 das gesamte Untersuchungsgebiet gescannt. Dabei wurde eine maximale Reichweite von 550 m gemessen und ein etwa 900 m langes Stück Küste erfasst. Die Winkelauflösung ist auf 0,03 Grad eingestellt und jeder Scan liefert eine Punktwolke, die etwa 8,5 Mio. Punkte umfasst. Ein Großteil der Punkte entsteht jedoch beim Scannen durch Reflektionen vom Balkon- und Teilen des Hotelgebäudes. Zur schnelleren Verarbeitung werden diese Teile entfernt und die resultierende Punktwolke umfasst das Dünen- und Strandgebiet mit etwa 3,5 Mio. Punkten. Für diesen Beitrag wurde ein Teil des Datensatzes im Zeitraum von Januar 2020 bis Ende April 2020 untersucht.

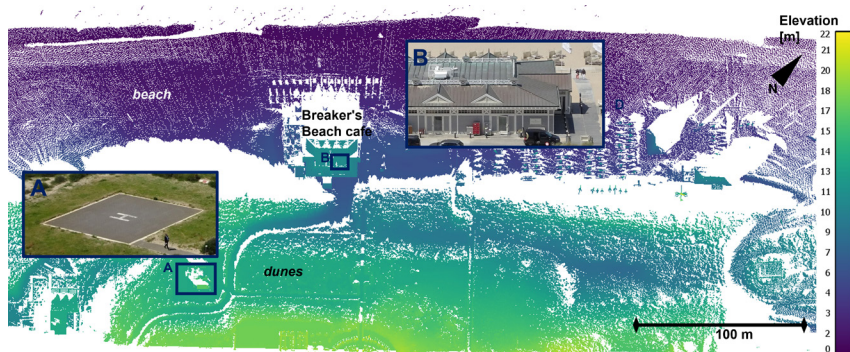


Abb. 4: Punktwolke des Untersuchungsgebiets mit Helikopterlandeplatz (A) und Breaker's Beach Café (B). Alle Punkte sind nach Höhe eingefärbt. Lücken in der Punktwolke entstehen als Schatten hinter den Dünen und dem Gebäude aus Sicht des Laserscanners.

2.2 Videodaten

Zur Validierung der permanenten Laserscannerdaten und als alternative Datenquelle wurde im Februar 2020 für die Dauer von knapp drei Monaten eine Videokamera direkt neben dem Laserscanner am Geländer des Balkons befestigt (siehe Abb. 5). Die Kamera hat Videos mit einer Frequenz von 6,6 mHz (ein Bild pro 2,5 Minuten) aufgenommen und die entstandenen Bilder wurden anschließend zur Validierung ausgewertet.

Mit Hilfe des YOLO-Algorithmus (Redmon et al. 2016), eine Methode des Maschinellen Lernens (supervised machine learning), werden alle Bilder, in denen Bagger gesichtet werden, herausgefiltert. Von den jeweiligen Bildern wird der Ort des Baggers im lokalen Koordinatensystem des Laserscanners geschätzt, sodass dieser mit eventuellen Veränderungen in der Punktwolke verglichen werden kann. Mehr Details sind zu finden in Barbero et al. (2022).

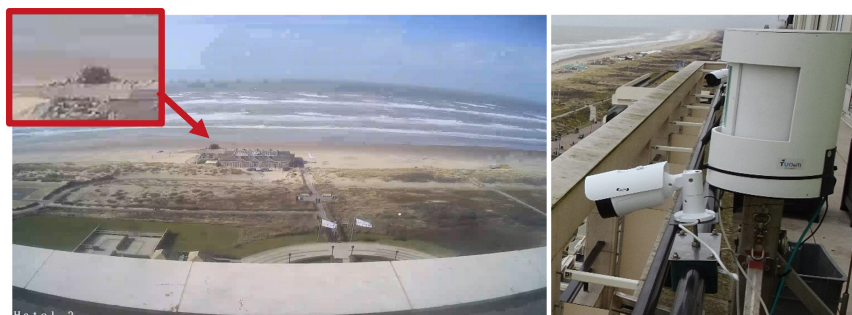


Abb. 5: Links: Bild aus den Videoaufzeichnungen mit Bagger vor dem Café am Strand. Rechts: Videokamera montiert neben dem Laserscanner mit Abdeckung.

3 Quantifizierung und Detektion von Veränderungen

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte zum Detektieren von Baggararbeiten erläutert. Anschließend gehen wir auf die Ergebnisse ein und vergleichen mit detektierten Baggern aus den Videodaten.

3.1 Datenkorrektur

Zunächst werden die Punktwolken mit Hilfe von RivLib library (© RIEGL) in komprimierte las-Dateien konvertiert. Hierbei werden für jeden Punkt die 3D-Koordinaten (x,y,z) sowie die Intensität des reflektierten Signals gespeichert.

Des Weiteren verwenden wir die Roll- und Nick-Werte des internen Inklinometers des Laserscanners, um die mittlere Neigung des Instruments während eines Scans festzustellen und mit Hilfe einer Rotation zu korrigieren. Eine weitere Registrierung wird nicht vorgenommen und der resultierende Registrierungsfehler wird anhand der Referenzfläche des Helikopterlandeplatzes geschätzt. Die Fläche des Helikopterlandeplatzes erscheint in jeder Punktwolke und wird frei von Sand und anderen Objekten gehalten. Wir nehmen an, dass es sich um eine flache Ebene handelt mit Unebenheiten unterhalb der Messgenauigkeit des Laserscanners. Die hier geschätzte Registrierungsgenauigkeit, skaliert mit Abstand zum Laserscanner beträgt etwa 0,02 m.

Die korrigierten Punktwolken werden anschließend auf den Untersuchungsbereich zugeschnitten und mit Hilfe eines regelmäßigen Gitters mit Zellen der Größe 1 m × 1 m in ein Höhenmodell (Digital Elevation Model – DEM) umgewandelt. Aus den einzelnen DEMs entsteht so eine Zeitreihe mit mittlerer Höhenmessung pro Quadratmeter.

3.2 Veränderungen Detektieren

Aus den Zeitreihen der DEMs werden nun Differenzen pro Stunde gebildet. Von diesen Differenzdaten wird anschließend abgeleitet, wo große, statistisch signifikante Veränderungen entstanden sind. Wenn diese Differenzen grösser als ein bestimmter Grenzwert (negativ oder positiv) sind, gehen wir davon aus, dass sie keine natürliche Ursache haben. Der Grenzwert wurde mit Hilfe der kleinsten, statistisch signifikanten Veränderung, des sogenannten *Level of Detection* (LoD) (Lague et al. 2013; siehe auch Winiwarter et al. 2021) festgelegt. Dieser wird in Kombination mit dem geschätzten Registrierungsfehler mit folgender Formel berechnet:

$$\text{LoD} = \pm 1.96 \left(\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{d_1} + \frac{\sigma_2^2}{d_2}} + \text{reg} \right), \quad (1)$$

für Standardabweichungen σ_i , Anzahl der Punkte pro Gitterfeld d_i und und aus der Registrierung resultierender Fehler $\text{reg} \approx 0,02$ m (Lague et al. 2013).

Auf dem trockenen Sandstrand, wo die meisten Baggerarbeiten stattfinden, wird der LoD für den gesamten Zeitraum von vier Monaten auf etwa 0,066 m geschätzt.

Da wir nur an anthropogenen Veränderungen interessiert sind, insbesondere Baggerarbeiten, wählen wir jedoch einen Grenzwert von 0,3 m. Die meisten natürlichen Prozesse brauchen entweder einen längeren Zeitraum, um sich

auszuprägen, und/oder sie führen zu kleineren Veränderungen. Die Kombination aus kurzem Intervall und großer Veränderung, deutet auf eine anthropogene Ursache hin. Hier muss beachtet werden, dass auch, zum Beispiel, ein Bagger, der auf dem Strand geparkt ist, zur Zeit eines Scans, als eine solche Veränderung auftritt. Ebenso wurden Anfang Januar 2020 große Zelte neben dem Café errichtet und erscheinen als eine solche Veränderung (siehe Abb. 6 und Abb. 7).

Nun werden alle potenziellen Baggerarbeiten lokalisiert, das betroffene Gebiet gemessen, der Ort gespeichert und das geschätzte abgetragene oder hinzugefügte Volumen gespeichert. Diese werden anschließend gefiltert, sodass bestimmte Gebiete ausgeschlossen werden (ein Parkplatz auf der Dünenseite des Cafés, wo häufig Autos parken) und Veränderungen, die nur eine Stunde dauern und im nächsten Scan wieder verschwunden sind (temporäre Objekte, wie Bagger, Müllcontainer etc.), entfernt werden können. So entsteht eine Liste an Baggerarbeiten pro Tag, eine Schätzung der betroffenen Fläche und des veränderten Sandvolumens.

4 Baggerarbeiten im Frühjahr 2020

Für den gewählten Zeitraum sind alle auf diese Art detektierten Baggerarbeiten zusammengefasst in Abb. 6. Hier zeigen sich zwei Ausreißer am 13. und am 17. Januar 2020. Diese sind durch den Auf- und Abbau von Festzelten neben dem Cafégebäude zu erklären. Die Windgeschwindigkeit im gleichen Zeitraum zeigt, dass oft am Folgetag eines Sturms vermehrt Baggerarbeiten stattfinden.

Für die Schätzung der Volumenveränderung wurden alle positiven und negativen Höhenveränderungen pro Quadratmeter getrennt aufsummiert. Die jeweilige Summe der positiven und negativen Volumenveränderungen pro Tag ist in Abb. 7 dargestellt. Auch hier sieht man die Ausreißer am 13. und 17. Januar

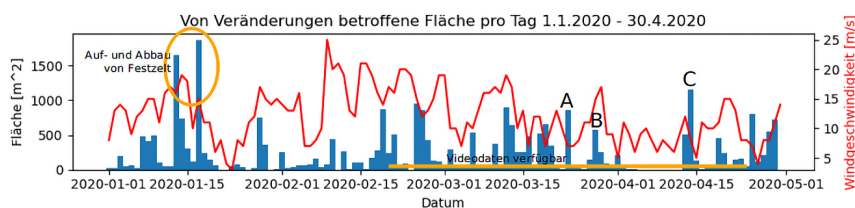


Abb. 6: Ergebnis der Detektion von Baggerarbeiten vom 1.1.2020 bis zum 30.4.2020. Die Windstärke und der Zeitraum von vorhandenen Videodaten sind ebenfalls abgebildet. Die im Abschnitt 5 näher erläuterten Beispiele sind mit A (23.3.2020), B (28.3.2020) und C (14.4.2020) markiert.

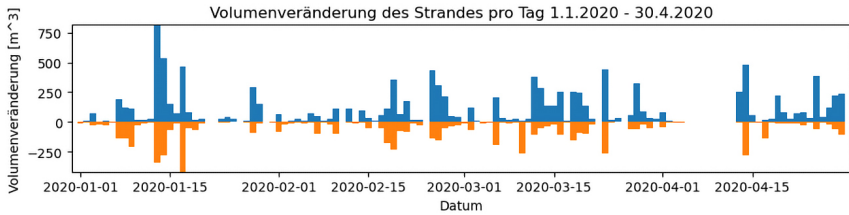


Abb. 7: Positive und negative Volumenveränderungen pro Tag. Die Ausreißer am 13. und 17. Januar liegen außerhalb der abgebildeten Achsen und sind durch das Errichten und Abbauen der Festzelte zu erklären.

zum Auf- und Abbau der Festzelte neben dem Cafégebäude. Ansonsten werden in der Summe mehr positive Veränderungen als negative Veränderungen registriert.

5 Vergleich mit Videodaten

Für den Zeitraum, in dem sowohl PLS-Daten als Videodaten vorliegen, zeigen wir anhand von zwei Beispielen, wie die Ursache der detektierten Veränderungen tatsächlich auf Baggerarbeiten zurückgeführt werden kann. Hier wird deutlich, dass Sichtungen von Baggern in den Videobildern stark mit der Lokalisation der detektierten Veränderungen korrelieren.

Am Beispiel der ausgewählten Daten (23. März und 14. April 2020, A und C in [Abb. 6](#)) zeigt sich in [Abb. 8](#) deutlich, dass die Sichtung der Bagger in den Videodaten mit der Lage der durch Baggerarbeiten veränderten Fläche auf dem Strand korrespondiert. Vor allem rund um das Cafégebäude wird viel gearbeitet. Hier wird die Zufahrt zu den Abfallcontainern hinter dem Gebäude freigehalten, und in Richtung Strand die Terrasse verstärkt oder nach Sturmschäden wieder aufgebaut. Dies erklärt auch die in [Abb. 6](#) deutlich zu erkennenden auffällig hohen Werte jeweils am Folgetag eines Tages mit starkem Wind.

Am 28. März dagegen, findet sich ein Beispiel von falsch positiver Detektion (in [Abb. 6](#) mit B markiert). Hier wird die große Veränderung in der Höhe des Sandes vermutlich durch den Sturm selbst oder aber durch Ausreißer in der Punktwolke, die von den hohen Wellen während einer sehr hohen Flut entstehen, verursacht. In [Abb. 9](#) erkennt man an der Lage auf dem Strand und der unregelmäßigen Formen der Veränderungen, dass diese höchst wahrscheinlich nicht auf Baggerarbeiten zurückzuführen sind, und auch die wenigen Bagger-sichtungen in den Videodaten bestätigen dies.

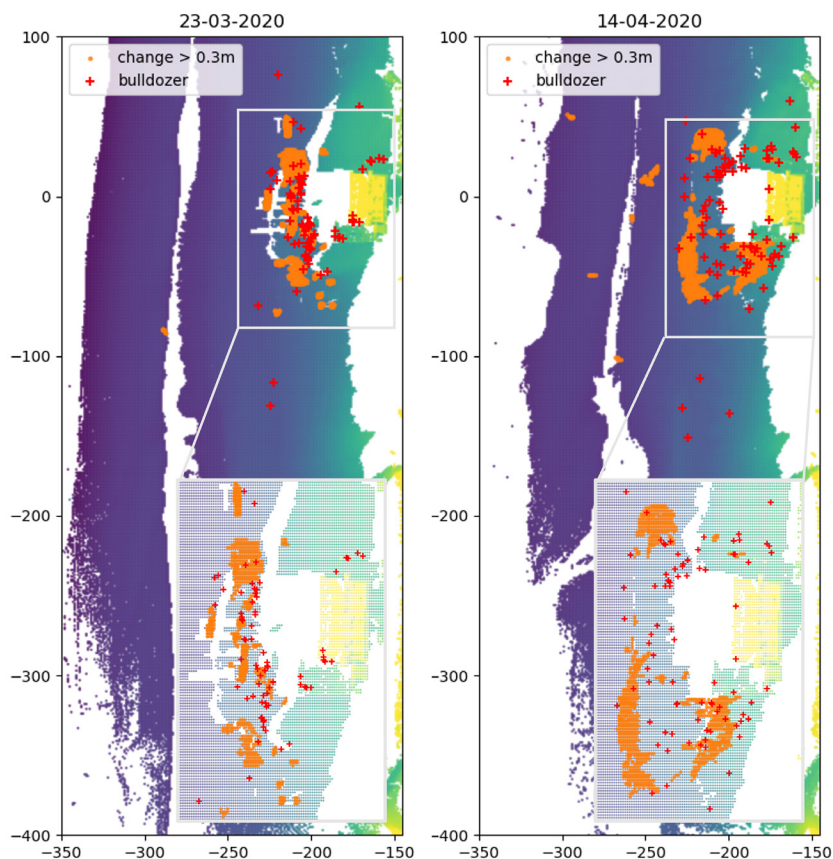


Abb. 8: Mit Hilfe der Punktwolken detektierte Baggararbeiten (markiert in orange) und in den Videodaten gesichtete Bagger (markiert mit roten Kreuzen) am 23.3.2020 und am 14.4.2020. Das Gebiet rund um das Cafégebäude ist vergrößert dargestellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Permanentes Laserscannen ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen in den verschiedensten Bereichen. An der Küste kann PLS helfen natürliche Prozesse von anthropogenen Veränderungen zu trennen. Für die Detektion von Baggararbeiten und einfacher Schätzung der betroffenen Fläche, sowie des Volumens ist PLS geeignet und kann durch Videodaten ergänzt werden. Videodaten eignen sich für die Detektion der Bagger selbst, jedoch weniger für die Quantifizierung der Veränderungen des Strandes.

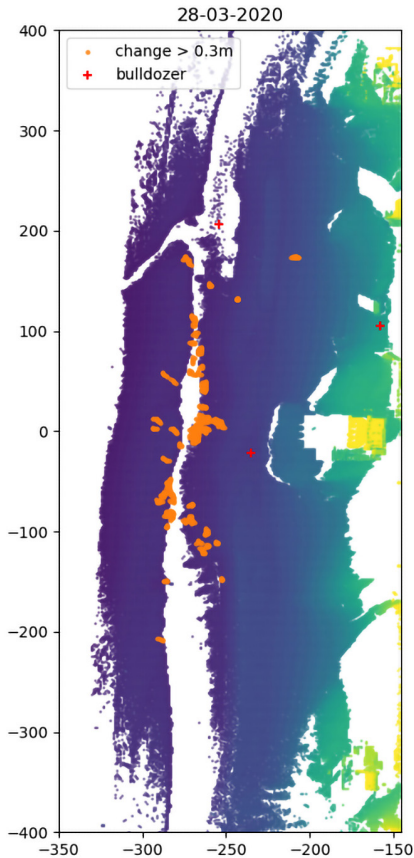


Abb. 9: Beispiel für falsch positive Detektion: Am 28. März 2020 wird eine große, schnell veränderte Fläche in den PLS-Daten detektiert, die nicht auf Baggerarbeiten zurückzuführen ist.

Für eine flächendeckende Überwachung der Küste ist PLS sicherlich zu aufwendig und kostspielig. Die Infrastruktur, in unserem Fall durch das Hotelgebäude gegeben, ist außerdem nur an wenigen Orten vorhanden. Allerdings konnte mit dieser Studie ein Beispiel präsentiert werden und die Regelungen der niederländischen Küstenregion zu den Baggerarbeiten können so ausgewertet und in der Praxis nachverfolgt werden. Des Weiteren eignet sich unser Fallbeispiel für die Auswertung dynamischer Modelle der Strandentwicklung und zum Vergleich mit jährlichen Messungen an der Küste.

Literatur

- Anders, K., Lindenbergh, R., Vos, S., Mara, H., De Vries, S., Höfle, B. (2019): High-frequency 3D geomorphologic observation using hourly terrestrial laser scanning data of a sandy beach, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. IV-2-W5, 317–324. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-317-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-317-2019).
- Barbero-García, I., Kuschnerus, M., Lindenbergh, R. (2022): Automatic detection of bulldozer-induced changes on a sandy beach from video using YOLO. submitted for publication.
- Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V., Bujan, S. (2021): Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology* 107707. DOI: [10.1016/j.geomorph.2021.107707](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107707).
- Giordano, A., Giorgio, S., Vuik, V., (2014): Coastal state indicators to assess the morphological development of the Holland coast due to natural and anthropogenic pressure factors, *Ocean & Coastal Management*. Volume 87. 93–101. DOI: [10.1016/j.ocecoaman.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.09.015).

- Jiménez, J. A., Osorio, A., Marino-Tapia, I., Davidson, M., Medina, R., Kroon, A., Archetti, R., Ciavola, P., Aarninkhof, S. (2007): Beach recreation planning using video-derived coastal state indicators. *Coastal Engineering, The CoastView Project: Developing coastal video monitoring systems in support of coastal zone management* 54. 507–521. DOI: [10.1016/j.coastaleng.2007.01.012](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.012).
- Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Lodder, Q., Brand, E., Vos, S. (2022): Detecting anthropogenic volume changes in cross-sections of a sandy beach with permanent laser scanning. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLIII-B2-2022*. 1055–1061. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1055-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-1055-2022).
- Kuschnerus, M., Schröder, D., Lindenbergh, R. (2021): Environmental influences on the stability of a permanently installed laser scanner. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLIII-B2-2021*. Copernicus GmbH. 745–752. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-745-2021](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-745-2021).
- Lazarus, E. D., Goldstein, E. B. (2019): Is there a bulldozer in your model?. *Journal of Geophysical Research: Earth Surfaces*. 124(3). 696–699.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. (2016): You only look once: Unified, real-time object detection, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. December 2016. 779–788. DOI: [10.1109/CVPR.2016.91](https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91).
- Schröder, D., Anders, K., Winiwarter, L., Wujanz, D. (2022): Permanent terrestrial lidar monitoring in mining, natural hazard prevention and infrastructure protection – Chances, risks, and challenges: A case study of a rockfall in Tyrol, Austria. *Proceedings of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
- Voordendag, A., Gorger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., Kaser, G. (2021): Automated and permanent long-range terrestrial laser scanning in a high mountain environment: Setup and first results. *IPSRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V-2-2021*. 153–160. DOI: [10.5194/isprs-annals-V-2-2021-153-2021](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2021-153-2021).
- De Vries, S., Southgate, H. N., Kanning, W., Ranasinghe, R. (2012): Dune behaviour and aeolian transport on decadal timescales. *Coastal Engineering* 67. 41–53. DOI: [10.1016/j.coastaleng.2012.04.002](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.002).
- Vos, S., Anders, K., Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Höfle, B., Aarninkhof, S., de Vries, S. (2022): A high-resolution 4D terrestrial laser scan dataset of the Kijkduin beach-dune system, The Netherlands. *Nature Scientific Data* 9. 191. DOI: [10.1038/s41597-022-01291-9](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01291-9).
- Winiwarter, L., Anders, K., Höfle, B. (2021): M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 178. 240–258. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011).
- Wujanz, D. (2016): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring. *Volume C (775)*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Kontakt

Mieke Kuschnerus | Roderik Lindenbergh

Department of Geoscience and Remote Sensing, Delft University of Technology

Stevinweg 1, 2628 CN Delft, Niederlande

m.kuschnerus@tudelft.nl | r.lindenbergh@tudelft.nl

Permanentes Laserscanning im alpinen Umfeld – Zeit- und raumkontinuierliche Datenerfassung geomorphologischer Prozesse

Daniel Czerwonka-Schröder

1 Einleitung und Motivation

Erdrutsche, Böschungsversagen und Felsstürze gehören zu den größten Gefahren für den Menschen. Sie treten in allen Teilen der Welt auf und verursachen Schäden in Milliardenhöhe, indem sie Eigentum, die Infrastruktur und die Umwelt beschädigen (vgl. Niemeier und Riedel 2017). Das Abtauen des Permafrosts in hochalpinen Lagen und die damit verbundene Wechselwirkung von extremen Wetterlagen als Folge des Klimawandels führen vermehrt zu gravitativen Massenbewegungen in alpinen Regionen, die sich in Form von Hangrutschungen und Bergstürzen bemerkbar machen (vgl. Dinkel et al. 2021). Vor diesem Hintergrund sowie der Ausdehnung von urbanen Lebensräumen, z. B. im Alpenraum, steigt der Bedarf an qualitativ hochwertigen drei- bzw. vierdimensionalen Datensätzen der Erdoberfläche, die es in ein ganzheitliches Risikomanagement zu integrieren gilt. Solche Datensätze sind ein zentrales Thema bei der Prävention von Naturgefahren, dem Schutz von Infrastrukturen und der Bevölkerung (Bremer et al. 2019) und deren Analyse ist ein grundlegender Bestandteil für ein besseres Verständnis geomorphologischer Prozesse (vgl. Anders et al. 2019). Unterschiedliche Stakeholder – sei es auf kommunaler Ebene, beispielsweise die Betreibergesellschaft einer Autobahn oder einer Bahnstrecke – haben ein hohes Interesse an qualifizierten Daten, um alltägliche Abläufe im Betrieb aufrecht zu erhalten sowie bei der Prävention von Gefahren an ihren Objekten effizient Maßnahmen ergreifen zu können.

Die Ingenieurgeodäsie bietet umfassende Mittel an Messtechniken und Auswertungsmethoden zur Erzeugung der zuvor beschriebenen Datensätze. Wujanz (2016) beschreibt, dass seit der methodischen Entwicklung geodätischer Deformationsmessungen zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts die wesentliche Prozesskette bei der Auswertung multitemporaler Messungen unverändert ist. Die Wahl geeigneter Aufnahmestandpunkte, die Messung von mindestens zwei Epochen, die Überführung in ein gemeinsames Koordinatensystem und die Ableitung von Deformationsvektoren beschreiben diesen Prozess. In der

ursprünglichen Vorgehensweise zur Erfassung von Deformationsvorgängen wird von einem rekursiven Vorgang gesprochen. Dies bedeutet, dass bereits gewonnene Erkenntnisse oder ein gewisses Vorwissen über das Bewegungsverhalten eines zu überwachenden Objektes zur Diskretisierung im Geometrie- als auch Zeitbereich vorhanden sein muss (vgl. Heunecke et al. 2013). Die Qualität einer Überwachungsmessung korreliert direkt mit der Qualität der vorhandenen Wissensbasis. Bewegungen, die in nicht signalisierten Bereichen auftreten, welche unerkannt bleiben und die zeitaufwändige Signalisierung, beschreibt Wujanz (2016) als wesentlichen Nachteil.

An dieser Stelle hat in den letzten Jahren nach Niemeier und Heunecke (2004) ein Paradigmenwechsel stattgefunden. Dieser zeichnet sich durch einen Übergang von punktuellen, epochalen Messungen hin zu flächenhaften, kontinuierlichen Verfahren sowie der Entwicklung von zeitintensiven offline-Auswertungen hin zu komplexen online-Systemen aus (vgl. Niemeier und Riedel 2017). Dadurch haben sich die Möglichkeiten in der Erfassung von räumlich als auch zeitlich verdichteten Daten erheblich verbessert. Das terrestrische Laserscanning (TLS) hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten als Messtechnik etabliert und eine Vielzahl von Anwendungen, auch speziell im Bereich der Deformationsanalyse (u. a. Lindenbergh und Pietrzyk (2015) oder Mukupa (2016)), kann mittels dieser Sensorik abgedeckt werden. Das TLS steht somit exemplarisch für die hier beschriebene Entwicklung.

Der Scanner ist hier nicht als Substitut zu anderen Sensoren zu verstehen. Die ständige Weiterentwicklung hin zu kommunikationsfähigen, programmierbaren Multisensorsystemen, eine kompakte und robuste Bauweise, hohe Messreichweiten sowie wirtschaftlich attraktive Systeme lassen einen Übergang zu permanentem TLS (PLS) zu. Permanentinstallierte Laserscanner sind im Sinne eines adaptiven Monitorings als weiterer Sensor für die Integration in echtzeitnahe Assistenz- oder Frühwarnsysteme prädestiniert. Zu vermessende Objekte lassen sich flächenhaft und bei permanenten Installationen mit einer hohen zeitlichen Auflösung erfassen. Ein Vorwissen ist nur noch im begrenzten Maße notwendig und eine Signalisierung ist aufgrund der reflektorlosen Messtechnik obsolet. Infolge dieser Entwicklungen sind die Anwendungsfelder divers und haben nach Wujanz (2016) das klassische Tätigkeitsfeld des Ingenieurgeodäten erweitert. Morphometrische Daten mit hoher zeitlicher Auflösung haben einen hohen Informationsgehalt, die es zu extrahieren gilt und resultierend ein tieferes Verständnis von Prozessen an der Erdoberfläche ermöglichen (vgl. Eitel et al. 2016).

Durch PLS können Restriktionen einer klassischen ingenieurgeodätischen Überwachungsmessung überwunden werden, einige Herausforderungen bleiben bestehen (z.B. Registrierung und Georeferenzierung multitemporaler Punktwolken oder die geodätische Refraktion) oder neue Fragestellungen bei

der Datenanalyse entstehen. Dieser Beitrag stellt das Konzept einer qualitätsgesicherten Implementierung eines Echtzeitassistenzsystems basierend auf PLS anhand eines Projektbeispiels aus den Tiroler Alpen vor und fasst praktische Faktoren zusammen.

2 PLS: Permanentes Laserscanning

Terrestrische Laserscanner lassen sich permanent mit entsprechender Stromversorgung, einem Datenmanagementsystem sowie einer Datenkommunikation zu zentralen Servern an einem zu überwachenden Messobjekt installieren. Mit Hilfe offengestalteter Programmierschnittstellen können Messprogramme individuell an die jeweilige Messaufgabe adaptiert werden, so dass automatisiert Messungen ausführbar sind (vgl. Studnicka und Schröder 2020). Mittels PLS sind technisch die Voraussetzungen geschaffen, dass nahezu kontinuierlich 3D-Beobachtungen in (sub-)stündlichen bis täglichen Zeitintervallen erfasst werden können. Unterschiedliche Implementierungen über verschiedene Zeiträume von Monaten bis Jahren nehmen zu (vgl. Eitel et al. 2016). Mittels der umfangreichen Zeitreihen dreidimensionaler Szenen entsteht ein enormes Potenzial für geografische Analysen hinsichtlich geomorphologischer Veränderungsprozesse. Anders et al. (2019) heben die Wichtigkeit einer hochfrequenten Messwerterfassung hervor. Die Autoren beschreiben, dass Oberflächenveränderungen nur vorübergehend stattfinden können und daher unentdeckt bleiben oder fehlinterpretiert werden können, wenn Messintervalle zu groß ausgewählt werden. Dies gilt vor allem an Überwachungsobjekten, bei denen die Prozesse nicht in einer dominanten und einheitlichen Richtung ablaufen (ebd.).

Die Anzahl der Veröffentlichungen zu Anwendungen von PLS hat in den letzten Jahren zugenommen. Entsprechende Systeme werden beispielsweise zur Beobachtung dynamischer Prozesse an Hängen, Felsstürzen, Gletschern, der Bodenerosion oder von Sandstränden eingesetzt. Mithilfe von PLS im Allgemeinen ist es möglich Veränderungen an der Erdoberfläche zu erkennen, deren Zeitpunkt, Dauer oder Ausmaß im Voraus nicht bekannt war. Folgend werden exemplarische Anwendungen dargestellt, die jedoch keine vollständige Liste darstellen.

- Tschirschwitz et al. (2016): Einsatz eines automatischen Monitoringsystems zur 3D-Überwachung von Buhnen an einem ca. 120 km langen tidebeeinflussten Abschnitt der Elbe im Einfahrtbereich des Hamburger Hafens.
- Kromer et al. (2017): System zur Überwachung von Hangrutschungen in Séchillienne/Frankreich mit halbstündlichen Messintervall über einen Zeitraum von 6 Wochen. Die resultierende Zeitreihe enthielt wertvolle Informationen zum Deformationsverhalten des Hangs im Vorfeld sich ereignender Felsstürze.

- Williams et al. (2019): Untersuchung der Häufigkeitsverteilung von Felsstürzen mit Hilfe stündlicher PLS-Messungen an einer Steilküste in Whitby/Großbritannien. Informationen in dieser Zeitreihe lassen Rückschlüsse auf das Risikopotenzial zu.
- Voordendag et al. (2021): Fallstudie zur Identifizierung der Schnee(neu)verteilung anhand von Änderungen der Oberflächenhöhe am Hintereisferner in den Ötztaler Alpen/Österreich. Die ermittelte Schneeverteilung auf dem Gletscher nach einem Schneefallereignis zusammen mit der gleichzeitigen Schneeerosion und -ablagerung durch Lawinen wird gezeigt und diskutiert.
- Kuschnerus et al. (2022): Überwachung natürlicher und anthropogener Prozesse an einem Sandstrand in Noordwijk/Niederlande. Entwicklung eines Monitorings entsprechend staatlicher Regularien zu Volumenänderungen entlang der niederländischen Küste.

3 Konzeptioneller Entwurf einer PLS-Implementierung in ein webbasiertes Echtzeitassistenzsystem

Bei den unterschiedlichen Implementierungen von PLS hat sich bisher kein grundlegender Workflow etabliert, wobei fundamentale Prozessierungsschritte bei den verschiedenen Forschungsgruppen (vgl. Kapitel 2) identisch sind. Dazu gehören beispielsweise die Registrierung der multitemporalen Scandaten untereinander, die Detektion zeitabhängiger Artefakte als systematische Abweichungen in den jeweiligen Zeitreihen und der damit verbundenen Diskussionen des Signal-Rausch-Verhältnisses oder generell die Informationsextraktion aus den multitemporalen Datensätzen. Bisher fließt für die Messkonzeption das individuelle Wissen der jeweiligen Experten ein oder das Messprogramm ist direkt an die Erfordernisse der Informationsextraktion angepasst. Es fehlt jedoch ein einheitlicher, transparenter Workflow, der für alle Beteiligten nachvollziehbar und reproduzierbar ist.

Einleitend wurde beschrieben, dass das PLS prädestiniert ist innerhalb eines automatisierten Monitoringsystems implementiert zu werden. Nach Resnik (2021) hat der technische Fortschritt dazu geführt, dass das Monitoring als Bestandteil eines Regelkreises anzusehen ist. Auf messtechnisch festgestellte Reaktionen eines Messobjektes müssen unmittelbar sowie automatisch, bestimmte Aktionen (konkret organisatorisch bzw. bautechnische Maßnahmen) unter Einbeziehung von Expertise erfolgen. Speziell bei einem Frühwarnsystem für Hangrutschungen besteht der Regeleingriff darin geeignete Maßnahmen zur Schadensminimierung zu treffen bis hin zur Evakuierung, wenn ein Großereignis nicht auszuschließen ist. Dieses Vorgehen wird als aktives Monitoring

bezeichnet. Abgrenzend zu den technisch, methodischen Beschreibungen eines aktiven Monitorings und deren Einordnung im ingenieurgeodätischen Kontext, sind organisatorische Rahmenbedingungen zu definieren. Mit dem aktiven Monitoring aus den unterschiedlichen Disziplinen heraus und dessen Integration in einen Regelkreis sind lediglich die Grundlagen zur Messdatenerfassung und Beschreibung der kausalen Zusammenhänge geschaffen. Wenn nach Wieser et al. (2017) diese Zusammenhänge verstanden sind, kann ein Monitoring in vielen Fällen genau da von Nutzen sein, wo Risiken durch diese Vorhersage reduziert werden. Somit ist ein aktives Monitoring als Teil eines ganzheitlichen Risikomanagements anzusehen.

Neben Bewältigung der Messaufgabe selbst ist die Akzeptanz verschiedener Interessengruppen ein wesentliches Kriterium einer erfolgreichen Umsetzung von Monitoringprojekten mit öffentlicher Wahrnehmung. (vgl. Benndorf 2021). Benndorf führt aus, dass das damit verbundene Risiko fehlender Akzeptanz, das Risiko des Entzugs der „Social-Licence-to-Operate“ erhöht. Deshalb sind bei der System- als auch Projektimplementierung allgemein anerkannte Grundsätze zu berücksichtigen. Beim PLS handelt es sich um eine sehr junge Spezialdisziplin innerhalb des Themenkomplexes eines ingenieurgeodätischen Monitorings, sodass es an fundamentalen Normen und Richtlinien fehlt. Aus diesem Grund wird hier der Workflow eines PLS systematisch aufbereitet und die jeweiligen Schritte von der Messwerterfassung hin zur Informationsextraktion werden für alle Beteiligten nachvollziehbar und transparent dargestellt.

3.1 Workflow

Zur Entwicklung des Workflows lässt sich im Zuge dieses Beitrags als Leitfaden die internationale Norm ISO 31000:2018 verwenden (vgl. DIN ISO 31000:2018-10 2018). Die Norm regelt den Umgang mit Risiken im Allgemeinen und berücksichtigt dabei den externen und internen Kontext einer Organisation einschließlich des menschlichen Verhaltens und kultureller Faktoren. Bartelt und Wieben (2017) beschreiben, dass sich trotz fehlender Zertifizierbarkeit die Norm als international akzeptierter Standard durchgesetzt hat. In Anlehnung an die Norm und transferiert auf das konkrete Beispiel einer Hangrutschung kann zusammengefasst werden, dass auf Grundlage einer Risikobeurteilung (inkl. Risikoidentifikation, Risikoanalyse, Risikobewertung) und festgelegten Risikobehandlung zielgerichtet ein Monitoringsystem zu integrieren ist. Neben der ingenieurgeodätischen Überwachung selbst sind Ergebnisse zu Dokumentieren und mit den Stakeholdern in einer adäquaten Weise zu Kommunizieren. Dies macht ein ganzheitliches Prozessverständnis und umfassendes methodisches Wissen unabdingbar.

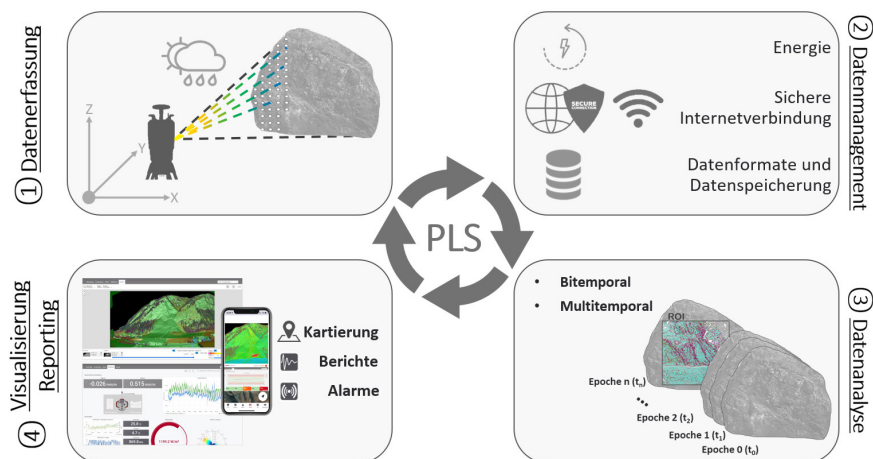


Abb. 1: Workflow eines PLS zur Integration in webbasierte Anwendungen

Zum ganzheitlichen Prozessverständnis gehört auch die Qualifizierung der Datensätze selbst. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier getätigten Betrachtungen eine rein ingenieurgeodätische Sichtweise beinhalten. Problematisch bei der Bestimmung der Messunsicherheiten im geodätischen Sinne ist heute, dass die unvollständige Kenntnis des Wertes einer Messgröße nicht mehr ausschließlich aus zufällig streuenden Messwerten besteht (vgl. Neumann und Alkhatib 2022), sondern systematische Messeinflüsse eine besondere Rolle spielen (vgl. Schwarz und Hennes 2017). Die Komplexität moderner Messsysteme, wie bei einem PLS, sorgt dafür, dass (systematische) Einflüsse oft unbekannt sind oder nur unzureichend modelliert werden können (ebd.). Für eine sachgerechte Bewertung und Angabe der Messunsicherheit hat sich der von der ISO herausgegebene „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) als international akzeptierter Standard durchgesetzt (vgl. Sommer und Siebert 2003).

Die Konzeption des vorliegenden Workflows (vgl. Abb. 1) basiert auf der Prozessimplementierung eines ganzheitlichen Risikomanagements und zum anderen aus der ingenieurgeodätischen Sicht auf die Berücksichtigung systematischer Fehlereinflüsse. Die Prozessierungsschritte werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.2 Datenerfassung

Zunächst gilt es die relevanten Daten zu erfassen. Die Auswahlkriterien eines geeigneten Sensors basieren u.a. auf den Parametern der Reichweite, Strahl-

divergenz, Objektauflösung, der Messgenauigkeit oder aber auch der IP-Klassifizierung, sodass ein Einsatz des Systems auch in rauen Umgebungen (z. B. im Bergbau oder im hochalpinen Bereich) möglich ist. Hinsichtlich der Messgenauigkeit ist festzuhalten, dass die Messergebnisse eines TLS verschiedenen zufälligen und systematischen Abweichungen unterliegen und damit das stochastische Modell festlegen (vgl. Kuhlmann und Holst 2017). Systematische Abweichungen lassen sich dabei in vier Kategorien unterteilen (vgl. Soudarissanane et al. 2011): Scannerinterne, atmosphärenbedingte, messkonfigurationsbedingte und oberflächenbedingte Abweichungen. Bei der aktuellen konzeptionellen Entwicklung von PLS kommen Long Range Laserscanner mit Reichweiten von bis zu wenigen Kilometern zum Einsatz. Der Fokus in diesem Prozessschritt liegt daher auf einer sachgerechten Registrierung der jeweiligen Epochen untereinander und der Berücksichtigung systematischer Einflüsse auf die Messdaten.

- **Registrierung:** Methoden zur Analyse multitemporaler Punktwolken basieren auf der Annahme, dass alle Scans in einem gemeinsamen Referenzrahmen vorliegen. Daher müssen für die jeweiligen Scans Transformationsparameter vorliegen (vgl. Friedli und Wieser 2016). Fehlerhafte Resultate, die hier auftreten, haben unmittelbare und systematische Auswirkungen auf die Quantifizierung der Deformationen. Schröder et al. (2022) diskutieren die Methodik der Registrierung innerhalb permanenter Installationen.
- **Atmosphärische Einflüsse:** PLS machen systematische Einflüsse sichtbar, die bei kampagnenweisen Messungen zu ausgewählten Zeitpunkten weniger dominant sind. In den nahezu kontinuierlichen Zeitreihen eines PLS werden zeitabhängige, systematische Fehlereinflüsse sichtbar, die negativ auf die Messergebnisse wirken. Die Ursachenforschung ist herausfordernd, da zeitabhängige Einflüsse in den Ergebnissen ähnlich aussehen, jedoch unterschiedliche Trigger haben können. Eine Trennung von äußeren Einflüssen oder einer fehlerhaften Registrierung ist auf jeden Fall anzustreben. Friedli et al. (2019) zeigen den Einfluss atmosphärischer Refraktion bei der Anwendung von Long Range Laserscannern in der Schweiz. Schröder und Nowacki (2021) greifen diese Thematik auf und weisen diese Effekte bei permanenten Installationen nach. Atmosphärische Einflüsse können jedoch auch direkt auf den Sensor selbst wirken (vgl. Kuschnerus et al. 2021).

3.3 Datenmanagement

Aufgrund der Anforderungen an ein qualitätsgesichertes Datenmanagement fällt für die hier präsentierte Anwendung die Wahl auf einen Scanner *RIEGL VZ-2000i*. Für die Integration werden freizugängliche Schnittstellen über *RiVLIB* angeboten, die es ermöglichen, den Scanner über eine externe Software

sowie über die Programmiersprache Python zu steuern. Der Scanner kann über Cloud-Konnektivität ferngesteuert werden und ermöglicht einen kontinuierlichen Datenstrom.

Ziel einer permanenten Installation von Laserscannern ist deren autonomer Betrieb. Besonders in abgelegenen Bereichen, wie bei einem Gletschermonitoring, muss eine ununterbrochene Funktionalität sowie Erreichbarkeit des Systems realisiert werden. In Anlehnung an das Qualitätsmodell nach Wiltshko (2004) sind mittels eines praxisorientierten Datenmanagements die Zuverlässigkeitsmerkmale Verfügbarkeit (Daten stehen zentral und aufbereitet zu einem definierten Zeitpunkt zur Verfügung) und Aktualität (Ausmaß der Übereinstimmung von Daten mit der sich zeitlich ändernden konzeptionellen Realität) zu bedienen. Daneben ist das Thema der Datensicherheit von weiterem Belang. Eine Messstation für das PLS wird um eine Kommunikationsbox erweitert. Gaisecker und Schröder (2022) beschreiben das System detailliert.

3.4 Datenanalyse

Aus den erfassten und zentral gemanagten Daten gilt es wesentliche Informationen für die unterschiedlichen Stakeholder zu extrahieren. Was die wesentliche Information hierbei ist, wird von den verschiedenen Nutzern der Daten anders interpretiert. Aus Sicht der Ingenieurvermessung ist das primäre Ziel der geometrische Vergleich zweier Epochen und die Ableitung entsprechender Deformationsvektoren innerhalb eines klassischen bitemporalen Vergleichs. Die Herausforderungen bei der Verwendung von Punktwolken aus TLS-Messungen werden hier nicht weiter thematisiert. Diese Thematik fassen u. a. Neuner et al. (2016) als auch Wunderlich et al. (2016) zusammen.

Permanente Installationen erlauben die Aufnahme von hochfrequenten Beobachtungsserien über lange Perioden. Die Extraktion diskreter Punkte auf deren Grundlage Zeitreihen zu entwickeln sind, ist weiterhin herausfordernd und unterscheidet sich gegenüber dem bitemporalen Vergleich nicht. Bisher erlaubt uns der Vergleich zweier Epochen die Ableitung von Differenzen. Je nach Methode lassen sich diese Differenzen quantifizieren als auch qualifizieren. Es ist nur die Aussage gültig, dass zwischen den beiden Vergleichszeitpunkten eine Zustandsänderung vorliegt. Die Schlussfolgerung, welcher Veränderungsprozess (diskret oder kontinuierlich) einer bitemporalen Differenz zugrunde liegt fehlt. Auswerteverfahren, die diesen Nachteil aufgreifen und auf die komplette Zeitserie zurückgreifen wurden in den letzten Jahren zunehmend entwickelt.

- So haben Kuschnerus et al. (2021) eine Methode entwickelt, um Informationen über Verformungsprozesse in Küstengebieten präzise und effizient aus PLS-Daten extrahieren zu können. Die Messszene wird in ein gleichmäßiges

Raster transformiert und für jede Rasterzelle eine mittlere absolute Höhe aus den darin liegenden Messpunkten des PLS ermittelt. Diese Berechnung erfolgt für alle Epochen, sodass jeweils eine Zeitserie entsteht. Alle Zeitserien werden mittels Clustering bzw. unsupervised learning nach eindeutigen Veränderungsmustern klassifiziert, so dass die gesamte Szene durch eine Auswahl an Klassen repräsentiert wird.

- Eine weitere Methode stellen Anders et al. (2020) vor. Auch hier werden die Daten in ein gleichmäßiges Raster umgewandelt. Bei dieser Methode werden in den eindimensionalen Zeitreihen Segmente detektiert, in denen Veränderungen stattfinden. So können beispielsweise innerhalb einer Zeitserie mehrere Segmente mit Veränderungen detektiert werden. Die Information aus der jeweiligen Zeitserie einer Rasterzelle wird in den Raum übertragen. Mittels DTW (Dynamic Time Warping) werden die Zeitserien der benachbarten Rasterzellen auf Ähnlichkeit überprüft. Bei Erfüllung bestimmter Kriterien wird eine Zelle dem räumlichen Cluster zugeordnet, sodass ein Objekt entsteht (Region Growing), das zeitlich als auch räumlich abgrenzend einen Veränderungsprozess charakterisiert.
- Ein zusätzliches Verfahren wird von Winiwarter et al. (2021 und 2022) präsentiert. Die Methode basiert auf dem bitemporalen Vergleich zweier Punktwolken mittels M3C2 (vgl. Lague et al. 2013). Differenzen zwischen den jeweiligen aufeinanderfolgenden Epochen lassen sich mit Bezug auf eine Referenzepoche als Zeitreihe nutzen. Winiwarter et al. (2021) haben zur Verbesserung der Quantifizierung der Messunsicherheit eine Methode zur Integration der Fehlerfortpflanzung entwickelt, die die Varianzen der jeweiligen Sensorkomponenten als auch die der Registrierung zu den jeweiligen Epochen berücksichtigt. Die M3C2-Zeitserien werden nach Winiwarter et al. (2022) mit Hilfe der Varianzinformationen einer Kalman-Filterung unterzogen. Die geglätteten Zeitreihen ermöglichen die Selektion mehrerer physikalisch beschreibbarer Features (z.B. maximale Änderungsgeschwindigkeit oder Beschleunigungen), die wiederum als Input für ein unüberwachtes Lernen (Clustering) genutzt werden können. Als Ergebnis stehen 2D-Cluster oder Magnitudenkarten zur Verfügung, mit deren Hilfe ein tiefergehendes Verständnis zu den vorliegenden Prozessen am zu überwachenden Objekt ermöglicht wird.

3.5 Visualisierung und Reporting

In einem finalen Schritt sind die Messwerte bzw. die daraus ableitbaren Informationen in einer adäquaten Repräsentation den Stakeholdern zur Verfügung zu stellen. Ein zentrales Datenmanagement (vgl. Kap. 3.3) eröffnet die Möglichkeit

die Scandaten in einer webbasierten Anwendung mit weiteren Sensoren zusammenzufassen. Im Kontext dieses Beitrags wird die webbasierte Monitoringplattform DMT SAFEGUARD genutzt. Es handelt sich dabei um eine webbasierte IoT-Plattform. Überwachungsdaten werden in einer Datenbank gesammelt, online dargestellt, analysiert und archiviert. Als integraler Bestandteil eines ganzheitlichen Risikomanagements ermöglicht ein solches System schnelle und fundierte Entscheidungen.

Zur Darstellung der Scannerdaten wird auf eine von *RIEGL* entwickelte Monitoringanwendung zurückgegriffen. Die Scandaten werden in ein Rasterbild umgewandelt und jeder Pixel einer PNG-Datei enthält codiert im RGB-Wert und dem Alphakanal die Strecke vom Scannerzentrum zum Objekt sowie den Normalenvektor dieser Rasterzelle zur Beschreibung der Raumlage. Aufgrund dieser Umwandlung reduziert sich die Dateigröße auf etwa 10 % einer vollen Punktwolke, was das Erfordernis an eine nahe Echtzeitfähigkeit unterstützt.

$$r_{\text{pix}(i,j),t_i} = (\text{Rot} + 256 * \text{Grün} + 256^2 * \text{Blau}) * 0.001 \quad (1)$$

$$\Delta d = (r_{\text{pix}(i,j),t_0} - r_{\text{pix}(i,j),t_1}) * 0.5 * (s_{\text{pix}(i,j),t_0} + s_{\text{pix}(i,j),t_1}) \quad (2)$$

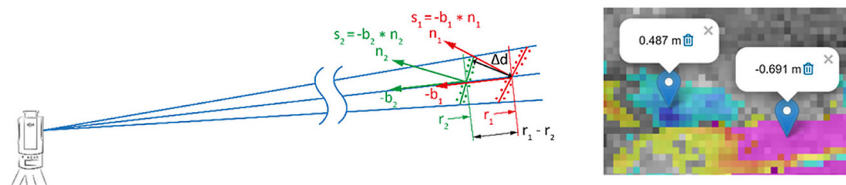


Abb. 2: Berechnung von Strecken (1) und Streckendifferenzen (2) aus Rasterbildern nach Gaisecker und Schröder (2022)

4 Projektbeispiel: Monitoring Felssturz Valsertal

Das beschriebene System wurde innerhalb eines laufenden Monitoringprojektes im Valsertal in Tirol (Österreich) implementiert. In diesem Gebiet ereignete sich am 24. Dezember 2017 ein Felssturz. Es gab keine Todesopfer noch nennenswerte Gebäudeschäden, aber eine Straße, die sich direkt unter dem Felssturzhang befand, wurde mit 8 m Gestein überdeckt und insgesamt 116.000 m³ Fels wurden aus dem Gebirge gelöst (vgl. Hartl 2019). Die örtlichen Behörden haben ein geodätisches Überwachungssystem eingerichtet, bestehend aus einer Totalstation (Modell: LEICA TM30) mit 21 Prismen (Modell: LEICA GPR1) und

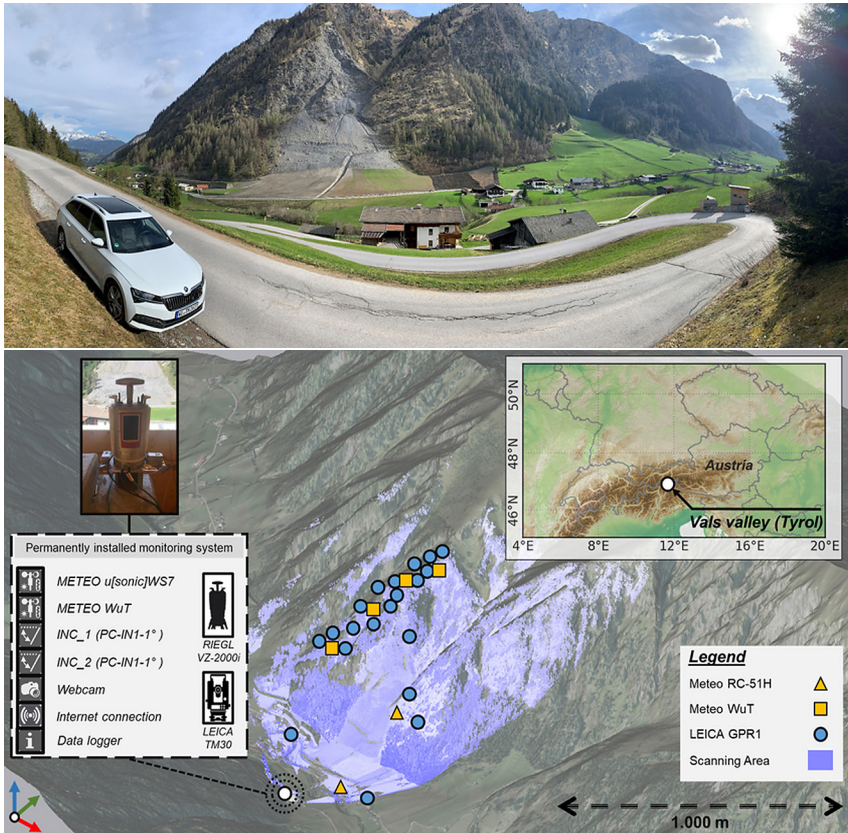


Abb. 3: Lageplan zur Darstellung der eingesetzten Sensorik im Valsertal sowie die Situation am Felssturz in Vals im Mai 2021

geotechnischen Sensoren (z. B. Extensometer), die im oberen Bereich des Bergsturzes verteilt sind. Da keine weiteren signifikanten Bewegungen in den erfassten Daten festgestellt werden konnten, wurde die Infrastruktur des bestehenden Überwachungssystems für die Forschungs- und Entwicklung des hier vorgestellten Systems durch die Landesregierung Tirol bereitgestellt (siehe auch Abb. 3).

Das Monitoringsystem wurde in der Weise optimiert, dass verschiedene Forschungs- und Entwicklungsfragen mit dem Fokus auf dem Einsatz von Long Range TLS aus ingenieurgeodätischer Sicht diskutiert werden können. Das System wurde um einen Laserscanner (Modell: RIEGL VZ-2000i) auf einem Messpfeiler, Neigungssensoren (Modell: PC-IN 1-1° von POSITION CONTROL) an dem Pfeiler sowie verschiedene meteorologische Sensoren als auch eine Webcam erweitert. Die zusätzlichen Messungen können verwendet werden, um

tages- und jahreszeitlich bedingte systematische Effekte auf die Ergebnisse der Oberflächenveränderung zu verifizieren.

Für die Datenauswertung wurde u. a. das Verfahren nach Winiwarter et al. (2022) verwendet und die Resultate dieser Untersuchung sind detailliert in Schröder et al. (2022) dargestellt. Abb. 4 zeigt die wesentlichen Ergebnisse. Bei der „Final change magnitude“ handelt es sich um einen bitemporalen Vergleich zwischen dem 28. Juli 2021 und 15. November 2021. „Die Max. change magnitude“ zeigt jedoch, dass es im gesamten Zeitraum zu weiteren Prozessen gekommen ist. Es kam beispielsweise zu Schneefall, sodass flächendeckend ca. 25 cm maximale Veränderung detektiert wurden. Der bitemporale Vergleich wäre für solche Ereignisse blind. „First recorded significant change“ färbt die Punktwolke entsprechend der zeitlichen Rangfolge der Ereignisse an. Die Erosionen sind um den Monatswechsel Juli/August 2021 entstanden. Der erste Schneefall mit einer ausgeprägten Schneedecke Anfang November. Final lassen sich die Zeitreihen mit ihren extrahierten Features clustern. Die Darstellung „Clustering result“ unterteilt die Punktwolke nach ihren jeweiligen Bewegungsmustern. Als Resultat dieser Auswertung lässt sich das weitere Monitoringprogramm adaptieren und optimieren.

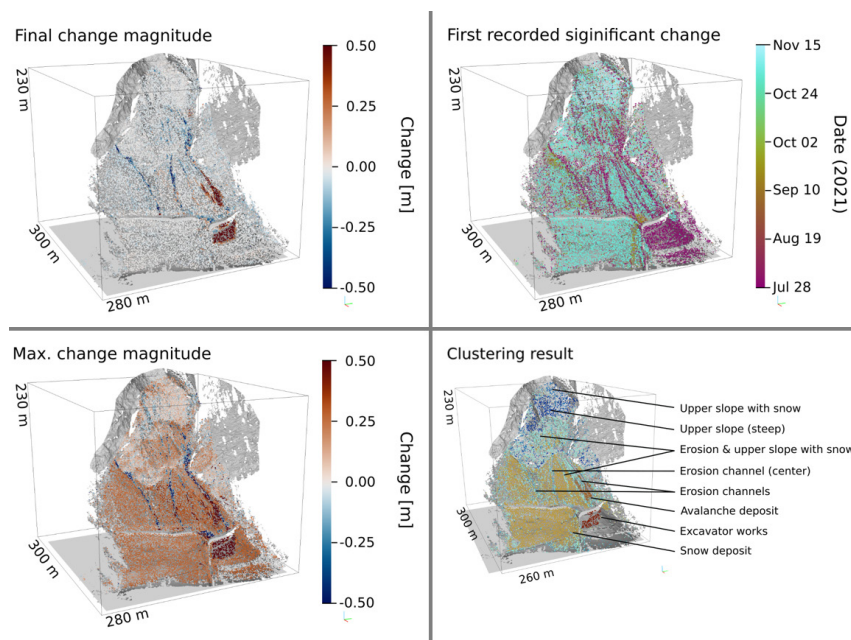


Abb. 4: Ergebnisse nach der Methode von Winiwarter et al. (2022). Betrachtung der Zeitreihen von Juli bis November 2021 (vgl. Schröder et al. 2022)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Paradigmenwechsel in der Ingenieurgeodäsie wird fortgeführt und der technische Fortschritt in immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen ermöglicht den Einsatz von Messtechnik für Anwendungen, die bis vor wenigen Jahren noch undenkbar waren. Die Evolution von TLS hin zu PLS ist ein exemplarisches Beispiel für diese Entwicklung. Es wird gezeigt, dass die Datenerfassung nicht mehr der limitierende Faktor ist und auch die zeitliche Auflösung keine Restriktion darstellen. PLS wird zunehmend in Produkten und Dienstleistungen angeboten und findet Zustimmung bei den Anwendern.

Die Qualitätssicherung im Allgemeinen und die Transformation von Daten hinzu relevanten Informationen sind weiterhin herausfordernd, wobei verschiedene Lösungsansätze vielversprechend sind. Die automatische Prozessierung der multitemporalen Messdaten, eine automatische Mustererkennung in den Zeitreihen mittels KI sowie daraus ableitend Handlungsempfehlungen werden wesentlich sein in den kommenden Jahren in Forschung und Entwicklung.

Literatur

- Anders, K., Lindenbergh, R. C., Vos, S. E., Mara, H., De Vries, S., Höfle, B. (2019): High-frequency 3D geomorphic observation using hourly terrestrial laser scanning data of a sandy beach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(2/W5), 317–324. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-317-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-317-2019).
- Anders, K., Winiwarter, L., Lindenbergh, R., Williams, J. G., Vos, S. E., Höfle, B. (2020): 4D objects-by-change: Spatiotemporal segmentation of geomorphic surface change from LiDAR time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 352–363.
- Bartelt, S., Wieben, H.-J. (2017): Ganzheitliches Risikomanagement nach ISO 31000 im mittelständischen Maschinen- und Anlagenbau Ganzheitliches Risikomanagement nach ISO 31000. *Controllor Magazin*. 16–22.
- Benndorf, J. (2021): Geomonitoring und Markscheidewesen als integrativer Teil des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche – zukünftige Aufgaben. *avv. allgemeine vermessungsnachrichten*. 05/2021. 13–20.
- Bremer, M., Zieher, T., Pfeiffer, J., Petrini-Monteferrì, F., Wichmann, V. (2019): Monitoring der Großhangbewegung Reissenschuh (Schmirntal, Tirol) mit TLS und UAV-basiertem Laserscanning. In: Weinold, T. (Hrsg.): 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.
- DIN ISO 31000:2018-10 (2018): Risikomanagement – Leitlinien (ISO 31000:2018), Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- Dinkel, A., Hoegner, L., Emmert, A., Raffl, L., Wunderlich, T., Stilla, U. (2021): Gemeinsame Auswertung von geodätischen und photogrammetrischen Punktwolken zum Monitoring hochalpiner, gravitativer Massenbewegungen. In: Weinold, T. (Hrsg.): 21. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.

- Eitel, J. U., Höfle, B., Vierling, L. A., Abellán, A., Asner, G. P., Deems, J. S., Vierling, K. T. (2016): Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sensing of Environment*, 186, 372–392.
- Friedli, E., Presl, R., Wieser, A. (2019): Influence of atmospheric refraction on terrestrial laser scanning at long range. In: *Proc. of the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
- Friedli, E., Wieser, A. (2016): Identification of stable surfaces within point clouds for areal deformation monitoring. In *Proc. of 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
- Gaisecker, T., Schröder, D. (2022): RIEGL V-Line scanners for permanent monitoring applications and integration capabilities into customers risk management. Horn, Essen (eds.) *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH & DMT GmbH & Co. KG*.
- Hartl, S. (2019): *Analyse der Felslawinen Frank Slide und Vals mit Hilfe des Computer-codes r. avaflow* (Doctoral dissertation, Wien).
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., Neuner, H. (2013): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser M., Müller G., Schlemmer H. (Hrsg.): *Handbuch Ingenieurgeodäsie*, 2. Aufl. Wichmann, Berlin.
- Kromer, R. A., Abellán, A., Hutchinson, D. J., Lato, M., Chanut, M. A., Dubois, L., Jaboyedoff, M. (2017): Automated terrestrial laser scanning with near-real-time change detection – monitoring of the Séchilienne landslide. *Earth surface dynamics*, 5(2), 293–310.
- Kuhlmann, H., Holst, C. (2017): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. DOI: [10.1007/978-3-662-47188-3_34](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_34).
- Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Vos, S. (2021): Coastal change patterns from time series clustering of permanent laser scan data. *Earth Surface Dynamics*, 9(1), 89–103.
- Kuschnerus, M., Schröder, D., Lindenbergh, R. (2021): Environmental influences on the stability of a permanently installed laser scanner. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 745–752.
- Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Lodder, Q., Brand, E., Vos, S. (2022): Detecting anthropogenic volume changes in cross sections of a sandy beach with permanent laser scanning. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43(B2-2022).
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 82, 10–26.
- Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., Al-Manasir, K. (2016): A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. In: *Survey Review*, 48(2016), 1–18.
- Neumann, I., Alkhatib, H. (2022): Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren – das Handwerkszeug. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022*. DVW-Schriftenreihe, Band 101, Wißner-Verlag, Augsburg, 9–11.
- Neuner, H., Holst, C., Kuhlmann, H. (2016): Overview on current modelling strategies of point clouds for deformation analysis. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN; Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation*, 123 (11-12), 328–339.

- Niemeier, W., Heunecke, O. (2004): Paradigmenwechsel bei der Auswertung ingenieur-geodätischer Messungen: Herausforderungen, Konzepte, Trends. *Ingenieurvermessung 2004, 14th International Course on Engineering Surveying*.
- Niemeier, W., Riedel, B. (2017): Monitoring von Hangrutschungen. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. DOI: [10.1007/978-3-662-47188-3_34](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_34).
- Resnik, B. (2021): Anwendung von künstlichen neuronalen Netzen bei der Auswertung von Deformationsmessungen. In: Weinold (Hrsg.): 21. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.
- Schröder, D., Nowacki, A. (2021): Die Atmosphäre als restriktiver Einfluss auf Messergebnisse eines Long Range Laserscanners. In: Weinold (Hrsg.): 21. Internationale Geodätische Woche Obergurgl.
- Schröder, D., Anders, K., Winiwarter, L., Wujanz, D. (2022): Permanent terrestrial Lidar monitoring in mining, natural hazard prevention and infrastructure protection – Chances, risks, and challenges: A case study of a rockfall in Tyrol, Austria. In: *Proc. of the 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*.
- Schwarz, W., Hennes, M. (2017): Qualitätsbewertungen in der Ingenieurgeodäsie. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2_31-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_31-1).
- Sommer, K., Siebert, B. (2004): Praxisgerechtes Bestimmen der Messunsicherheit nach GUM. *tm – Technisches Messen*, 71(2), 52–66.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., Teunissen, P. (2011): Scanning geometry: influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS J. Photogramm.* 66, 389–399.
- Studnicka, N., Schröder, D. (2020): Der permanente Einsatz von Long Range Laser Scannern im Monitoring – Speziallösungen mittels offener Python-Schnittstellen. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2020 (TLS 2020)*. DVW-Schriftenreihe, Band 98, Wißner-Verlag, Augsburg, 179–191.
- Tschirschwitz, F., Mechelke, K., Jansch, H., Uliczka, K., Kersten, T. (2016): Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2016, 141. Jg., 297–305. DOI: [10.12902/zfv-0132-2016](https://doi.org/10.12902/zfv-0132-2016).
- Voordendag, A. B., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzinger, M., Kaser, G. (2021): Automated and Permanent Long-Range Terrestrial Laser Scanning in a High Mountain Environment: Setup and First Results. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, (2).
- Wieser, A., Kuhlmann, H., Schwiager, V., Niemeier, W. (2017): Ingenieurgeodäsie – eine Einführung. In: Schwarz, W. (Hrsg.): *Ingenieurgeodäsie*. DOI: [10.1007/978-3-662-47188-3_19](https://doi.org/10.1007/978-3-662-47188-3_19).
- Williams, J.G., Rosser, N.J., Hardy, R.J., Brain, M.J. (2019): The importance of monitoring interval for rockfall magnitude-frequency estimation. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12), 2841–2853.
- Wiltshcko, T. (2004): Sichere Informationen durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsystem zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten. Diss.
- Winiwarter, L., Anders, K., Höfle, B. (2021): M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 240–258.

- Winiwarter, L., Anders, K., Schröder, D., Höfle, B. (2022): Full 4D Change Analysis of Topographic Point Cloud Time Series using Kalman Filtering. *Earth Surface Dynamics Discussions*, 1–25.
- Wujanz, D. (2016): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring, volume C (775). Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Wunderlich, T., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H. (2016): Areal deformation analysis from TLS point clouds – The challenge. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten: AVN; Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation*, 123 (11-12), 340–351.

Kontakt

M.Sc. Daniel Czerwonka-Schröder
DMT GmbH & Co. KG – Civil & Mining Engineering
Am TÜV 1, 45327 Essen
daniel.schroeder@dm-group.com

Punktwolkenbasierte Bestimmung von starkregeninduzierten Bodenabträgen

Corinna Harmening | Simone Ott | Ramon Butzer |
Bastian Steinhoff-Knopp | Jens-André Paffenholz

1 Einleitung

Durch die landwirtschaftliche Nutzung sind Böden anfällig gegenüber Erosion durch Wind und Wasser. Erosion führt dauerhaft zu einer Degradation von Böden und minimiert damit die Fähigkeit von Böden Ökosystemleistungen bereitzustellen. Ernsthafte Folgen von Bodenerosion können sowohl auf den ackerbaulich genutzten Flächen (z. B. reduzierte Fruchtbarkeit, Missernten) als auch abseits von ihnen (z. B. Nährstoffeinträge in Gewässer, Verschmutzung von Infrastruktur) beobachtet werden. Der deutschen Welthungerhilfe zufolge ist bereits 23 % des kultivierten Bodens in Deutschland durch Bodenerosion degradiert (Welthungerhilfe 2022).

Die Überwachung des Ausmaßes von Bodenerosionsereignissen inklusive der steuernden Faktoren ist ein wichtiges Werkzeug im Bodenschutzvollzug und in der Planung von Maßnahmen in der Landwirtschaft (Abergel et al. 2008). Die klassischen Verfahren zur Beobachtung von Bodenerosionsprozessen wie beispielsweise der Einsatz von Erosionspins (Haigh 1977, Zhang und Rutherford 2020) oder Profilmeter (Hegazy 2013) sind in der Regel invasiv, da die entsprechenden Instrumente in den zu beobachtenden Flächen installiert werden (Afana et al. 2010). Gleichzeitig handelt es sich um lokale Messverfahren, sodass eine flächendeckende Erfassung von Erosion eine Vielzahl von Messstellen bzw. Messplots benötigt (Abergel et al. 2008). Letztere Eigenschaft sowie die Tatsache, dass es sich üblicherweise um manuelle Messverfahren handelt, führen dazu, dass die Beobachtung von Bodenerosion arbeits- und zeitintensiv ist (Schmid et al. 2012).

Mit dem terrestrischen Laserscanning (TLS) ist eine alternative Messtechnik verfügbar, mit deren Hilfe große Messbereiche schnell, effizient und kontaktlos erfasst werden können. Die resultierenden Daten sind von hoher räumlicher Auflösung und geben eine quasi-kontinuierliche Beschreibung der erfassten Szene. Aufgrund dieser Eigenschaften hat sich das TLS in den letzten Jahren als Messtechnik für das Erfassen von Bodenerosion etabliert (Eltner et al. 2013).

Beispielsweise untersuchen Asensio et al. (2019) die Einsatzmöglichkeiten von TLS, um den von Wind verursachten Bodenabtrag auf Ackerflächen zu bestimmen, während Cao et al. (2021) durch Niederschlag verursachte Bodenerosion von unbefestigten Straßen überwacht. Weiterhin wird das TLS für die Bestimmung von Bodenerosion an Hängen (Li et al. 2021) oder für die Quantifizierung des regeninduzierten Bodenabtrags auf Ackerflächen (Eltner und Baumgart 2015) eingesetzt.

In einem Großteil der in der Literatur zu findenden Anwendungen von TLS zur Erfassung von Bodenerosion werden die generierten Punktwolken zunächst gerastert, sodass anschließend digitale Geländemodelle (DGMs) abgeleitet werden können (Cao et al. 2021, Eltner und Baumgart 2015, Asensio et al. 2019). Durch die Differenzbildung zweier DGMs wird dann beispielsweise der erosionsbedingte Bodenabtrag zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten bestimmt. Charakteristisch für diese Vorgehensweise ist, dass für die Berechnungen die gemessenen Punktwolken direkt verwendet werden und somit das Messrauschen in seinem ganzen Ausmaß in die Bestimmung des Bodenabtrags einfließt. Eine Filterung der Punktwolken zur Reduktion des Messrauschens ist nur in seltenen Fällen implementiert (Eltner und Baumgart 2015, Li et al. 2021).

Als alternative Vorgehensweise wird in diesem Beitrag eine B-Spline-basierte Bestimmung des Bodenabtrags vorgestellt, bei der auf eine Rasterung der Daten verzichtet werden kann. Indem die Punktwolken mit Hilfe von B-Spline-Funktionen approximiert werden, erfolgt zunächst eine Filterung des Messrauschens. In diesen ersten Untersuchungen wird die Punktwolke hierfür in Profile unterteilt, sodass für jedes Profil eine geschätzte B-Spline-Kurve resultiert. Aus dem Vergleich der geschätzten Kurven über die Zeit lässt sich anschließend der erosionsbedingte Bodenabtrag für jedes Profil quantifizieren. Eine besondere Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass die Untersuchungen auf ackerbaulich genutzten Flächen durchgeführt werden und es somit zu partiellen Verdeckungen des Bodens durch Vegetation kommt.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 werden die methodischen Grundlagen vorgestellt, die für den präsentierten Ansatz benötigt werden. Die Datenerfassung und -vorverarbeitung wird in Abschnitt 3 beschrieben. Abschnitt 4 stellt die B-Spline-basierte Bestimmung des erosionsbedingten Bodenabtrags vor. Zudem werden in diesem Abschnitt die erzielten Ergebnisse analysiert und bewertet. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5 eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen.

2 Punktwolkenapproximation mit B-Spline-Kurven

Eine B-Spline-Kurve vom Grad p ist definiert durch (Piegl und Tiller 1997):

$$\hat{C}(u) = C(u) + \varepsilon(u) = \sum_{i=0}^{n_p} N_{i,p}(u) P_i, \quad 0 \leq u \leq 1. \quad (1)$$

Ein Kurvenpunkt $\hat{C}(u)$ ergibt sich somit als das gewichtete Mittel der $n_p + 1$ Kontrollpunkte P_i . Die entsprechenden Gewichte werden durch die Funktionswerte der B-Spline-Basisfunktionen $N_{i,p}(u)$ definiert, die sich rekursiv berechnen lassen (Cox 1972, Boor et al. 1976). Der Parameterraum wird durch einen Knotenvektor $U = [u_0, \dots, u_r]$ in Knotenspannen unterteilt.

Werden B-Spline-Kurven zur Approximation von Punktwolken eingesetzt, werden üblicherweise ausschließlich die Positionen der Kontrollpunkte geschätzt. Diese Vorgehensweise führt zu einem linearen Zusammenhang zwischen den Beobachtungen $C(u) = [C_x(u), C_y(u), C_z(u)]^T$ und den unbekannten Kontrollpunkten P_i . Die optimale Anzahl an Kontrollpunkten ist ein Modellselektionsproblem und kann mit klassischen Informationskriterien oder mit Hilfe der strukturellen Risikominimierung bestimmt werden (Harmening und Neuner 2016). Letzteres Verfahren erlaubt auch die Auswahl des optimalen Grades p (Harmening 2020). Alternativ werden häufig kubische B-Splines mit $p = 3$ eingesetzt, da sie die geometrischen Kontinuitätseigenschaften einer großen Anzahl von Strukturen widerspiegeln (Piegl und Tiller 1997). Eine weitere Voraussetzung für den Einsatz von B-Spline-Kurven zur Approximation von Punktwolken ist die Zuweisung von geeigneten Kurvenparametern u zu den Beobachtungen. Für geordnete Punktwolken werden drei Standardverfahren unterschieden: die uniforme, die chordale und die zentripetale Parametrisierung (Piegl und Tiller 1997). Auf Basis der zugewiesenen Kurvenparametern lässt sich abschließend der Knotenvektor U bestimmen. Ein vergleichsweise einfaches Verfahren für die Knotenbestimmung wird von Piegl und Tiller (1997) vorgeschlagen, eine ausgefeiltere Methode zur Bestimmung der Knoten findet sich beispielsweise in Bureick et al. (2019).

3 Datenerfassung und -vorverarbeitung

Die Messkampagne wurde in der Nähe der Ortschaft Lamspringe im südlichen Niedersachsen durchgeführt. Der durchschnittliche Jahresniederschlag in dieser Gegend liegt bei 800 mm und damit nah am Durchschnitt für Deutschland. Aufgrund der Eigenschaften des Oberbodens und der relativ hohen Reliefenergie ist dieses Gebiet anfällig für Bodenerosion durch Wasser und ist aus diesem Grund

bereits seit 2000 Bestandteil eines Langzeitmonitorings (Steinhoff-Knopp und Burkhard 2018).

Mit dem Ziel die erosionsbedingte Bodenveränderung unter Anbaubedingungen zu bestimmen, wurde eine mit Mais bewirtschaftete Anbaufläche als Untersuchungsobjekt gewählt. Im Mai und Juni, wenn die Niederschlagswahrscheinlichkeit recht hoch ist, weist Mais noch eine geringe Bodenbedeckung auf (Auerswald et al. 2019). Da dies das Auftreten von Erosionsereignissen begünstigt, wurden im Zeitraum vom 11. Mai 2022 (direkt nach Aussaat) bis zum 8. Juni 2022 im ausgewählten Gebiet wöchentlich 3D-Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner erfasst.

Insgesamt wurden drei Plots in der Größe von 2 m × 3 m ausgewählt. Jeder dieser Plots wurde von zwei Seiten aus einer Distanz von ca. einem Meter und mit einem daraus resultierenden Einfallswinkel von etwa 50° gescannt. Der verwendete Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) IMAGER 5010X besitzt eine integrierte Kamera, die zusätzlich zu den geometrischen und radiometrischen Informationen aus der 3D-Punktwolke (3D-Punktpositionen und Intensitätswerte) auch RGB-Werte liefert.

Um die erfassten 3D-Punktwolken zu registrieren, wurden in einem Abstand von 1 m um jeden Plot sechs Referenzkugeln mit einem Durchmesser von 145 mm angeordnet (Abb. 1 rechts). Sowohl die Positionen der Kugeln als auch die Ecken der Plots wurden mit Hilfe von Bodenhülsen markiert, die 25 cm tief in den Boden eingeschlagen wurden und während der gesamten Feldkampagne an ihren Positionen verblieben (Abb. 1 links). Da Veränderungen der Hülsenpositionen aufgrund der Bewirtschaftung der Fläche nicht auszuschließen sind, wurden diese Positionen vor jeder wöchentlichen Erfassung mit Hilfe von dreiminütigen GNSS-RTK-Messungen kontrolliert. Für alle beobachteten Punkte liegen die Variationen der Koordinaten über die Zeit innerhalb der erzielbaren GNSS-RTK-Genauigkeit.



Abb. 1: Messkampagne. Links: Aufbau zwischen den einzelnen Messwochen. Rechts: Aufbau während des Scans

Entsprechend des oben beschriebenen Messaufbaus wurde die Registrierung der 3D-Punktwolken zunächst targetbasiert durchgeführt. Aufgrund der Bewirtschaftung des Bodens zwischen den Messepochen lassen sich Veränderungen der Targetpositionen, deren Größenordnungen unterhalb der GNSS-RTK-Messgenauigkeit liegen, jedoch nicht ausschließen. Aus diesem Grund wurde die targetbasierte Registrierung in einem zweiten Schritt durch einen ebenenbasierten Ansatz der Software Scantra (Version 3.0.1.256, www.technet-gmbh.com) verbessert. Die entsprechenden Ebenenkorrespondenzen wurden dabei nur dann hergestellt, wenn keine signifikanten Bewegungen der Ebenen festgestellt werden konnten. Unter diesen Voraussetzungen konnte die ebenenbasierte Registrierung auf 100 bis 250 Ebenen pro Standpunkt gestützt werden, was zu einer Verbesserung der targetbasierten Registrierung führte.

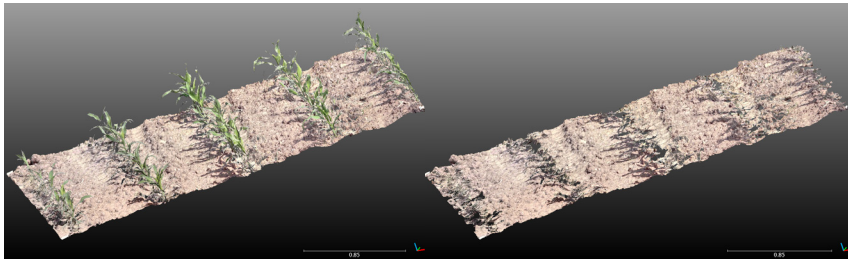


Abb. 2: Vegetationsfilterung. Links: Ungefilterte 3D-Punktwolke. Rechts: Gefilterte 3D-Punktwolke

Da die Messungen unter Feldbedingungen durchgeführt wurden und das Untersuchungsobjekt Bodenoberfläche somit während der vier Wochen der Datenerfassung stetig stärker durch Vegetation verdeckt wurde, ist außerdem eine Vegetationsfilterung der 3D-Punktwolken notwendig. Diese Trennung von Boden und Vegetation wurde mit Hilfe des CANUPO-Algorithmus (Brodu und Lague 2012) sowie des Cloth Simulation Filters (CSF) (Zhang et al. 2016) umgesetzt. Das entsprechende Ergebnis ist am Beispiel der fünften Messepoche in [Abb. 2](#) zu sehen. Obwohl ein Großteil der Vegetation entfernt werden konnte, sind in der als Boden klassifizierten 3D-Punktwolke weiterhin einige Punkte enthalten, die der Vegetation zugeschrieben werden müssen.

4 B-Spline-basierte Bestimmung des Bodenabtrags

4.1 Punktwolkenmodellierung

Der erste Schritt für die Bestimmung des Bodenabtrags zwischen den erfassten Messepochen ist die Modellierung der bereinigten Punktwolken mit Hilfe von B-Splines mit dem Ziel, das Messrauschen zu reduzieren.

Hierfür erfolgt zunächst eine Unterteilung der 3D-Punktwolken in jeweils 20 Punktwolkenstreifen mit einer Breite von $dx = 10,5$ cm. Die Punkte jedes Streifens werden anschließend in eine mittlere senkrechte Ebene projiziert, sodass 20 2D-Punktwolkenprofile entstehen. Für eine möglichst repräsentative Darstellung der gesamten Szene durch Profile werden die Profilrichtungen quer zu den Strukturen gewählt, die sich durch die Bewirtschaftung des Bodens ergeben (siehe Abb. 3 für eine beispielhafte Darstellung der Epoche 1).

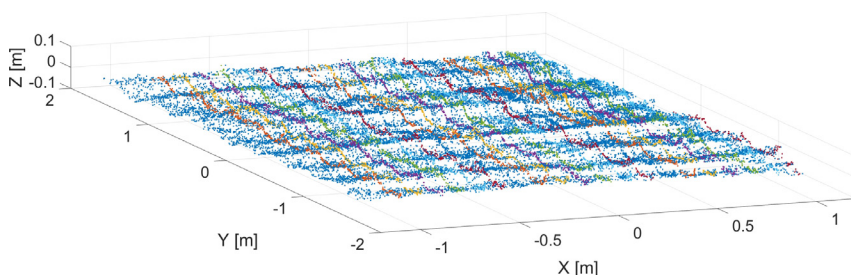


Abb. 3: Unterteilung der 3D-Punktwolke (blau) in Profile (bunt)

Die projizierten Punkte bilden die Grundlage für die Bestimmung von zwei-dimensionalen kubischen B-Spline-Kurven, deren Kontrollpunkte im linearen Gauß-Markov-Modell geschätzt werden (vgl. Abschnitt 2). Die optimale Anzahl der Kontrollpunkte wird mit Hilfe des Bayes'schen Informationskriteriums (Schwarz 1978) bestimmt und für die Bestimmung der Kurvenparameter wird die zentripetale Parametrisierung gewählt (vgl. Piegler und Tiller 1997). Darauf aufbauend wird der Knotenvektor nach Piegler und Tiller (1997) bestimmt.

Abb. 4 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Schätzung. Die in blau dargestellten Datenpunkte erhalten deutlich erkennbares Messrauschen, das durch die rot dargestellte B-Spline-Kurve erfolgreich reduziert wird.

Die geschätzten Kurven repräsentieren somit die Mikrotopographie der entsprechenden Bodenprofile, die in dieser Anwendung durch einige lokale Minima und Maxima charakterisiert werden, und bilden die Grundlage für die Bestimmung des Bodenabtrags.

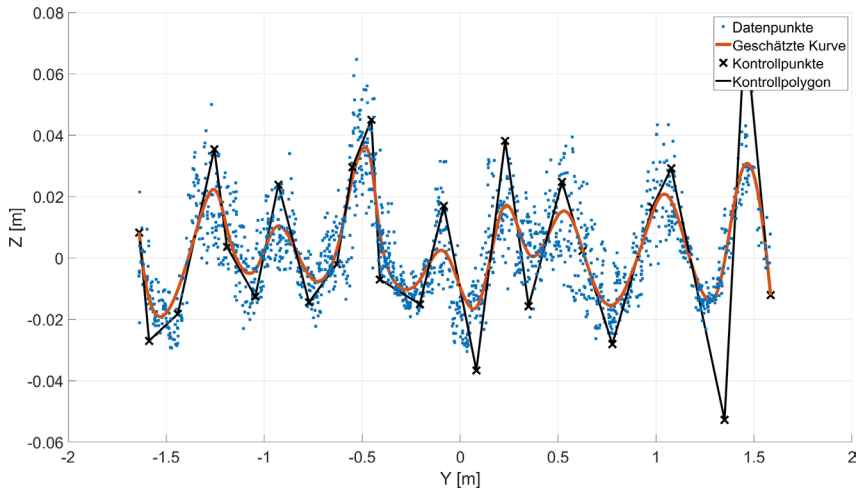


Abb. 4: Profilweise Punktwolkenmodellierung mit B-Spline-Kurven

4.2 Bestimmung des Bodenabtrags

Das Prinzip zur profilweisen Quantifizierung des Bodenabtrags ist in Abb. 5 beispielhaft für ein Profil skizziert. Zu sehen ist in blau die geschätzte B-Spline-Kurve der ersten Messepoche, die in diesem Fall als Referenzepoche dient. Die rote B-Spline-Kurve repräsentiert die Mikrotopographie einer der nachfolgenden Epochen E_i .

Das Ziel ist die Bestimmung des profilweisen Bodenabtrags der i -ten Messepoche bezogen auf die Referenzepoche E_1 und somit die Bestimmung des Flächeninhalts $A_{\Delta,i}$ der gestrichelt dargestellten Fläche.

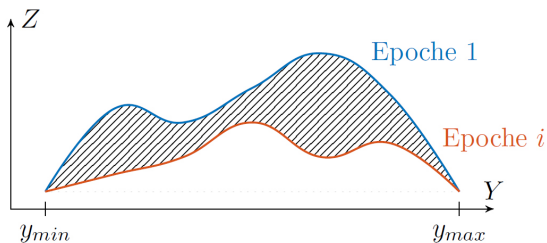


Abb. 5:

Bestimmung des Bodenabtrags. Blau: Kurve der ersten Messepoche; rot: Kurve einer der nachfolgenden Messepochen. Gesucht ist der Flächeninhalt der gestrichelt dargestellten Fläche.

Dieser gesuchte Flächeninhalt ergibt sich aus der Differenz der Flächeninhalte unter den beiden Kurven:

$$A_{\Delta,i} = A_{E_1} - A_{E_i}, \quad i = 2, \dots, 5 \quad (2)$$

mit:

A_{E_1} : Flächeninhalt unter der B-Spline-Kurve der ersten Messepoche

A_{E_i} : Flächeninhalt unter der B-Spline-Kurve der i -ten Messepoche

Die Flächeninhalte unter den B-Spline-Kurven lassen sich durch Integration der Kurven ermitteln:

$$A_{E_j} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} C_j(u) du, \quad j = 1, \dots, 5. \quad (3)$$

Zu beachten ist hierbei, dass die Integralbildung nur dann den gesuchten Flächeninhalt unterhalb der Kurve liefert, wenn diese vollständig oberhalb von $Z = 0$ verläuft. Dies ist in den erfassten Daten zunächst nicht der Fall (vgl. Abb. 4). Da im Folgenden ausschließlich relative Größen betrachtet werden, werden alle Kurven eines Profils um denselben Wert nach oben verschoben, sodass die geforderte Bedingung erfüllt ist. Die Größe dieses Wertes ist aufgrund der Differenzbildung in Formel (2) ohne Auswirkungen auf die Bestimmung von $A_{\Delta,i}$.

Im letzten Schritt wird über den berechneten Flächeninhalt $A_{\Delta,i}$ und die bekannte Breite dx des entsprechenden Punktwolkenstreifens das Volumen $V_{\Delta,i}$ des Bodenabtrags innerhalb des Streifens bestimmt:

$$V_{\Delta,i} = A_{\Delta,i} \cdot dx, \quad i = 2, \dots, 5. \quad (4)$$

Diese Berechnungen werden für jeden der 20 Punktwolkenstreifen durchgeführt, wobei die Auswertung der Integrale in Formel (3) numerisch mit Hilfe der Trapezformel erfolgt.

4.3 Ergebnisse

In Abb. 6 sind für einige ausgewählte Profile beispielhaft die Ergebnisse der Bodenabtragsbestimmung zu sehen. In den Profilen 11 bis 14 (Nummerierung von links nach rechts in Abb. 3) sind die berechneten Werte für $V_{\Delta,i}$ für alle Messepochen positiv (Abb. 6 links). Bezogen auf die erste Messepoche hat damit entsprechend der Formel (2) in allen vier Profilen ein Bodenabtrag stattgefunden. Beim Vergleich der vier Kurven untereinander ist zu erkennen, dass dieser Bodenabtrag über die Epochen 2, 3 und 5 größer wird, was den Erwartungen

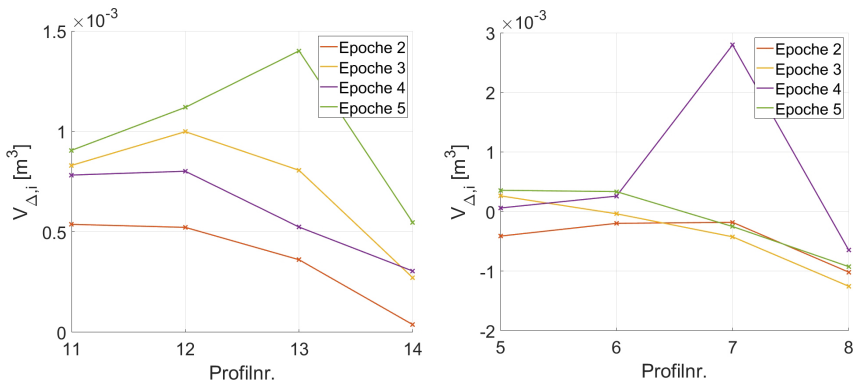


Abb. 6: Beispielhafte Ergebnisse der Bodenabtragsbestimmung. Links: Profile 11 bis 14. Rechts: Profile 5 bis 8

entspricht. Das vorgestellte Verfahren liefert somit plausible Werte für den profilweisen Bodenabtrag in diesem Bereich der Punktwolke.

Gleichzeitig fällt jedoch auf, dass sich die Kurve der Epoche 4 nicht entsprechend einordnet. Die berechneten Werte deuten vielmehr an, dass in der Epoche 4 im Vergleich zu der vorherigen Epoche 3 zunächst wieder eine Erhöhung des Bodens stattgefunden hat, bevor dieser in Epoche 5 wieder abgetragen wurde. Erklärt werden kann dies mit einer Quellung des Bodens durch Befeuchtung zwischen Epoche 3 und 4 und einem anschließenden Abtrag zwischen Epoche 4 und 5.

Noch stärker ist dieser Effekt in den Profilen 7 und 8 (Abb. 6 rechts) zu erkennen: In beiden Profilen ist für den Großteil der Messepochen der Bodenabtrag negativ. Entsprechend dieser Ergebnisse scheint in den Profilen 7 und 8 somit kein Bodenabtrag stattgefunden zu haben, sondern – im Gegenteil – es scheint eine Akkumulation aufgetreten zu sein. Theoretisch können Erosionsereignisse auch zur Umverteilung von Bodenmaterial im Bereich der beobachteten Plots führen, sodass ein Aufwuchs der Bodenoberfläche durch Ablagerung in bestimmten Bereichen auch bei Erosionsereignissen möglich ist. Eine genauere Untersuchung der entsprechenden Bereiche der Punktwolken zeigt jedoch eine andere Ursache für diese negativen Werte. In Abb. 7 sind beispielhaft für das Profil 8 die Punktwolken und die geschätzten Kurven der Epochen 1, 3 und 5 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass in den Punktwolken der Epochen 3 (grün) und 5 (gelb) eine Reihe von Ausreißern in den Bereichen der lokalen Maxima vorhanden sind. Bei diesen Ausreißern handelt es sich um Fehlklassifizierungen in der Vegetationsfilterung: Punkte, die eigentlich Vegetation beschreiben, werden der Bodenklasse zugeordnet und verfälschen dementsprechend das Ergebnis der Kurvenschätzung. Infolgedessen beschreiben die resultierenden Kurven

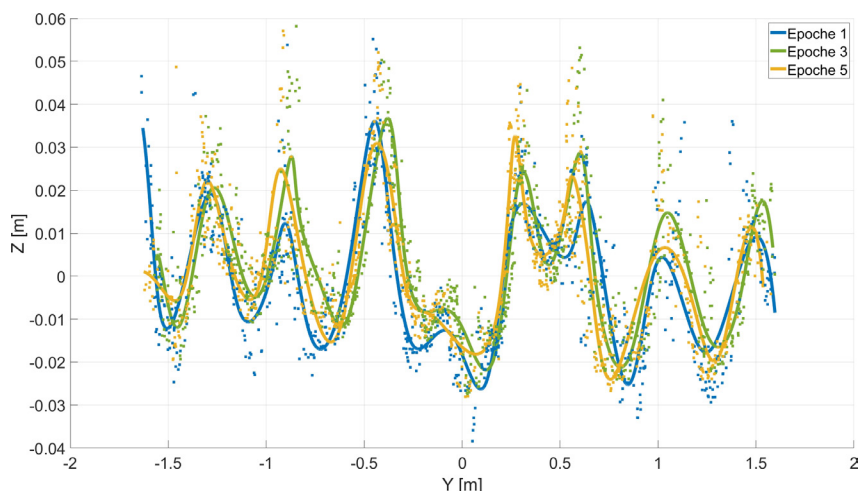


Abb. 7: B-Spline-Kurven unterschiedlicher Messepochen im Profil 8

nicht länger die reine Mikrotopographie des Bodens, sondern enthalten zusätzlich Einflüsse der Vegetation. Hierdurch entsteht der falsche Eindruck, dass sich über die Zeit Bodenmaterial angesammelt hat.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein punktwolkenbasiertes Verfahren zur profilweisen Bestimmung von erosionsbedingtem Bodenabtrag vorgestellt. Den Kern des Verfahrens stellt die profilweise Modellierung der erfassten Punktwolken mit Hilfe von B-Spline-Kurven dar. Durch Integration der entsprechenden B-Spline-Kurven und den Vergleich der jeweiligen Flächeninhalte lässt sich der erosionsbedingte Bodenabtrag für jedes Profil quantifizieren.

Obwohl die Anwendung des vorgestellten Ansatzes auf Messdaten sein Potenzial zeigt, wird vor allem eine Schwierigkeit deutlich: Dadurch, dass die Untersuchungen auf kultiviertem Boden durchgeführt wurden, wird bei der Datenerfassung nicht ausschließlich die relevante Bodenoberfläche erfasst, sondern zusätzlich die sich ständig verändernde Vegetation. Für die richtige Quantifizierung des Bodenabtrags ist eine vollständige und korrekte Trennung von Boden und Vegetation in den Punktwolken essentiell. Die in diesem Beitrag hierfür eingesetzten Verfahren zur Vegetationsfilterung, der CANUPO-Algorithmus sowie der Cloth Simulation Filter, zeigen zwar grundsätzlich Erfolg, können jedoch mit den gewählten Parametern und für die hier vorgestellten Untersuchungen den Vegetationsteil nicht zufriedenstellend entfernen.

Zukünftige Untersuchungen werden sich aus diesem Grund mit der Weiterentwicklung der Vegetationsfilterung beschäftigen. Die Implementierung einer robusten Schätzung der B-Spline-Kurven vermindert ebenfalls den Einfluss von nicht vollständig vermeidbaren Fehlklassifizierungen.

Weiterhin ist die Erweiterung der bislang rein profilweisen Betrachtungsweise auf eine flächenhafte angestrebt.

Literatur

- Abergel, S., Filin, S., Goldshleger, N. (2008): Measurement of Erosion in Agricultural Fields Using Monoscopic Photogrammetry. In: Proceedings of the FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden, 14–19 June 2008.
- Afana, A., Sole-Benet, A., Perez, J.L. (2010): Determination of Soil Erosion Using Laser Scanners. In: Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Brisbane, Australia, 1–6 August 2010.
- Asensio, C., Weber, J., Lozano, F., Mielnik, L. (2019): Laser-scanner used in a wind tunnel to quantify soil erosion. In: *Int. Agrophys.* 33 (2), 227–232. DOI: [10.31545/intagr/109424](https://doi.org/10.31545/intagr/109424).
- Auerswald, K., Fischer, F., Winterrath, T., Brandhuber, R. (2019): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 23 (4), 1819–1832. DOI: [10.5194/hess-23-1819-2019](https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019).
- Boor, Carl de; Lyche, Tom; Schumaker, Larry L. (1976): On Calculating with B-Splines II. Integration. In: L. Collatz, H. Werner und G. Meinardus (Hg.): *Numerische Methoden der Approximationstheorie/Numerical Methods of Approximation Theory*. Basel: Birkhäuser Basel, 123–146.
- Brodu, N., Lague, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 68, 121–134. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.006).
- Bureick, J., Alkhatib, H., Neumann, I. (2019): Fast converging elitist genetic algorithm for knot adjustment in B-spline curve approximation. In: *Journal of Applied Geodesy* 13 (4), 317–328. DOI: [10.1515/jag-2018-0015](https://doi.org/10.1515/jag-2018-0015).
- Cao, L., Wang, Y., Liu, C. (2021): Study of unpaved road surface erosion based on terrestrial laser scanning. In: *CATENA* 199, S. 105091. DOI: [10.1016/j.catena.2020.105091](https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105091).
- Cox, M. G. (1972): The Numerical Evaluation of B-Splines. In: *IMA J Appl Math* 10 (2), 134–149. DOI: [10.1093/imamat/10.2.134](https://doi.org/10.1093/imamat/10.2.134).
- Eltner, A., Baumgart, P. (2015): Accuracy constraints of terrestrial Lidar data for soil erosion measurement: Application to a Mediterranean field plot. In: *Geomorphology* 245, 243–254. DOI: [10.1016/j.geomorph.2015.06.008](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.008).
- Eltner, A., Mulrow, C., Maas, H.-G. (2013): Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL.
- Haigh, M. J. (1977): The use of erosion pins in the study of slope evolution. In: *Technical Bulletin* 18, British Geomorphological Research Group.

- Harmening, C. (2020): Spatio-temporal deformation analysis using enhanced B-spline models of laser scanning point clouds. Dissertation, TU Wien, Wien.
- Harmening, C., Neuner, H. (2016): Choosing the Optimal Number of B-spline Control Points (Part 1: Methodology and Approximation of Curves). In: Journal of Applied Geodesy 10 (3). DOI: [10.1515/jag-2016-0003](https://doi.org/10.1515/jag-2016-0003).
- Hegazy, R. (2013): Soil Surface Profile Computation Using Portable Profile Meter with Image Processing and Tracking Technique. In: Global Journal of Researches in Engineering 13 (3). DOI: [10.6084/M9.FIGSHARE.3189643](https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.3189643).
- Li, P., Hao, M., Hu, J., Gao, C., Zhao, G., Chan, F. et al. (2021): Spatiotemporal Patterns of Hillslope Erosion Investigated Based on Field Scouring Experiments and Terrestrial Laser Scanning. In: Remote Sensing 13 (9), 1674. DOI: [10.3390/rs13091674](https://doi.org/10.3390/rs13091674).
- Piegl, L. A., Tiller, W. (1997): The NURBS book. 2nd ed. New York: Springer (Monographs in visual communication).
- Schmid, T., Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. (2012): A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: Calculation of roughness and volume balance at a logged forest site. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI, 114–118.
- Schwarz, G. (1978): Estimating the Dimension of a Model. In: Ann. Statist. 6 (2). DOI: [10.1214/aos/1176344136](https://doi.org/10.1214/aos/1176344136).
- Steinhoff-Knopp, B., Burkhard, B. (2018): Soil erosion by water in Northern Germany: long-term monitoring results from Lower Saxony. In: CATENA 165, 299–309. DOI: [10.1016/j.catena.2018.02.017](https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.017).
- Welthungerhilfe (2022): Bodenerosion – gefährlich und unterschätzt. www.welthungerhilfe.de/informieren/themen/klimawandel/bodenerosion, letzter Zugriff 20.09.2022.
- Zhang, N., Rutherford, I. D. (2020): The effect of instream logs on river-bank erosion: Field measurements of hydraulics and erosion rates. In: Earth Surf. Process. Landforms 45 (7), 1677–1690. DOI: [10.1002/esp.4838](https://doi.org/10.1002/esp.4838).
- Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G. (2016): An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. In: Remote Sensing 8 (6), 501. DOI: [10.3390/rs8060501](https://doi.org/10.3390/rs8060501).

Kontakt

Corinna Harmening | Ramon Butzer
Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
corinna.harmening@kit.edu | ramon.butzer@student.kit.edu

Simone Ott | Bastian Steinhoff-Knopp
Institut für Physische Geographie und Landschaftsökologie, Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 50, 30167 Hannover
ott@phygeo.uni-hannover.de | steinhoff-knopp@phygeo.uni-hannover.de

Jens-André Paffenholz
Institute of Geo-Engineering, Technische Universität Clausthal
Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de

Nutzung von Laserscans zur Ableitung von Sortenbeschreibungsmerkmalen in Zuckerrüben

Jonas Bömer | Stefan Paulus | Anne-Katrin Mahlein

1 Einleitung

Die Phänotypisierung von Nutzpflanzen beschreibt die Erfassung von beobachtbaren Eigenschaften eines Genotypen unter Beeinflussung verschiedener Umweltfaktoren. Phänotypisierung ist ein wichtiger Bestandteil der zielgerichteten Pflanzenzüchtung, da sie Rückschlüsse auf ertragsrelevante Eigenschaften wie Krankheitsresistenzen, vorhandene Biomasse und weitere Wachstumsparameter zulässt (Fiorani und Schurr 2013). Durch eine gezielte, objektive und automatisierte Beobachtung dieser Eigenschaften können fundierte Entscheidungen in Züchtungsprozessen, aber auch in landwirtschaftlichen Praxisanwendungen, getroffen werden.

Sensorgestützte Phänotypisierungsverfahren, die einen hohen Durchsatz an Einzelpflanzen erlauben und nicht invasiv arbeiten, basieren aktuell fast ausschließlich auf Methoden der zweidimensionalen Bildverarbeitung. Dabei können die Bildinformationen verschiedene Bereiche des sichtbaren (VIS, RGB) und nicht sichtbaren Spektrums (UV, NIR, SWIR) wiedergeben. Durch eine Kombination der Daten mit einer statistischen Auswertung und/oder modernen Machine-Learning-Verfahren kann eine Vielzahl an Aufgabenstellungen der Phänotypisierung zuverlässig erfüllt werden. Auch komplexe Aufgaben wie die Detektion von Blattkrankheiten und die Bestimmung des Befallsgrades einer Pflanze können mit hoher Genauigkeit ausgeführt werden (Barreto et al. 2022). Bei der Aufnahme einiger Merkmale stoßen zweidimensional arbeitende Sensoren jedoch an ihre Grenzen bezüglich der Genauigkeit oder des Darstellungsvermögens eines Merkmals. Dies trifft vor allem auf die Beschreibung der geometrischen Morphologie einer Pflanze zu, für deren Erfassung immer noch teils invasive, manuelle Messverfahren oder rein visuelle Beurteilungen durch Fachkräfte notwendig sind.

Um diese Lücke zu schließen ist eine Erfassung der dreidimensionalen Struktur der Pflanzen notwendig (Paulus 2019). Die 3D-Phänotypisierung widmet sich verstärkt der Erfassung morphologischer Eigenschaften der oberirdischen Biomasse von Nutzpflanzen, also des Blattapparates und sichtbarer

Ertragsorgane. Je nach Qualität und Verdeckungsgrad des generierten 3D-Modells können unterschiedlich detaillierte morphologische und geometrische Merkmale einer Pflanze extrahiert werden. Ein Beispiel für ein grobes Merkmal ist die Höhe einer Pflanze, ein feines Merkmal stellt die Länge eines einzelnen Blattes da.

Im Fall der Zuckerrübe werden die geometrischen Eigenschaften des Blattapparates zudem in der Sortenzulassungsprüfung durch das Bundessortenamt genutzt. Dort wird die Unterscheidbarkeit, Homogenität und die Beständigkeit neuer Züchtungen analysiert, damit diese kommerziell vermarktet werden dürfen. In der Zulassungsprüfung werden Sortenmerkmale wie die Pflanzenhöhe oder die Blattlänge unter hohem Aufwand durch manuelle Messungen erhoben (Community Plant Variety Office 2018). Die Generierung von 3D-Modellen und eine anschließende automatische Erhebung von bisher erhobenen sowie neuen Merkmalen könnte zu einer feineren Unterscheidung verschiedener Züchtungen beitragen und exakte Einblicke in deren Homogenität und Beständigkeit liefern.

Zur Generierung von 3D-Modellen kommen sowohl aktive als auch passive Messverfahren zum Einsatz (Paulus 2019, Paturkar et al. 2021). Ein weit verbreitetes, passives Messverfahren ist „Structure from Motion“ (SfM). SfM-Algorithmen generieren 3D-Modelle anhand von 2D-Bilddaten (Hartley und Zisserman 2003) und wurden im Bereich der 3D-Phänotypisierung bereits erfolgreich zur Vermessung von Nutzpflanzenbeständen (Madec et al. 2017) oder auch von einzelnen Blättern (Zermas et al. 2017, Marks et al. 2022) eingesetzt. Aktive Messverfahren haben den Vorteil, dass sie die dreidimensionale Struktur des Messobjekts nicht durch Algorithmen errechnen (SfM), sondern aktiv vermessen („Time of Flight“ und „Phase-Shift“). Es gibt zahlreiche Beispiele zum erfolgreichen Einsatz von z. B. LiDAR-Sensoren zur Extraktion von phänotypischen Pflanzeigenschaften. Der Großteil dieser Studien befasst sich jedoch mit der Überwachung der Struktur von ganzen Pflanzenbeständen, beispielsweise durch Erfassung der Bestandshöhe durch den Einsatz von terrestrischem Laser-scanning (TLS) (Lumme et al. 2008, Friedli et al. 2016).

Die Nutzung von TLS-Sensoren für die 3D-Phänotypisierung ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Die Anschaffungskosten eines TLS-Sensors sind sehr hoch und die Messmethodik benötigt viel Zeit und Vorbereitung. Zudem müssen die verschiedenen Scanpositionen aufwändig miteinander verbunden bzw. registriert werden. Zusätzlich sind TLS-Sensoren für die Erfassung vertikaler Strukturen gefertigt, weshalb sie für die Aufnahme von horizontalen Strukturen wie Nutzpflanzenbeständen nur schwer verwendbar sind. Um systematische Fehler durch unterschiedliche Blickwinkel auf verschiedene Pflanzen und -bestände zu vermeiden, muss ein TLS-Sensor zum Messen mehrfach umgesetzt werden (Madec et al. 2017). Dies erhöht den Arbeitsaufwand erheblich. Nichtsdestotrotz weisen TLS-Sensoren durch ihre aktiven Messprinzipien und ihre

hohe Präzision und Punktdichte auch Eigenschaften auf, die für die 3D-Phänotypisierung wichtig sind. Zudem konnte in den letzten Jahren durch technischen Fortschritt die benötigte Zeit eines 3D-Scans deutlich reduziert werden.

In dieser Studie wurde ein moderner TLS-Sensor (Faro Focus S70) zur Generierung von hochauflösenden 3D-Modellen von acht unterschiedlichen Zuckerrüben-Genotypen in einem Gewächshausversuch verwendet. Ziel der Studie ist es diese Zuckerrüben-Genotypen anhand hochauflösender Punktwolken geometrisch zu beschreiben. Die möglichst vollständige und fehlerfreie Datenaufnahme stand hierbei im Vordergrund. Zuvor angesprochene Schwierigkeiten des TLS wurde mit einer Anpassung des etablierten Messaufbaus begegnet. Im Folgenden wurden die Einzelscans bearbeitet und zu einer Punktwolke zusammengesetzt. Anschließend wurden die Einzelpflanzen extrahiert. Anhand der Punktwolken der Einzelpflanzen wurden automatisch verschiedene Sortenmerkmale erhoben, die für die Pflanzenzüchtung von Bedeutung sind. Diese wurden final durch einen „Feature Selection“-Algorithmus im Hinblick auf ihre Aussagekraft und ihren Beitrag zur Unterscheidung der verschiedenen Zuckerrüben-Genotypen durch Machine-Learning-Verfahren bewertet.

Die Studie zeigt, dass TLS bei sorgfältiger Anwendung für die 3D-Datenerhebung in Gewächshausversuchen genutzt werden kann und welche Problemstellungen hierfür gelöst werden müssen. Sie beschreibt detailliert die Reduzierung der komplexen Datenstruktur von hochauflösenden 3D-Punktwolken von Einzelpflanzen zu interpretierbaren Datenstrukturen in Form von Sortenmerkmalen. Die essenziellen geometrischen Informationen der Punktwolke blieben dabei erhalten. Es kann gezeigt werden, dass nicht alle in dieser Studie extrahierten Merkmale für eine Klassifizierung der verschiedenen Genotypen zuträglich sind.

2 Material und Methoden

2.1 Gewächshausversuch

Die Zuckerrübenpflanzen für diesen Versuch wurden im Gewächshaus des Instituts für Zuckerrübenforschung Göttingen (N51.553654°, E009.902585°) unter kontrollierten Bedingungen angebaut. Es wurde eine konstante Tagestemperatur von 24°C und eine Beleuchtungsdauer von 16 Stunden pro Tag durch Verwendung von Natriumdampfampfen eingehalten.

Der Versuch wurde als randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt ($n = 4$) (Abb. 1). Insgesamt wurden zwölf Zuckerrüben-Genotypen getestet, von denen acht repräsentative Genotypen ausgewählt und in dieser Studie genauer untersucht werden (siehe Abb. 1, grüne Kreise). Die Genotypen wurden anhand ihrer unterschiedlich ausgeprägten Wuchsformen des Blattapparates

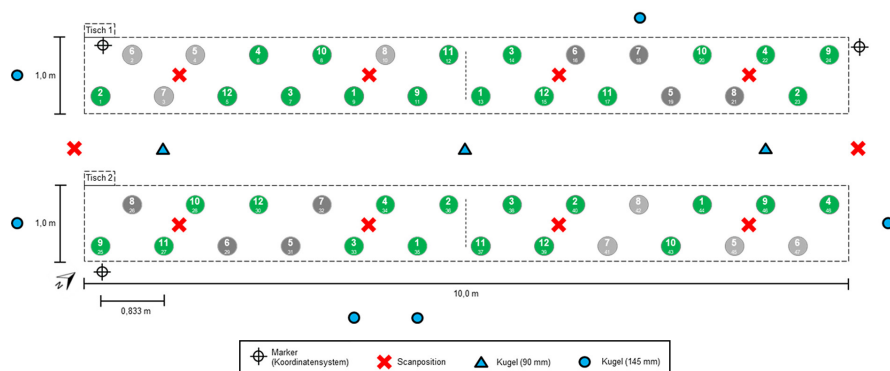


Abb. 1: Versuchsplan des Gewächshausversuchs. Die grün markierten Sorten wurden in dieser Studie untersucht. Eingezeichnet sind die drei photogrammetrischen Marker zur Transformation des Koordinatensystems, die Scanpositionen sowie die Positionen der Zielkugeln (90 und 145 mm).

für den Gewächshausversuch ausgesucht (Abb. 2 a–c). Dies soll eine möglichst große Variabilität der erhobenen geometrischen Sortenmerkmale gewährleisten. Die Pflanzen wurden am Abend vor jeder Datenaufnahme bewässert. Diese Maßnahme stellte sicher, dass die zu erhebende Sortenmerkmale wie z. B. die Pflanzenhöhe nicht durch einen unausgeglichene Wasserhaushalt beeinflusst wurden.

Zur späteren Registrierung der Einzelscans wurden insgesamt sechs Referenzkugeln mit 145 mm Durchmesser sowie drei Kugeln mit 90 mm Durchmesser im gesamten Gewächshaus in unterschiedlichen Höhen positioniert (siehe Abb. 1). Drei weitere photogrammetrische Zielmarken wurden für die Transformation der registrierten Punktwolke auf dem Boden angebracht (Nullpunkt, x-Achse, y-Achse). Somit konnte jeder Datensatz in das gleiche Koordinatensystem transformiert werden, was die automatische Extraktion der Einzelpflanzen aus der resultierenden Punktwolke vereinfachte.

2.2 Datenaufnahme

Für die Datenaufnahme wurde ein hochauflösender terrestrischer LiDAR Scanner verwendet (Focus S70, FARO Technologies Inc. (Lake Mary, USA)). Dieser hat eine Distanzgenauigkeit von ± 1 mm und einen Punktabstand von 1 mm in einer Entfernung von 10 m. Die maximale Messgeschwindigkeit liegt bei einer Millionen Punkte/Sekunde. Der Scanner misst mit einer mittleren Wellenlänge von 1550 nm. Um den gesamten Gewächshausversuch möglichst genau und mit

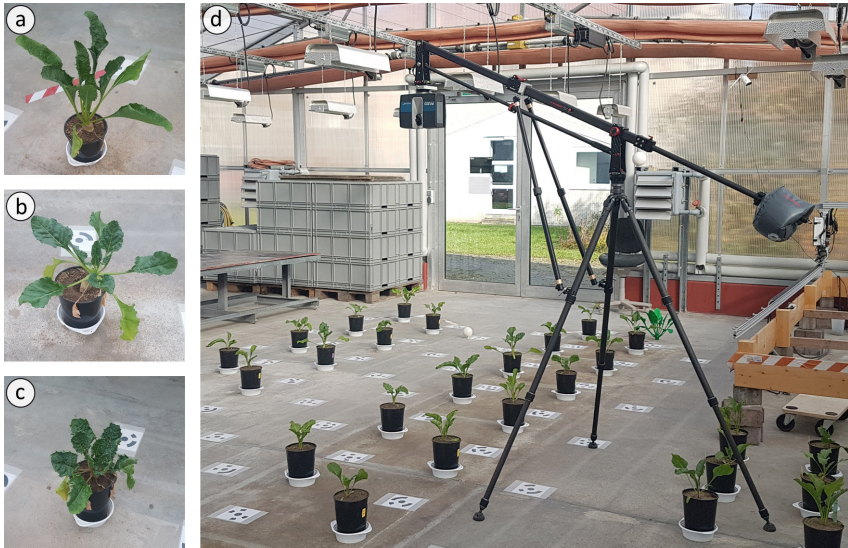


Abb. 2: Datenaufnahme im Gewächshausversuch. a)–c) zeigen unterschiedliche getestete Genotypen, d) zeigt den Messaufbau des terrestrischen Laserscanners mit Kamerakran im Gewächshausversuch.

niedrigem Verdeckungsgrad zu erfassen wurden an zehn Punkten Einzelscans durchgeführt. Der Messbereich jedes Einzelscans deckte die gesamte Versuchsfläche ab. Der Scanner wurde im Kreis versetzt, Start- und Endpunkt der Messreihe lagen demnach nebeneinander.

Der Laserscanner wurde für die Datenaufnahme kopfüber an einem Kamerakran in 2 m Höhe montiert (siehe Abb. 2d). Um Bewegungen und Vibrationen des Scanners während des Scanvorgangs zu unterbinden, wurde der Kamerakran zusätzlich versteift und durch weitere Querstreben verstärkt. Dieser Messaufbau ermöglichte einen besseren Blickwinkel in das Zentrum der Pflanzen als die herkömmliche Montage des Laserscanners auf einem Stativ, da durch die umgekehrte Montage der Nahbereich des Scanners erfasst werden kann.

Die Reduzierung der benötigten Aufnahmezeit ist bei der Aufnahme eines 3D-Modells von Zuckerrüben bzw. bei Nutzpflanzen im Allgemeinen einer der Schlüsselfaktoren zum Erhalt eines möglichst fehlerfreien Modells. Anders als in herkömmlichen Anwendungsgebieten des Vermessungswesens wie z. B. der Baubranche oder dem Anlagenbau ist eine Pflanze als Untersuchungsobjekt nicht formstabil. Sie unterliegt Umwelteinflüssen wie Wind, dem Wasserhaushalt der Pflanze, Temperatur und Sonnenstand sowie weiteren Faktoren. Im Freiland kann es durch Wind zu stark verrauschten Punktwolken kommen. Auch im Gewächshaus kann es bei einer zu langen Aufnahmezeit zur

Schichtbildung bei Blättern kommen. Das bedeutet, dass ein Blatt (oder Teile eines Blattes) mehrfach in verschiedenen Winkeln und Drehungen in der aus mehreren Einzelscans zusammengesetzten Punktwolke vorliegt. Dieser Effekt wurde ebenfalls von Wang et al. (2018) bei der Datenaufnahme im Gewächshaus beschrieben. Um eine Schichtbildung zu vermeiden, wurden die Aufnahmeparameter des verwendeten Laserscanners wie folgend angepasst.

Der Punktabstand wurde am Scanner auf die vorgegebene Einstellung von 3,1 mm in 10 m Entfernung reduziert. Durch die geringen Abmessungen der Versuchsfläche und die damit einhergehende großflächige Überlappung der Einzelscans von mehr als 90 % hat die am Ende resultierende Punktwolke durch die Überlagerungseffekte der Einzelscans einen finalen Punktabstand von < 1 mm. Die ein- oder mehrfache Messwiederholung eines Punktes und die daraus resultierende Scangenaugigkeit und Qualitätsverbesserung wurde deaktiviert. Ebenso wurde die Einfärbung der Scans durch die integrierte RGB-Kamera ausgesetzt. Durch diese Maßnahmen konnte die für einen 360°-Scan benötigte Zeit auf 4 Minuten und 11 Sekunden reduziert werden. Die Aufnahmezeit für den gesamten Versuch lag bei ca. 50 Minuten.

Der hier genutzte Datensatz umfasst fünf verschiedene Aufnahmetermine des Gewächshausversuchs. Die Pflanzen wurden im zweiwöchigen Rhythmus (36, 50, 64, 78, 92 Tage nach der Aussaat) vermessen, wodurch der Datensatz 160 Einzelpflanzenpunktwolken umfasst.

2.3 Datenaufbereitung

Für die Extraktion beschreibender Merkmale der Einzelpflanzen wurden als ersten Schritt die einzelnen 3D-Scans zu einer Punktwolke mit Hilfe der Software Faro Scene zusammengesetzt. Für diesen Zweck wurden die im Versuch verteilten Referenzkugeln mit einem Durchmesser von 145 mm bzw. 90 mm als Zielmarken verwendet. Vor der Registrierung wurden zur Verbesserung der Registrierungsgenauigkeit softwareinterne Streupunktfilter und Radiusfilter sowie ein externer Kantenartefaktfilter angewendet. Mithilfe der drei photogrammetrischen Zielmarken (Nullpunkt, x-Achse, y-Achse) wurde die registrierte Punktwolke anschließend in das Zielkoordinatensystem transformiert. Für die spätere automatische Extraktion der Einzelpflanzen wurde deren genaue Position benötigt. Diese wurde in der Form des Wachstumspunktes der Pflanzen erhoben. Dazu wurde in den Datensätzen des ersten Messdatums jeweils der Punkt ausgewählt, an dem die Pflanze die Oberfläche der Erde im Pflanztopf durchstößt.

Die durchgeführten Bearbeitungsschritte wurden mit der scannereigenen Software durchgeführt. Die weitere automatische Bearbeitung und Merkmals-

extraktion erfolgte unter Verwendung der Programmiersprache Python (Van Rossum und Drake 2009) und den Paketen Open3D (Zhou et al. 2018), NumPy (Harris et al. 2020), Matplotlib (Hunter 2007) und pandas (McKinney 2010).

Als erstes wurden die Einzelpflanzen mithilfe der Wachstumspunkte und einer Umkreissuche extrahiert. Der Boden des Gewächshauses wurde anschließend mit einem in Open3D integrierten RANSAC-Algorithmus detektiert und entfernt. Um noch vorhandene Ausreißer der Punktwolke zu entfernen, wurde diese erneut durch einen Radiusfilter und einen Filter zur Entfernung von statistischen Ausreißern bearbeitet.

Im Anschluss wurden die Punktwolken der Einzelpflanzen unter Verwendung eines cloudbasierten Labeling-Tools (<https://segments.ai/>) annotiert. Es gibt zwar bereits funktionierende Ansätze zur Instance Segmentation von 3D-Punktwolken von Nutzpflanzen (Li et al. 2022, Wang et al. 2022) und auch schon spezielle Anwendungsbeispiele für Zuckerrüben (Liu et al. 2022), jedoch sind die Implementierungen nicht frei verfügbar und funktionieren nicht fehlerfrei. Da Zuverlässigkeit und Richtigkeit des erhobenen Merkmals für die Feststellung von dessen Beitrag für die Sortenunterscheidung entscheidungsrelevant sind, wurde die Segmentierung analog zu Scholz et al. (2019) manuell durchgeführt.

Durch die Annotation konnten mit hoher Genauigkeit der Pflanztopf und restliche, vereinzelt auftretende Ausreißer selektiert und entfernt werden. Die Einzelpflanzen wurden für die Extraktion der Merkmale gespeichert.

2.4 Merkmalsextraktion

Die Berechnung der einzelnen Sortenmerkmale wurde ebenfalls in Python entwickelt. Jedes Merkmal kann vollautomatisch erhoben werden. Als Input werden in der Regel lediglich die bereinigte Punktwolke der Pflanze sowie ein manueller gesetzter Wachstumspunkt benötigt. Weitere notwendige Eingaben, wie zum Beispiel die Stufen eines in Abstufungen erhobenen Merkmals (Abb. 3 f–i), sind vordefiniert und können bei Bedarf geändert werden. Um die korrekte Funktion der Extraktion zu überwachen kann jedes Merkmal grafisch dargestellt werden.

Für die Erhebung von Merkmalen der Punktverteilung ist ein voxelbasiertes Downsampling der Punktwolke notwendig. Dieser Schritt dient der Beseitigung von ungleichmäßigen Abstraten der Pflanzenoberfläche durch den Laserscanner und daraus resultierenden Unterschieden in der Punktdichte der Punktwolke. Falls notwendig, wird dieser Schritt während der jeweiligen Merkmalerhebung durchgeführt. Für die Erhebung der Pflanzenhöhe ist dieser Bearbeitungsschritt beispielsweise nicht notwendig. Im Folgenden werden die einzelnen Merkmale sowie deren Methodik zu Erhebung genauer beschrieben.

Die *Pflanzenhöhe* (Abb. 3a) wird definiert als die Differenz über die Z-Achse des höchsten Punktes der Punktwolke und des Wachstumspunktes. Neben der maximalen Höhe wurde ebenfalls die mittlere Höhe der Pflanze berechnet. Dazu wurden die Z-Koordinaten aller Punkte gemittelt.

Die *Breite der Pflanze* (Abb. 3b) definiert sich als der maximale Abstand zweier Punkte in der XY-Ebene. Zur Berechnung dieses Merkmals wurde die konvexe Hülle der Punktwolke berechnet, da die beiden gesuchten Punkte am äußersten Rand der Punktwolke zu finden sein sollten.

Für alle in der konvexen Hülle befindlichen Punkte wurden als nächstes Paare gebildet und der Abstand der beiden Punkte in der XY-Ebene errechnet. Das vorgelagerte Berechnen der konvexen Hülle reduziert die für diesen Schritt notwendige Rechenzeit erheblich. Das Punktepaar mit dem größten Abstand definiert die Breite der Pflanze.

Die *konvexe Hülle* der Punktwolke (Abb. 3c) ist definiert als die kleinste konvexe Menge an Punkten, die alle Punkte der Punktwolke einschließt. Demnach besteht diese lediglich aus den äußersten Eckpunkten der Punktwolke. Zur Bestimmung der konvexen Hülle wurde eine Implementation des QuickHull-Algorithmus (Barber et al. 1996) benutzt, welcher auf wiederholter rekursiver Aufteilung der Punktmenge beruht, um zeitsparend zu arbeiten. Von der konvexen Hülle werden die Parameter Oberfläche und Volumen der Pflanze erhoben. Aus diesen wird zusätzlich durch Division die Dichte der Punktwolke berechnet, welche die Kompaktheit des Blattapparates wiedergeben soll.

Die *projizierte Blattfläche* der Pflanzen (Abb. 3d) beschreibt die Fläche des Schattenwurfes der Pflanze aus der Vogelperspektive. Zur Erhebung des Merkmals wird die Z-Dimension der Punktwolke eliminiert, sodass eine zweidimensionale Punktwolke entsteht. Im Anschluss wurden unter Verwendung der Alpha Shape Toolbox (Bellock 2021) die Randpunkte der 2D-Punktwolke zu einem Polygon verbunden. Von diesem wurde schließlich die Oberfläche als projizierte Blattfläche extrahiert.

Das Merkmal der *Blattanzahl* (Abb. 3e) der jeweiligen Pflanzen wurde für diese Studie unter Zuhilfenahme der schon beschriebenen, manuellen Annotation erhoben. Die jeweilige Blattanzahl konnte anschließend aus den gesetzten Labeln extrahiert werden.

Im Gegensatz zu den bisher erhobenen, einteiligen Merkmalen wurden zur detaillierteren Beschreibung der Wuchsform vier mehrstufige Merkmale erhoben. Ein neues Merkmal ist die *zirkuläre Punktverteilung in der XY-Ebene* der Punktwolke (Abb. 3f). Das Zentrum für diese Berechnung bildet der Wachstumspunkt der Pflanze, die maximale Ausdehnung der XY-Ebene wird durch den vom Zentrum am weitesten entfernten Punkt der Punktwolke bestimmt. Um einen ersten Einblick in die Bedeutsamkeit dieses Merkmals für die Sortenunterscheidung zu erhalten, wurde das Merkmal in fünf gleichgroße Intervalle,

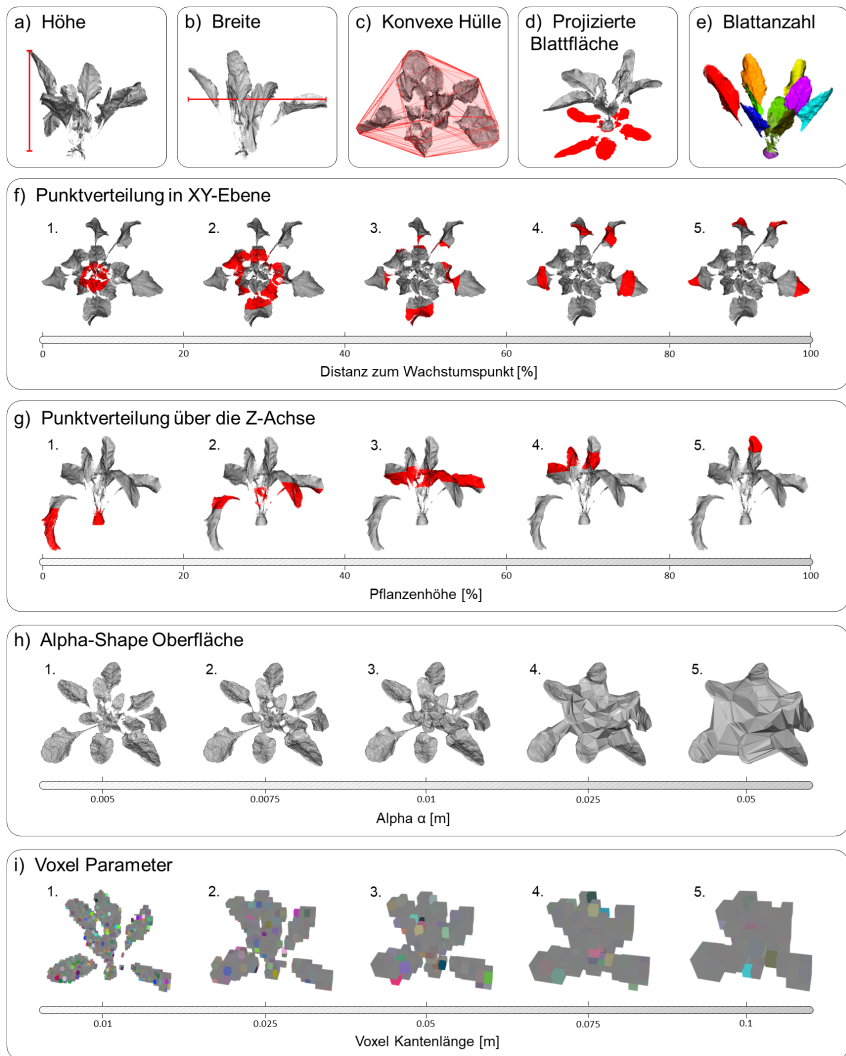


Abb. 3: Automatisch erhobene geometrische Merkmale der Punktwolke. a)–e) zeigen einteilige, f)–i) in Intervallen erhobene, mehrteilige Merkmale. Die Merkmale der Punktverteilung (f und g) werden in 20%-Intervallen erhoben (1: 0–20 %, 2: 20–40 %, 3: 40–60 %, 4: 60–80 %, 5: 80–100 %), die Merkmale h) und i) zu je unterschiedlich definierten Parametergrößen (siehe horizontale Achsen).

bzw. fünf einzelne Merkmale, eingeteilt. Jedes der Intervalle bildet demnach einen Bereich von 20 % der maximalen Ausdehnung der Punktwolke in der XY-Ebene ab (siehe Abb. 3f, 1–5).

Für die Erhebung der Merkmale muss als erstes die Intervallgröße für jede Punktwolke gesondert berechnet werden. Sie errechnet sich aus der Entfernung zwischen dem Wachstumspunkt der Pflanze und den von dort am weitesten entfernten Punkt der Punktwolke in der XY-Ebene. Für die Bestimmung dieses Punktes wird dieselbe Methodik wie bei der Bestimmung der Pflanzenbreite verwendet. Die errechnete Entfernung wird anschließend durch die Intervallanzahl (hier: fünf) geteilt. Das Ergebnis ist die Intervallgröße. Als nächstes wird die Punktwolke durch ein voxelbasiertes Downsampling des Punktabstands auf einen Punktabstand von 1 mm standardisiert. Im Anschluss kann die Z-Dimension jedes Punktes vereinheitlicht werden, was eine zweidimensionale Punktwolke zur Folge hat. Ausgehend vom Wachstumspunkt kann nun mit einer Umkreissuche die Anzahl an Punkten im jeweiligen Intervall bestimmt werden. Der Prozentsatz an Punkten des jeweiligen Intervalls errechnet sich unter Verwendung der Gesamtpunktzahl der Punktwolke. Als weiteres Merkmal wurde von jedem Intervall der Mittelwert berechnet.

Als Gegenstück zur Erhebung der Punktverteilung in der XY-Ebene wurde auch die *Punktverteilung über die Z-Achse* als mehrstufiges Merkmal in Intervallen erhoben (Abb. 3g). Die Merkmale liefern eine Aussage über die Punktverteilung über die Pflanzenhöhe. Für die Berechnung werden die Punktwolke sowie der dazugehörige Wachstumspunkt benötigt. Analog zur Punktverteilung in der XY-Ebene wurde auch die Punktverteilung über die Z-Achse in fünf Intervalle eingeteilt (je 20 % der Pflanzenhöhe, siehe Abb. 3g, 1–5).

Die Erhebung des Merkmals folgt der gleichen Methodik wie zuvor das Merkmal der Punktverteilung in der XY-Ebene. Zuerst werden die Intervalle für jede Punktwolke gesondert bestimmt. Dazu wird die Methode zur Bestimmung der Pflanzenhöhe verwendet. Deren Ergebnis wird im Anschluss durch die Anzahl an Intervallen geteilt, was die jeweilige Intervallgröße ergibt. Als nächstes wird die Punktwolke auf einen Punktabstand von 1 mm standardisiert. Anschließend kann jeder Punkt aufgrund seiner Z-Koordinate einem Intervall zugewiesen werden, für das wiederum der Prozentsatz an Punkten mithilfe der Gesamtpunktzahl der Punktwolke errechnet werden kann. Durch den Anbau der Zuckerrüben in Topfkultur im Gewächshausexperiment ist es im Gegensatz zum Freilandanbau möglich, dass sich Blätter der Pflanzen nach unten neigen, somit unterhalb des Wachstumspunktes liegen und keinem Intervall zugeordnet werden können. Da diese Blätter im Freiland auf dem Boden aufliegen würden, wurden die zugehörigen Punkte dem untersten Intervall (0–20 % der Pflanzenhöhe) zugeordnet (siehe Abb. 3g, 1). Wie auch bei der Merkmalserhebung der Punktverteilung in der XY-Ebene wurden zum Schluss die Mittelwerte der

jeweiligen Intervalle berechnet und als weitere Merkmale in die folgende Analyse aufgenommen.

Ein weiteres in Intervallen erhobenes Merkmal wurde durch die Vermaschung der Punktwolke mit unterschiedlichen Maschengrößen (Alpha-Wert) erhoben (Abb. 3h). Aus der somit generierten *Alpha-Shape* kann ein Wert für die *Oberflächengröße* der Punktwolke extrahiert werden. Der zugrunde liegende Gedanke dieses Merkmals ist die abgestufte Erfassung der Dichte des Blattapparates. Ein dichter Blattapparat wird bei gleichem Alpha-Wert im Vergleich zu einem lückenhaften Blattapparat eine geringere Oberfläche besitzen, da das generierte Netz einzelne Blattflächen zusammenfassen kann. Die passende Auswahl des Alpha-Wertes erscheint hierbei ausschlaggebend. Für diese Studie wurde das Merkmal mit fünf verschiedenen Alpha-Wert Abstufungen erhoben, die bei Betrachtung der vermaschten Punktwolke deutliche Unterschiede erkennen ließen (siehe Abb. 3h, 1–5). Zur Berechnung werden die Punktwolke sowie die frei wählbare Maschengröße benötigt, wobei ein großer Alpha-Wert ein Netz ähnlich einer konvexen Hülle generiert. Die Größe der Oberfläche kann direkt aus der vermaschten Punktwolke extrahiert werden. Eine Volumenberechnung ist auf dieser Grundlage nicht möglich, da die Oberfläche des Netzes nicht vollständig geschlossen ist.

Zuletzt wurde, ebenfalls in unterschiedlichen Abstufungen, das *Voxelgrid* der Punktwolke berechnet (Abb. 3i). Von diesem können im Anschluss das *Volumen*, die *äußere Oberfläche*, die *Kontaktfläche* der Voxel sowie die *Voxelanzahl* bestimmt werden. Ähnlich zur Erhebung der Gitternetzoberfläche haben diese Merkmale den Zweck, die Dichte der Punktwolke zu erfassen. Durch die Auswahl der Voxelgröße (Kantenlänge) können unterschiedlich auflösende Repräsentationen der ursprünglichen Punktwolke generiert werden (siehe Abb. 3i, 1–5).

Das Volumen des Voxelgrids kann durch die Berechnung des einzelnen Voxelvolumens über die Kantenlänge und einer anschließenden Multiplikation mit der Voxelanzahl bestimmt werden. Für die Berechnung der außenliegenden Oberfläche sowie der Kontaktfläche des Voxelgrids müssen zuerst für jeden Voxel über dessen Eckpunkte die Mittelpunkte aller sechs Oberflächen berechnet werden. Liegen diese vor, kann überprüft werden, wie viele Mittelpunkte einfach oder doppelt vorliegen. Die doppelt vorliegenden Mittelpunkte symbolisieren Oberflächen der Voxel, die sich berühren und daher nicht auf der Außenseite des Voxelgrids liegen können. Mit der Anzahl der einfach vorliegenden Mittelpunkte wird die außenliegende Oberfläche durch Multiplikation mit der quadrierten Kantenlänge errechnet. Analog kann die Kontaktfläche des Voxelgrids mit der Anzahl der doppelt vorliegenden Mittelpunkte berechnet werden.

Insgesamt wurden 55 Merkmale von jeder Einzelpflanzenpunktwolke erhoben.

2.5 Datenanalyse

Die erhobenen Merkmale wurden mithilfe der Pakete scikit-learn (Pedregosa et al. 2011), pandas und Boruta-Shap (Keany 2020) analysiert. Als erster Schritt der Datenanalyse wurde die Korrelation aller Merkmale untereinander berechnet. Dies diente dazu, Merkmale, welche mit einem Korrelationskoeffizienten (r^2) von 0,99 oder höher korrelieren, zu detektieren und aus dem Datensatz zu entfernen. Dadurch sollte das Problem der Multikollinearität unterbunden werden, welches mehrere negative Effekte auf die statistische Aussagekraft und Zuverlässigkeit einer Analyse hat (Yoo et al. 2014). Es wurde von jedem korrelierenden Merkmalpaar das Merkmal entfernt, welches einen höheren Aufwand bei der Erhebung darstellt. Die übrigen Merkmale wurden im Anschluss durch den Algorithmus Boruta-Shap auf ihren Beitrag zur Entscheidungsfindung eines Random-Forest Klassifikators bewertet.

Der Boruta-Shap-Algorithmus ist ein überwachter Algorithmus zur Merkmalsselektion und kombiniert den „Feature Selection“-Algorithmus Boruta (Kursa und Rudnicki 2010) mit Shapley-Werten. Dabei wird Boruta als Suchmethode bei der Merkmalsselektion verwendet, die Shapley-Werte dienen als interne Evaluierungsmethode und bilden ein Maß für den durchschnittlichen Beitrag eines Merkmals. Der Boruta-Algorithmus selektiert die Merkmale durch das Erstellen von sogenannten Schatten-Merkmalen. Dies sind zufällig vermischte Kopien der originalen Merkmale. Nach der überwachten Klassifizierung durch einen Random-Forest-Algorithmus wird der Beitrag jedes Merkmals zur Klassifizierung anhand von Shapley-Werten errechnet. Wenn der Beitrag eines Merkmals größer ist als der Beitrag seines Schatten-Merkmals wird es als wichtig angesehen. Die Anzahl an Erprobungsdurchläufen von Boruta-Shap wurde so eingestellt, dass jedes Merkmal eindeutig zuzuordnen war.

3 Ergebnisse

3.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse der einzelnen Merkmale zeigte, dass einige Merkmale eine starke lineare Beziehung ($r^2 \geq 0,99$) miteinander besitzen. Die Mittelwerte der Punktverteilung über die Z-Achse und in der XY-Ebene in den Intervallen 60–80 % und 80–100 % korrelierten jeweils mit dem Mittelwert der entsprechenden Punktverteilung im Intervall 40–60 % mit einem $r^2 = 0,99$. Die Mittelwerte der beiden höchsten Intervalle wurden für beide Punktverteilungen aus dem Datensatz entfernt.

Ebenfalls ist eine starke Korrelation der Merkmalsstufen der Alpha-Shape Oberfläche untereinander feststellbar. Die Oberflächen, welche mit einem Alpha-Wert von 0,0075, 0,01 und 0,025 (Abb. 3h, 2–4) erhoben wurden, wiesen eine perfekte positive Korrelation mit den beiden übrigen Alpha-Shape-Oberflächen (Abb. 3h, 1 und 5) auf. Entsprechend wurden sie aus dem Datensatz entfernt.

Eine weitere perfekte, positive Korrelation wurde zwischen den Merkmalen der Anzahl der Voxel im Voxelgrid und dem Volumen des Voxelgrids festgestellt. Infolgedessen wurde das Volumen des Voxelgrids von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Schlussendlich wurde auch die Anzahl an Voxel bei einer Kantenlänge von 0,01 m (Abb. 3i, 1) aufgrund der Korrelation mit der Anzahl an Voxel bei einer Kantenlänge von 0,025 m (Abb. 3i, 2) aus dem Datensatz entfernt. Durch die Korrelationsanalyse wurden zur Vermeidung von Multikollinearität insgesamt 13 Merkmale entfernt.

3.2 Boruta-Shap

Der für die Boruta-Shap-Analyse genutzte Datensatz umfasst nach der Bereinigung der Merkmale durch die Korrelationsanalyse noch 42 Merkmale. Die Ergebnisse der Analyse sind in Abb. 4 dargestellt.

Einen positiven Einfluss auf die Klassifikation der Genotypen (siehe Abb. 4, grüne Marker) haben die einfachen Merkmale Pflanzenhöhe (Höhe) sowie die mittlere Pflanzenhöhe (Höhe_MW), Pflanzenbreite (Breite), das Verhältnis von Pflanzenhöhe zu Pflanzenbreite (Verh_Höhe_Breite), die Oberfläche (Konv_Hülle_Oberfl) und das Volumen der konvexen Hülle (Konv_Hülle_Vol) sowie die Dichte der Punktwolke (Dichte), die projizierte Blattfläche (proj_Blattfl) und die Blattanzahl (Blattan) und deren Verhältnis (Verh_proj_Blattfl_Blattan). Von den in Intervallen erhobenen Merkmalen hatten bei der Punktverteilung über die Z-Achse die Prozentsätze an Punkten in den untersten (Z_Vert_20) und den obersten (Z_Vert_100) 20 % der Pflanze einen positiven Einfluss auf die Klassifikation. Gleiches gilt für die drei Mittelwerte der unteren 60 % (Z_Vert_20_MW, Z_Vert_40_MW, Z_Vert_60_MW) in dieser Achse. Ein positiver Beitrag konnte auch für die Prozentsätze der zirkulären Punktverteilung in der XY-Ebene der innersten 40 % (XY_Vert_20, XY_Vert_40) sowie zwischen 60 % und 80 % (XY_Vert_80) nachgewiesen werden. Gleiches gilt für die mittlere zirkuläre Punktverteilung im Intervall von 20 % bis 40 % (XY_Vert_40_MW) und von 40 % bis 60 % (XY_Vert_60_MW). Bei der Oberfläche des Voxelgrids hatten die Parametergrößen 0,025 (Voxel_Oberfl_025) und 0,075 (Voxel_Oberfl_075) einen positiven Einfluss auf die Klassifizierung, bei der Voxel Anzahl wurde dies für die Parametergrößen 0,025 (Voxel_Anz_025)

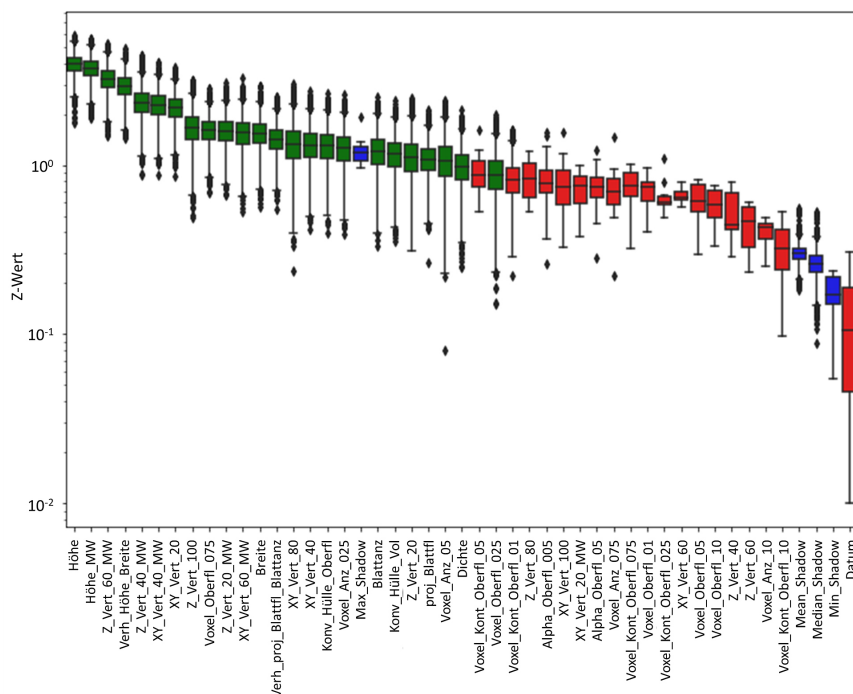


Abb. 4: Ergebnis der 3D-Merkmalss Selektion bei Zuckerrüben durch den Boruta-Shap-Algorithmus (Keany 2020). Die grünen Merkmale haben einen positiven Einfluss auf die Klassifizierung. Die roten Merkmale sind nicht förderlich oder haben einen negativen Effekt. Die blauen Werte sind Parameter der internen Schattenmerkmale des Boruta-Algorithmus.

und 0,05 (Voxel_Anz_05) nachgewiesen. Insgesamt hatten 24 Merkmale einen positiven Einfluss auf die Klassifikation der Genotypen durch einen Random-Forest-Klassifikator.

Negativen Einfluss auf die Klassifikation der Genotypen (siehe Abb. 4, rote Marker) hatten nur Parameter, welche in Intervallen erhoben wurden. Dazu gehören die Merkmale der Prozentsätze der Punktverteilung über die Z-Achse zwischen 20 % und 80 % (Z_Vert_40, Z_Vert_60, Z_Vert_80) sowie die Merkmale der Prozentsätze der zirkulären Punktverteilung in der XY-Ebene zwischen 40 % und 60 % (XY_Vert_60) und zwischen 80 % und 100 % (XY_Vert_100). Auch die mittlere zirkuläre Punktverteilung in der XY-Ebene zwischen 0 % und 20 % (XY_Vert_20_MW) hat einen negativen Effekt. Den Alpha-Shape-Oberflächen der Parameter 0,005 (Alpha_Oberfl_005) und 0,05 (Alpha_Oberfl_05) konnten ebenfalls negative Effekte nachgewiesen werden.

Da die anderen erhobenen Alpha-Shape-Merkmale von der weiteren Analyse aufgrund ihrer Korrelation mit den anderen beiden Merkmalen ausgeschlossen wurde, konnte dem gesamten Merkmal der Alpha-Shape-Oberfläche zu allen erhobenen Alpha-Werten kein positiver Einfluss auf die Klassifikation nachgewiesen werden. Für die Merkmale der Voxelgrid Oberfläche bei 0,01 m (Voxel_Oberfl_01), 0,05 m (Voxel_Oberfl_05) und 0,1 m Kantenlänge (Voxel_Oberfl_10) sowie für die Voxel Anzahl bei 0,075 m (Voxel_Anz_075) und 0,1 m Kantenlänge (Voxel_Anz_10) konnten ein negativer Effekt nachgewiesen werden. Dies gilt auch für alle Abstufungen der Kontaktoberfläche (Voxel_Kont_Oberfl_01, Voxel_Kont_Oberfl_025, Voxel_Kont_Oberfl_05, Voxel_Kont_Oberfl_075, Voxel_Kont_Oberfl_10). 18 der 42 mit dem Boruta-Shap analysierten Merkmale wiesen keinen positiven bzw. einen negativen Effekt auf die Klassifizierung der verschiedenen Genotypen auf.

4 Diskussion

4.1 Terrestrisches Laserscanning in der 3D-Phänotypisierung im Nahbereich

Für die Generierung der 3D-Modelle wurde ein terrestrischer Laserscanner genutzt, der mit einer Aufnahmegeschwindigkeit von bis zu einer Millionen Punkte/Sekunde Punktwolken generiert. Die Genauigkeit des Scanners ist mit einem maximalen Punktabstand von 1 mm in einer Entfernung von 10 m und einer Distanzgenauigkeit von ± 1 mm sehr hoch. Dadurch ist es möglich im Nahbereich (10 m) um den Scanner 3D-Modelle mit einer sehr hohen Auflösung und Präzision zu erzeugen. Diese Eigenschaften qualifizieren den verwendeten Laserscanner grundsätzlich für einen Einsatz in der 3D-Phänotypisierung.

Für den erfolgreichen Einsatz des Scanners in der 3D-Phänotypisierung von Einzelpflanzen unter kontrollierten Anbaubedingungen müssen bei der Planung des Mess- und Versuchsaufbaus die technischen Eigenschaften des Scanners beachtet werden. Dies resultiert aus der Tatsache, dass TLS-Scanner nicht für eine detaillierte Abbildung des horizontalen Nahbereichs entwickelt sind. Durch die ungleichmäßige kartesische Abtastung von TLS-Scannern verändert sich mit größer werdender Entfernung zwischen dem Scanner und dem Messobjekt der Blickwinkel auf das Messobjekt. Das kann zu systematischen Fehlern und unterschiedlichen Detailgraden von verschieden positionierten Messobjekten führen (Madec et al. 2017). Dadurch wird eine häufige Versetzung des Messaufbaus notwendig.

Zur Kompensation dieses Effekts wurden in dieser Studie zehn Einzelscans von der Versuchsfläche (20 m²) angefertigt (siehe Abb. 1). Die hohe Anzahl an

Einzelscans erzeugt durch die vielen verschiedenen Blickwinkel einen niedrigen Verdeckungsgrad und hat damit einen positiven Einfluss auf die registrierte Punktwolke. Bei der Sichtung der hier generierten 3D-Modelle fielen nur sehr vereinzelt unvollständige Blattflächen auf. Die Aufnahme mehrerer Einzelscans ist also ein grundlegend notwendiger Prozess mit positivem Einfluss auf die final generierte Punktwolke der Einzelpflanzen.

Trotzdem ist durch die komplexe geometrische Struktur von Pflanzen eine vollständige dreidimensionale Modellierung sehr anspruchsvoll. Bei Zuckerrüben bildet der Blick in Richtung Nadir die Pflanze am umfassendsten ab. Die Datenaufnahme mit einem herkömmlichen Messaufbau, bei dem ein LiDAR-Scanner waagrecht auf einem Stativ befestigt wird, ist durch den blinden Bereich unterhalb des Scanners demnach nicht ohne Modellierungsfehler durchführbar. Der in dieser Studie verwendete Scanner hat ein vertikales Sichtfeld von 300°, was bei einer Montage in 2 m Höhe einen nicht messbaren Bereich unterhalb des Scanners mit einem Durchmesser von ca. 2,3 m erzeugt. Aus diesem Grund wurde der Laserscanner, wie schon von Friedli et al. (2016), kopfüber an einem Auslegarm befestigt (siehe [Abb. 2d](#)). Dadurch konnte der Bereich unmittelbar unterhalb des Scanners erfasst werden, was einen sehr guten Blick in das Innere des Blattapparates der Zuckerrüben und somit eine vollständige Erfassung auch junger Blätter ermöglichte. Die umgedrehte Montage des Laserscanners hat allerdings den Nachteil, dass die Punktwolke im direkten Nahbereich unterhalb des Scanners stark verrauscht ist. Es treten vermehrt Kantenartefakte auf, was auf die erhöhte Abtastrate in diesem Bereich zurückzuführen ist. Das Problem lässt sich jedoch durch die Anwendung eines externen Kantenartefaktfilters lösen.

Auch die benötigte Messdauer eines Einzelscans muss an dieser Stelle kritisch beleuchtet werden. Bisher durchgeführte Studien weisen auf die lange Aufnahmezeit hin, die für einen Einzelscan benötigt wird (Paulus 2019). Eine Aufnahme mit hohen Qualitätseinstellungen erzeugt detaillierte und unverrauschte Daten, benötigt jedoch mehr Zeit (Friedli et al. 2016). Durch das häufige Umsetzen des Messaufbaus um wenige Meter können jedoch gröbere Messprofile verwendet werden, da durch die großflächige Überlagerung der Einzelscans die Punktdichte in der registrierten Punktwolke deutlich höher liegt als in den Einzelscans. Die benötigte Zeit für die Vermessung des Gewächshausversuchs konnte so auf ca. 50 Minuten reduziert werden. Insgesamt wurden dabei 48 Einzelpflanzen vermessen. Bei der hohen Qualität und dem niedrigen Verdeckungsgrad der Einzelpflanzenpunktwolken ist ein Zeitaufwand von ca. einer Minute pro Pflanze vertretbar. Durch eine Erweiterung der Versuchsfläche kann die benötigte Zeit pro Pflanze sogar noch reduziert werden. Jedoch sollte nicht vergessen werden, dass die Pflanzen sich über den gesamten Messzeitraum nicht bewegen dürfen, was durch verschiedene Umwelteinflüsse wie Temperatur oder die Sonneneinstrahlung ausgelöst werden kann.

4.2 Merkmalsselektion von 3D-Sortenmerkmalen

Zur Selektion der aussagekräftigsten Sortenmerkmale wurde der Boruta-Shap-Algorithmus von Keany (2020) verwendet. Die Selektion hat auf eine nachstehende Analyse durch Machine-Learning-Verfahren einen positiven Einfluss, da sie durch das Entfernen von aussageschwachen und verrauschten Merkmalen eine bessere Generalisierung eines Klassifikators erreichen kann. Das Entfernen von irrelevanten Merkmalen führt theoretisch nicht zu einem Informationsverlust und sollte die Genauigkeit sogar steigern können. Zusätzlich werden die Klassifikatoren durch die Reduzierung der Trainingsvariablen weniger komplex und somit schneller. Die Technik der „Feature Selection“ kann so begrenzte Einblicke in die Funktionsweise von sonst schwer zu interpretierenden Machine-Learning-Verfahren verschaffen (Keany 2020). Sie hat zudem Auswirkungen auf die Aufnahme und Prozessierung zukünftiger Datensätze, da redundante Merkmale nicht erhoben werden müssen. Der erhobene Datensatz dieser Studie durch den Boruta-Shap-Algorithmus um ca. 43 % verkleinert werden.

Die in Abb. 4 grün gekennzeichneten Merkmale haben laut der Analyse einen Mehrwert für die Klassifizierung der verschiedenen Zuckerrübengenotypen. Darunter fallen alle einfach zu erhebenden, einteiligen geometrischen Merkmale (Abb. 3a–e) wie die Pflanzenhöhe und -breite, die Parameter der konvexen Hülle, die projizierte Blattfläche und die Blattanzahl. Diese wurden bereits von Paulus (2019) beschrieben. Xiao et al. (2020) konnte zeigen, dass der einfache Strukturparameter des Volumens der konvexen Hülle mit dem ansonsten nur invasiv zu erhebenden Parameter Frischgewicht des Blattapparates stark korreliert. Dadurch werden Zeitreihenanalysen der Biomasseentwicklung von Einzelpflanzen möglich, welche wiederum in der Pflanzenzüchtung genutzt werden könnten.

Den größten Einfluss auf die Klassifizierung der Genotypen hatte das Merkmal der Pflanzenhöhe (Abb. 4). Das Ergebnis der Boruta-Shap-Analyse zeigt, dass die fünf einflussreichsten Merkmale alle in unterschiedlicher Weise die Höhe der Pflanzen beschreibt. Dieses Ergebnis zeigt den großen Einfluss dieses Parameters auf die Klassifizierung verschiedener Zuckerrübengenotypen.

Auch die gebildeten Verhältnisse von Pflanzenhöhe und -breite sowie von projizierter Blattfläche und der Blattanzahl können für die Klassifizierung genutzt werden. Im Gegensatz zu den absoluten Werten der Merkmale haben die Verhältnisse der Merkmale den Vorteil, dass sie nicht so stark vom Entwicklungsstadium der Pflanze abhängig sind. Dadurch wären spezifische Klassifizierungsalgorithmen in der Lage, die Erkenntnisse eines Datensatzes auf den Datensatz eines anderen Aufnahmedatums zu übertragen.

Das Merkmal der zirkulären Punktverteilung in der XY-Ebene ist ein in der Vergangenheit wenig beachtetes Merkmal, welches mit geringem Aufwand

erhoben werden kann. Die Punktverteilung repräsentiert stellvertretend die Verteilung der Biomasse innerhalb der Pflanze. Weiss et al. (2010) nutzten unter anderem die Beschreibung der Punktverteilung in Einzelpflanzenpunktwolken in unterschiedlichen Ebenen erfolgreich für die Klassifizierung verschiedener Pflanzenarten. Für die Klassifizierung verschiedener Zuckerrüben-Genotypen wurde das Merkmal weiterentwickelt und in mehrere Intervalle eingeteilt. Die prozentuale, zirkuläre Verteilung der Punkte in den Intervallen zwischen 0–20 % und 20–40 % der maximalen Breite der Pflanzen hat gemäß der Boruta-Shap-Analyse einen positiven Einfluss auf die Klassifizierungsgenauigkeit (Abb. 4). Es wird vermutet, dass dies unter anderem auf unterschiedliche Wachstumstypen der Genotypen zurückzuführen ist. Bei einem planophilen Wachstumstypen sind die Blattflächen, welche einen Großteil der Punkte der Punktwolke ausmachen, vermehrt horizontal angeordnet und strecken sich vom Wachstumspunkt weg. Dadurch sind prozentual im Zentrum der Pflanze weniger Punkte zu verorten als bei einem erektrophilen Wachstumstypen, bei dem die Blattflächen vermehrt senkrecht angeordnet sind. Auch das Intervall von 60–80 % ist für eine Klassifizierung von Nutzen. Dies erscheint schlüssig, da es gegensätzlich zur inneren Punktmenge die Menge an Punkten im äußeren Bereich der Pflanze widerspiegelt. Es ist vorstellbar, dass die zirkuläre Verteilung der Punkte im innersten Intervall (0–20 %) in späten ebenfalls Wachstumsstadien Aufschluss über das Vorhandensein eines sichtbaren Rübenkörpers gibt, was ebenfalls zur Sortenunterscheidung beitragen könnte. Zusammenfassend ist das Merkmal vor allem ein Maß für die unterschiedliche Verteilung der Biomasse bei verschiedenen Wachstumstypen von Zuckerrüben. Hierbei hat sich vor allem der Nahbereich um den Wachstumspunkt als aussagekräftig herausgestellt.

Das Merkmal der Alpha-Shape-Oberfläche wurden zu keiner ausgewählten Parametergröße von Boruta-Shap als nützlich eingestuft. Dies mag durch die Erhebung des Merkmals begründet sein, bei der keine wasserdichte Oberfläche entsteht. Es ist möglich, dass dieses Merkmal dadurch zu instabil in seiner Erhebung ist, um verlässliche Aussagen tätigen zu können. Es gilt jedoch diese Vermutung durch weitere Versuche mit anderen Parametergrößen zu untersuchen und die Methodik der Merkmalerhebung zu überprüfen.

5 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass TLS für die Generierung von hochauflösenden Punktwolken von einzelnen Zuckerrübenpflanzen unter kontrollierten Anbaubedingungen geeignet ist. Dies liegt maßgeblich an den technischen Eigenschaften moderner TLS-Sensoren bezüglich Aufnahmege-
schwindigkeit und -genauigkeit. Die Technik des TLS weist jedoch durch die

kartesische Abtastung des horizontalen Nahbereichs eine Eigenschaft auf, welche bei der Planung eines Mess- und Versuchsaufbaus für die 3D-Phänotypisierung besonders berücksichtigt werden muss. Bei korrekter Handhabung können Punktwolken mit niedrigem Verdeckungsgrad und sehr hoher Punktdichte generiert werden.

Des Weiteren wurden größtenteils automatische Verfahren zur Merkmalsextraktion von Zuckerrüben mit dem Ziel entwickelt, diese zur Klassifizierung unterschiedlicher Genotypen zu verwenden. Es wurden neue Merkmale vorgestellt und deren Aussagekraft mit Bezug auf eine Klassifizierung evaluiert. Durch eine „Feature Selection“ konnten aussagekräftige Merkmale identifiziert werden, wobei sich Merkmale mit Bezug zur Pflanzenhöhe als besonders aussagekräftig herausstellten.

Förderung und Projektträgerschaft

Die Förderung des Vorhabens erfolgt (bzw. erfolgte) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt (bzw. erfolgte) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.

Literatur

- Barber, C. B., Dobkin, D. P., Huhdanpaa, H. (1996): The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 22(4), 469–483.
- Barreto Alcántara, A. A., Ispizua Yamati, F. R., Varrelmann, M., Paulus, S., Mahlein, A. K. (2022): Disease incidence and severity of *Cercospora* leaf spot in sugar beet assessed by multispectral unmanned aerial images and machine learning. *Plant Disease*.
- Bellock, K. (2021): Alpha Shape Toolbox, v1.3.1. GitHub Repository. <https://github.com/bellockk/alphashape>, letzter Zugriff 12.10.2022.
- Community Plant Variety Office (CPVO) (2018): Protocol for tests in distinctness, Uniformity and stability. Sugar beet components. https://cpvo.europa.eu/sites/default/files/documents/beta_vulgaris_sugarbeet_1.2_0.pdf, letzter Zugriff 12.10.2022.
- Fiorani, F., Schurr, U. (2013): Future scenarios for plant phenotyping. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 64(1), 267–291.
- Friedli, M., Kirchgessner, N., Grieder, C., Liebisch, F., Mannale, M., Walter, A. (2016): Terrestrial 3D laser scanning to track the increase in canopy height of both monocot and dicot crop species under field conditions. *Plant Methods*, 12(1), 1–15.
- Harris, C. R., Millman, K. J., Van Der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ..., Oliphant, T. E. (2020): Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362.
- Hartley, R., Zisserman, A. (2003): Multiple view geometry in computer vision. Cambridge university press.

- Hunter, J.D. (2007): Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in science & engineering*, 9(03), 90–95.
- Keany, E. (2020): Boruta-Shap, v1.1. GitHub Repository. <https://github.com/Ekeany/Boruta-Shap>, letzter Zugriff 12.10.2022.
- Kursa, M. B; Rudnicki, W.R. (2010): Feature selection with the Boruta package. *Journal of statistical software*, 36, 1–13.
- Li, D., Shi, G., Li, J., Chen, Y., Zhang, S., Xiang, S., Jin, S. (2022): PlantNet: A dual-function point cloud segmentation network for multiple plant species. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184, 243–263.
- Liu, Y., Zhang, G., Shao, K., Xiao, S., Wang, Q., Zhu, J., ..., Ma, Y. (2022): Segmentation of Individual Leaves of Field Grown Sugar Beet Plant Based on 3D Point Cloud. *Agro-nomy*, 12(4), 893.
- Lumme, J., Karjalainen, M., Kaartinen, H., Kukko, A., Hyyppä, J., Hyyppä, H., ..., Klee-mola, J. (2008): Terrestrial laser scanning of agricultural crops. *Int. Arch. Photo-gramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 37, 563–566.
- Madec, S., Baret, F., De Solan, B., Thomas, S., Dutartre, D., Jezequel, S., ..., Comar, A. (2017): High-throughput phenotyping of plant height: comparing unmanned aerial vehicles and ground LiDAR estimates. *Frontiers in plant science*, 8, 2002.
- Marks, E., Magistri, F., Stachniss, C. (2022): Precise 3D reconstruction of plants from UAV imagery combining bundle adjustment and template matching. In 2022 Inter-national Conference on Robotics and Automation (ICRA) (2259–2265). IEEE.
- McKinney, W. (2010): Data structures for statistical computing in python. In *Proceedings of the 9th Python in Science Conference (Vol. 445, No. 1, 51–56)*.
- Paturkar, A., Sen Gupta, G., Bailey, D. (2021): Making use of 3d models for plant physio-nomic analysis: A review. *Remote Sensing*, 13(11), 2232.
- Paulus, S. (2019): Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping. *Plant Methods*, 15(1), 1–13.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ..., Du-chesnay, E. (2011): Scikit-learn: Machine learning in Python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825–2830.
- Scholz, O., Uhrmann, F., Wolff, A., Pieger, K., Penk, D. (2019): Determination of Detailed Morphological Features for Phenotyping of Sugar Beet Plants Using 3d-Stereoscopic Data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 161–166.
- Van Rossum, G., Drake, F.L. (2009): *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: Crea-teSpace.
- Wang, L., Zheng, L., Wang, M. (2022): 3D Point Cloud Instance Segmentation of Lettuce Based on PartNet. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1647–1655.
- Wang, Y., Wen, W., Wu, S., Wang, C., Yu, Z., Guo, X., Zhao, C. (2018): Maize plant pheno-typing: comparing 3D laser scanning, multi-view stereo reconstruction, and 3D digi-tizing estimates. *Remote Sensing*, 11(1), 63.
- Weiss, U., Biber, P., Laible, S., Bohlmann, K., Zell, A. (2010): Plant species classification using a 3D LIDAR sensor and machine learning. In 2010 Ninth International Confe-rence on Machine Learning and Applications, 339–345, IEEE.

- Xiao, S., Chai, H., Shao, K., Shen, M., Wang, Q., Wang, R., ..., Ma, Y. (2020): Image-based dynamic quantification of aboveground structure of sugar beet in field. *Remote Sensing*, 12(2), 269.
- Yoo, W., Mayberry, R., Bae, S., Singh, K., He, Q. P., Lillard Jr, J. W. (2014): A study of effects of multicollinearity in the multivariable analysis. *International journal of applied science and technology*, 4(5), 9.
- Zermas, D., Morellas, V., Mulla, D., Papanikolopoulos, N. (2017): Estimating the leaf area index of crops through the evaluation of 3D models. In 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 6155–6162, IEEE.
- Zhou, Q. Y., Park, J., Koltun, V. (2018): Open3D: A modern library for 3D data processing. *arXiv preprint arXiv:1801.09847*.

Kontakt

Jonas Bömer
Institut für Zuckerrübenforschung
Holtenser Landstraße 77, 37079 Göttingen
boemer@ifz-goettingen.de

Session 3:

Scanning heute und morgen

Mapping und Prozessierung mit NavVis in der Automobilindustrie

Verica Erić | Matthias Sturmfels

1 Einleitung

Industrie 4.0 ist das zentrale Thema der Zukunft für produzierende Unternehmen. Die Automobilindustrie, als die größte Branche des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland nimmt hier eine klare Vorreiterrolle ein. Die Bayerische Motoren Werke GmbH hat sich diesem Thema angenommen und setzt bei der Digitalisierung ihrer Fabriken auf Mobile-Mapping-Systeme von NavVis (BMW 2022). Seit über einem Jahr arbeitet die TPI Vermessungsgesellschaft mbH für die NavVis GmbH, um die BMW Group dabei zu unterstützen – ein Praxisbericht.

1.1 Was kann die Vermessung zur Industrie 4.0 beitragen?

Die Vermessung von ganzen Produktionswerken schafft ein dreidimensionales, digitales Abbild. Dieses Abbild ist die Grundlage für den digitalen Zwilling der Fabrik. Der digitale Zwilling hilft bei Umbauten und Simulationen. Für eine möglichst flächendeckende Aufnahme eignen sich Mobile-Mapping-Systeme besonders, da sie die nötigen geometrischen und bildlichen Informationen innerhalb kurzer Zeit, flächendeckend erfassen können. Dadurch bleibt der Eingriff in den Produktionsalltag minimal.

Die klassische Vermessung in Form von geodätischen Netzmessungen, stellt sicher, dass die Daten aus den Mobile-Mapping-Systemen an die richtige Stelle rücken. Hunderte von Kontrollpunkten im Innenbereich (in Form von Klebmarken (siehe Abb. 6), dienen als Referenz für die Datensatzausrichtung.

2 Mobile-Mapping-Systeme

2.1 Zusammensetzung und Technologie

Mobile-Mapping-Systeme (MMS) sind mobile Erfassungssysteme, die während der Bewegung kontinuierlich (Umgebungs-)daten erfassen. Das MMS besteht

grundlegend aus drei Komponenten: Mapping Sensoren, eine Positionierungs- und Navigationseinheit und eine Zeiterfassungseinheit (Punkte et al. 2013). Das MMS erfasst geometrische Umgebungsinformationen in 3D mittels Laserscanner und Kameras. Die Plattform, die das System trägt, kann fahrbar oder tragbar (siehe Abb. 1) sein.



Quelle: BMW Group

Abb. 1: Das tragbare Mobile-Mapping-System NavVis VLX im Einsatz

Die SLAM-Technologie (Simultaneous Localization And Mapping) verknüpft die aufgenommenen Daten der eingebauten Sensoren mit Hilfe von Computer-Vision-Algorithmen, um die Struktur der Umgebung zu erkennen und daraus eine Karte zu erstellen. Darüber wird eine Schätzung der Position des Systems errechnet. Wird das System bewegt, liefern die Sensoren des Systems kontinuierlich neue Daten, die genutzt werden, um in Echtzeit die Position des Systems fortzuschreiben und die erstellte Karte zu aktualisieren (siehe Abb. 2).

Laserscanner sind in der Lage Millionen von 3D-Punkten in kurzer Zeit zu erfassen. Die Intensität des zurück reflektierenden Laserstrahls kann Aufschluss über Oberflächenbeschaffenheit geben. Mit Hilfe der Kameras, können den Punkten auch RGB-Werte zugeordnet werden, sodass eine plastische, foto-ähnliche Punktwolke entsteht in navigiert und gemessen werden kann. Durch Panoramafotos lässt sich die Navigation in Viewern noch weiter vereinfachen. Die Punktwolken können mit weiterer Bearbeitung zudem in 3D-Modelle, Vermaschungen oder klassische 2D-Zeichnungen digitalisiert werden.

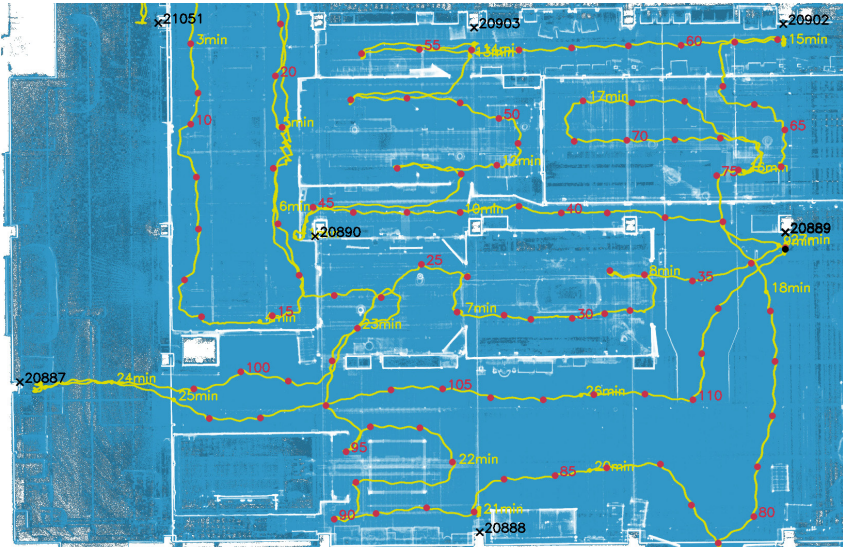


Abb. 2: Beispiel einer generierten Karte aus einem NavVis Mobile-Mapping-System. Die Trajektorie ist in Gelb dargestellt. An jedem roten Punkt wurde ein Panoramafoto aufgenommen. Schwarze Kreuze mit Nummern sind aufgenommene Kontrollpunkte.

2.2 Qualität

Genauigkeitsaussagen über Mobile-Mapping-Systeme sind schwierig, da das System mit einer Vielzahl an Sensoren und Auswertemethoden sehr komplex ist. Es gibt keinen einheitlichen Industriestandard über die Evaluierung der Genauigkeit von Mobile-Mapping-Systemen. Einen Ansatz zur Evaluierung von Mobile-Mapping-Systemen liefern Heinz et al. (2020) in ihrer eigens erstellten Einrichtung. Sie betrachten neben der Genauigkeit auch die Zuverlässigkeit der Systeme. Denn ein Datensatz innerhalb eines Gebäudes kann zu anderen Ergebnissen führen als ein Datensatz mit demselben System im Außenbereich.

Genauigkeit und Zuverlässigkeit fassen Heinz et al. (2020) unter dem Begriff Qualität zusammen. Weitere Einflussfaktoren sind die Kalibrierung der Einzelkomponenten, die Bestimmung der Positionen der Sensoren zueinander und die Zeitsynchronisation zwischen den Sensoren.

Festzuhalten ist, dass die Qualität der Punktwolken eines Mobile-Mapping-Systems durch die Vielschichtigkeit größeren Einflussfaktoren unterliegt als die eines statischen Laserscans. Daher reicht die Qualität eines Mobile-Mapping-System (noch) nicht an die eines statischen Laserscans heran. Jedoch sind Mobile-Mapping-Systeme in der Regel schneller und effizienter in der Datenauf-

nahme. Das macht den Einsatz von Mobile-Mapping-Systemen vor Allem für Großprojekte interessant, und damit auch für die Digitalisierung der Produktionsstätten der Automobilindustrie.

2.3 Vorteile und Nachteile

Die Vorteile der Mobile-Mapping-Systeme:

- Sehr schnell gegenüber statischen Scans in der Erfassung
- Wenig Abschattung durch Mobilität
- Georeferenziertes Bildmaterial auf Knopfdruck
- Innendienstbearbeitung bis zur fertigen Punktwolke geringer

Nachteile:

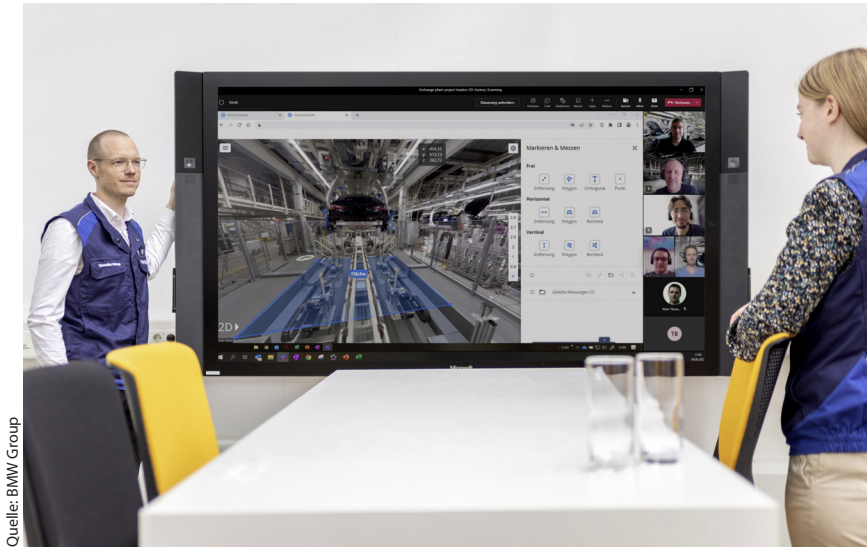
- Nicht überall einsatzfähig (beengte Verhältnisse, Steigleitern)
- Qualität ist u. a. umgebungsabhängig
- Messdistanz, Auflösung und Genauigkeit geringer als bei statischen Scans
- Messrauschen höher als bei statischen Scans

3 Mobile-Mapping in der Automobilindustrie

Die BMW Group digitalisiert seit ungefähr zwei Jahren ihre bestehenden Werke in Zusammenarbeit mit der NavVis GmbH. Voraussichtlich werden alle BMW Fahrzeugwerke weltweit bis Anfang 2023 mittels 3D-Lasercanning digitalisiert. Die erfassten 3D-Daten der Mobile-Mapping-Systeme werden genutzt, um beispielsweise Umbauten zu planen oder Prozesse digital zu simulieren. Circa 15.000 BMW-Mitarbeitende nutzen diese Daten bereits (BMW Group 2022).

3.1 BMW Factory Viewer

Die Daten werden im BMW Factory Viewer vorgehalten (siehe [Abb. 3](#)). Diese Software basiert auf NavVis IVION Enterprise, einer Cloud-basierten Plattform, um die Daten über einen Webbrowser zu prozessieren, zu bearbeiten und zu visualisieren. Dadurch, dass die Prozesse in der Cloud verarbeitet werden, können selbst große Mengen an Punktwolken durch die Auslagerung verzögerungsfrei auf jedem Endgerät dargestellt werden. Alle Produktionswerke der BMW Group weltweit sind über den Viewer für die Mitarbeiter einsehbar.



Quelle: BMW Group

Abb. 3: Der BMW Factory Viewer im Einsatz

3.2 Use cases

- Virtuelle Fabrikrundgänge
- Spezielle Punkte via Points-Of-Interests finden
- Messen direkt in der Punktwolke im Browser (siehe Abb. 4)
- Planung von Änderungen mit Hilfe eingefärbter Overlays
- Georeferenzierte (Teil-)Punktwolken für Drittsoftware herunterladen (siehe Abb. 5)

Im Zielbild der BMW Group ist verankert, alle Prozesse und das gesamte Produktionssystem digital abzubilden um vollständig virtuell planen und simulieren zu können. So können beispielsweise individuelle Kundenwünsche besser erfüllt und die Flexibilität und Qualität der Fertigungsprozesse erhöht werden. Durch die exakte Planung, die solche As-built-Daten ermöglichen, sollen zudem Ressourcen geschont und insgesamt eine höhere Qualität erreicht werden.

„Digitalisierung und innovative Technologien wirken entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Produktion. Vom Presswerk über den Karosseriebau und die Lackiererei bis hin zur Montage sowie der Logistik – jeder Schritt in der Herstellung profitiert von der Anwendung digitaler Prozesse.“ (BMW Group 2022)

Ein Beispiel in der Logistik geben Wibbing et al. (2018): Durch die Vernetzung und Kommunikation innerhalb der Smart Factory entstehen lückenlose

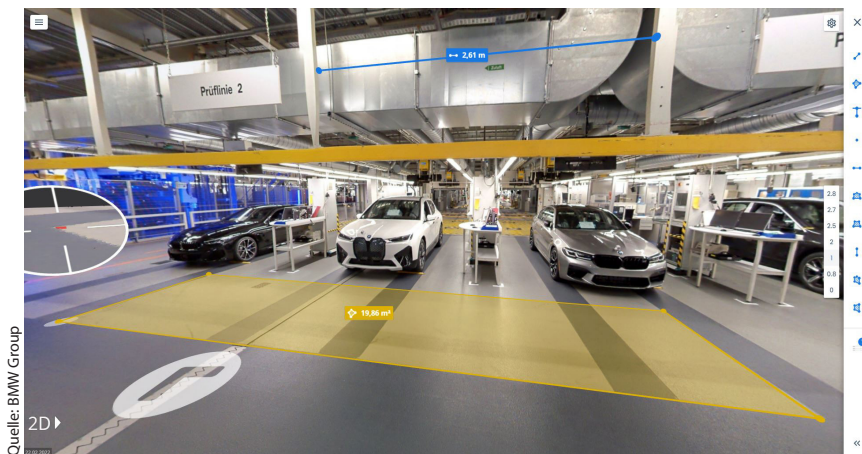


Abb. 4: Messwerkzeuge im BMW Factory Viewer

Lokalisierung von Material mittels RFID-Chip und die Erfassung von Lager-, Transport- und Bearbeitungszeiten. Diese Informationen können in Echtzeit analysiert werden und daraus Layout- und Materialflussoptimierung simuliert werden.

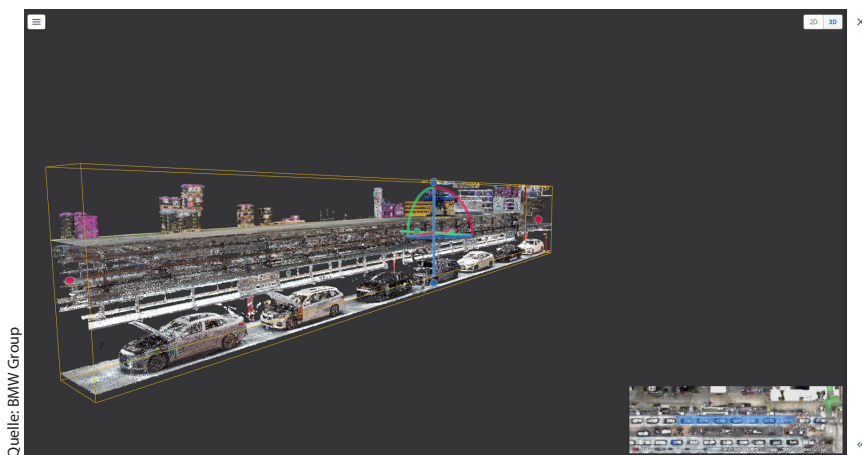


Abb. 5: Herunterladen einer Teilpunktwolke

4 Ein Bericht aus der Praxis

Seit September 2021 misst die TPI Vermessungsgesellschaft für die NavVis GmbH die Produktionsstätten der BMW Group in München und Leipzig (siehe auch [Tab. 1–3](#)).

Alle Produktions- und Logistikflächen des Werkes in Innenräumen werden gemappt, insbesondere Roboterzellen. Hinzu kommen Flächen der Infrastruktur, der Förderebenen und Technikzentralen, sowie Büro- und Aufenthaltsräume. Besondere Herausforderungen stellen Trockner, Tauchbecken, Hochregallager dar, für die teilweise statische Laserscanner zum Einsatz kamen. Überwiegend werden jedoch zwei tragbare NavVis Mobile-Mapping-Systeme VLX für die Aufnahmen genutzt. Für großflächige, ebenerdige Hallen, wird zudem der schiebbare Trolley NavVis M6 eingesetzt.

4.1 Ablauf und Prozessierung

Für das Mapping kommen Kontrollpunkte zum Einsatz (siehe [Abb. 6](#)). Die Kontrollpunkte werden zuvor mit einem Rasterabstand von circa 25 m über den gesamten Scan-Bereich verteilt. Die Kontrollpunkte werden tachymetrisch aufgenommen und an ein übergeordnetes Festpunktfeld, dem Werkskoordinatensystem angeschlossen.

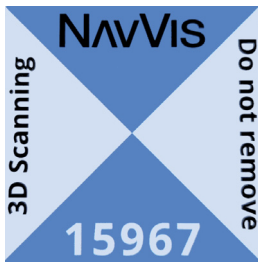


Abb. 6:

Kontrollpunkte dienen als Referenz zur Verknüpfung der Daten des Mobile-Mapping-System zu einem übergeordneten Koordinatensystem. Die Bestimmung der Koordinaten erfolgt tachymetrisch.

Beim Mapping werden die Festpunkte mit VLX taktil millimetergenau aufgenommen. In der späteren Prozessierung dienen die Kontrollpunkte als übergeordnete Referenzpunkte um die Daten zu georeferenzieren und die Trajektorie zu entzerren. Die Kontrollpunkte sind so angebracht, dass Sie dauerhaft und unverändert bestehen bleiben, um auch für spätere Re-Scans zu dienen.

Beim Einsatz in den Produktionswerken der BMW Group in München und Leipzig sind die Einsatztage ausschließlich an produktionsfreien Tagen möglich. Durch die Messung darf der tägliche Betrieb nicht gestört oder verzögert werden. Die Aufnahme von Produktionsanlagen und Roboterzellen während

des Betriebes ist ohnehin unmöglich, da diese während des Scannings betreten werden müssen um ein vollständiges Aufmaß zu erhalten. Außerdem soll möglichst wenig Verkehr auf den Aufnahmen erfasst werden und zudem würden Aufnahmen von Fahrzeug-Prototypen zu direktem Ausschluss des Scan- und Bildmaterials führen.

In a nutshell: TPI und NavVis

Tab. 1: Kurzprofile der TPI Vermessungsgesellschaft mbH und NavVis GmbH

TPI Vermessungsgesellschaft	NavVis GmbH
▪ Gegründet 2000	▪ Gegründet 2013
▪ Über 50 festangestellte Mitarbeitende	▪ über 300 Mitarbeitende
▪ Zentral im Rhein/Main-Raum	▪ Hauptsitz in München
▪ NavVis Gold Partner seit 2022	▪ 5 Standorte

Tab. 2: Datenblatt VLX 2.0 (Quelle NavVis GmbH 2022)

Datenblatt: VLX 2.0
▪ tragbar
▪ Gewicht 8,7 kg
▪ 2 × Fächer-Laserscanner, 16-lagig
▪ Reichweite 100 m
▪ 2 × 300.000 Punkte/Sekunde
▪ 20 MP Kameras mit Fisheye-Objektiven
▪ Genauigkeit der Punktwolke: 6 mm in einer dezidierten Testumgebung von 500 m ² (Konfidenzniveau: 1σ)

Tab. 3: Quick-Info über das Mapping im BMW-Werk München und Leipzig

	Werke München und Leipzig
Gemappte Fläche	Über 1.500.000 m ²
Zeitraum	Ab September 2021
Anzahl der Datensätzen	Circa 2000
Gesamtlänge der Trajektorien	Circa 700 km
TLS-Einsätze	6 Einsatztage
Durchschnittliche Laufgeschwindigkeit	1 km/h

Dem Außendienstseinsatz gehen Vorbereitungen im Innendienst voran. Als Grundlage für die Vermessung von Kontrollpunkten im Innenbereich wird ein ausgeglichenes Festpunktfeld im Außenbereich zur Verfügung gestellt. Die zu scannenden Bereiche werden in Übersichten vorab markiert. Zudem werden für jedes Werk und für jede Abteilung Ansprechpartner genannt.

Die Messeinsätze bedürfen einer genauen Planung und Abstimmung mit den Beteiligten vor Ort und den Messteams untereinander, um die produktionsfreie Zeit voll für das Mapping ausnutzen zu können. Meetings, Sicherheitseinweisungen und Klärung von Zugängen gehören zum wöchentlichen Pflichtprogramm.

Nach der Gesamtaufnahme des Werkes gilt es, bei Umbaumaßnahmen den Ist-Zustand aktuell zu halten. Dafür hat sich die BMW Group einen Re-Scan-Workflow entwickelt, um konkrete Bereiche effizient neu zu scannen, um Planungsfehler zu vermeiden und Prozesse weiter optimieren zu können. Anhand der Kontrollpunkte ist ein Re-Scan jederzeit ohne großen Aufwand möglich.

4.2 Prozessierung der aufgenommenen Daten

Die gesamte Verarbeitung der aufgenommenen Datensätze findet in NavVis IVION statt. NavVis IVION ist Cloud-basiert und kann über einen Standard-Browser erreicht werden. Die aus den Mobile-Mapping-Systemen kommende Rohdaten werden in die Cloud hochgeladen. Über die Weboberfläche werden noch die Koordinaten der Kontrollpunkte hinzugefügt und in einer Vorausgleich auf Ausreißer und Falschbenennungen geprüft.

Die Einstellmöglichkeiten der Prozessierung sind übersichtlich gehalten. Die Auflösung der Punktwolke kann angepasst werden (Minimum 5 mm Punktabstand am Objekt). Des Weiteren kann die Berechnung der Ergebnispunktwolke in drei Stufen (hohe Zuverlässigkeit, Standard, im Freien, siehe [Abb. 7](#)) der Umgebung angepasst werden.

Die Datensätze werden mit der SLAM-Technologie in Ihrer Gesamtheit erneut berechnet, unter Einbeziehung der gemessenen Kontrollpunkte und Loop Closures. Loop Closures sind Schleifenschlüsse im Laufweg eines einzelnen Datensatzes. In der Umgebung dieser Loop Closures können durch die SLAM-Technologie gleiche Strukturen in der Punktwolke herangezogen werden um die Trajektorie und damit die Ergebnispunktwolke in Position und Orientierung zu verbessern. Durch die Kontrollpunkte werden die Datensätze an Referenzkoordinaten geknüpft und an Ihnen ausgerichtet.

Außerdem werden diverse Filteralgorithmen auf die Punktwolke angewendet um beispielsweise realistischere Farbgebungen und Texturierung zu erhalten, Rauschen effektiver zu unterdrücken und Störpixel und Artefakte zu verwerfen.

NavVis VLX Einstellungen	Hohe Zuverlässigkeit	Standard	Im Freien
Enge Umgebungen / Räume / Büros	++	+	+
Weitläufige Räumlichkeiten / Lagerhäuser / Fabriken	+	++	+
Im Freien / Gebäudeumgebungen / Fassaden	-	+	++

Abb. 7: Einstellmöglichkeit bei der Prozessierung von VLX-Daten in NavVis IVION

Die Prozessierung in der Cloud findet überwiegend parallel statt. Die ungefähre Rechenzeit für die Prozessierung von beispielsweise 30 Datensätzen beträgt 8 bis 10 Stunden um georeferenzierte, eingefärbte und an den Kontrollpunkten ausgerichtete Punktwolken zu erhalten.

Anschließend werden in der IVION Oberfläche noch Gebäude und Ebenen definiert, bevor die Instanz nach abschließender Qualitätskontrolle an den Kunden übergeben wird.

5 Fazit

Mobile-Mapping-Systeme ermöglichen eine schnelle, effiziente und flächendeckende Aufnahme von Automobilproduktionsstätten. Vor allem in produzierenden Fabriken ist es wichtig, die engen Zeitfenster des Produktionsstillstands zu nutzen, um eine maximale Fläche zu digitalisieren. Der Einsatz von Kontrollpunkten erhöht die Qualität der Ergebnisse und ist für die Georeferenzierung unabdingbar. Nachhaltig angebrachte Kontrollpunkte sichern Re-Scans um den Ist-Zustand der Fabrik stets auf dem aktuellen Stand zu halten.

Die Prozessierung der Daten in der Cloud bietet einen enormen Zeitvorteil in der Aufbereitung der Daten. Die Cloud- und Webbrowser-basierte Software NavVis IVION bietet die Möglichkeit die Daten auf einfachste Weise zur Verfügung zu stellen. Das Potenzial der 3D-Daten und Panoramafotos kann somit ohne großen Aufwand beliebig zugänglich und maximal ausgeschöpft werden. Der Einsatz der NavVis Mobile-Mapping-Systeme in den Produktionswerken BMW München und Leipzig und die Verlagerung der Prozessierung über die Cloud-basierte NavVis IVION-Software zeigen, dass sie eine sinnvolle Ergänzung bei der Rolle der Vermessung als Wegbereiter für die Industrie 4.0 sind.

Literatur

- BMW Group (2022): All BMW Group vehicle plants to be digitalised using 3D laser scanning by early 2023 [Pressemeldung]. www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0400833EN/all-bmw-group-vehicle-plants-to-be-digitalised-using-3d-laser-scanning-by-early-2023, letzter Zugriff 25.10.2022.
- BMW Group 2 (2022): www.bmwgroup.com/de/innovation/unternehmen/industrie-4-0.html, letzter Zugriff 25.10.2022.
- Heinz, E., Klingbeil, L., Kuhlmann, H. (2020): Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile Mapping Systemen. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): Ingenieurvermessung 20, Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, München, Deutschland, Wichmann Verlag, Berlin, Offenbach.
- NavVis GmbH (2022): Datenblatt VLX 2.0. www.navvis.com/resources/content-library, letzter Zugriff 25.10.2022.
- Puente, I., et al (2013): Review of mobile mapping and surveying technologies. Measurement, 46(7), 2127–2145.
- Wibbing, P., Matysczok, C., Hohlweger, N., Ilcin, M. (2018): Die Auswirkungen von Industrie 4.0 auf die Digitale Fabrik. In: ProduktDatenJournal 1/2018.

Kontakt

Verica Erić | Matthias Sturmfels
TPI Vermessungsgesellschaft mbH
Otto-Hahn-Straße 46, 63303 Dreieich
verica.eric@tpi-vermessung.de | matthias.sturmfels@tpi-vermessung.de

Technologie, Innovation, Fortschritt und Einzigartigkeit anhand des Beispiels „all new BLK360“

Christoph Herbst | Gian-Philipp Patri

1 Einleitung

Der neue Leica BLK360 (Abb. 1) ist die nächste Generation des erfolgreichen Leica BLK360 G1 und löst diesen als den schnellsten, kleinsten und am einfachsten zu bedienenden Laserscanner am Markt ab. Er beschleunigt und vereinfacht Reality-Capture-Workflows signifikant und kann innerhalb von 20 Sekunden einen vollständigen Scan mit einem hochauflösenden Panoramabild aufnehmen.



Abb. 1: Der neue Leica BLK360 bildgebende Laserscanner

Dank des integrierten VIS-Systems können Position und Orientierung des Scanners in Echtzeit bestimmt werden, sodass einzelne Scan-Standpunkte vor Ort automatisch zueinander ausgerichtet und mit Hilfe der Cyclone Field360 App pre-registriert werden.

Neben der sehr einfachen Fernbedienung via den unterstützten Apps (Cyclone Field360, BLK live) kann die Datenerfassung auch intuitiv vom Scanner aus gestartet werden, ein einziger Knopfdruck ist hierfür ausreichend und eine mehrfarbige LED-Anzeige gibt Auskunft über den Fortschritt.

Die erfassten Daten können direkt und einfach von der App exportiert werden, beispielsweise im .e57 Format und in die Cloud-Plattform HxDR hoch-

geladen werden, sowie mittels USB-C-Kabel schnell in die Desktop Software Cyclone Register360 importiert werden, wo dann weitere Arbeitsschritte stattfinden können.

Gegenüber der ersten Generation konnten Gewicht (850 g inkl. Batterie) und Dimension (80 mm × 155 mm) trotz höherer Performance deutlich reduziert werden. In den folgenden Kapiteln wird ein technischer Einblick hinter das schwarze Designkleid des BLK360 gegeben und gezeigt, mit welchen innovativen Lösungsansätzen das terrestrische Laserscanning schneller und einfacher möglich wird.

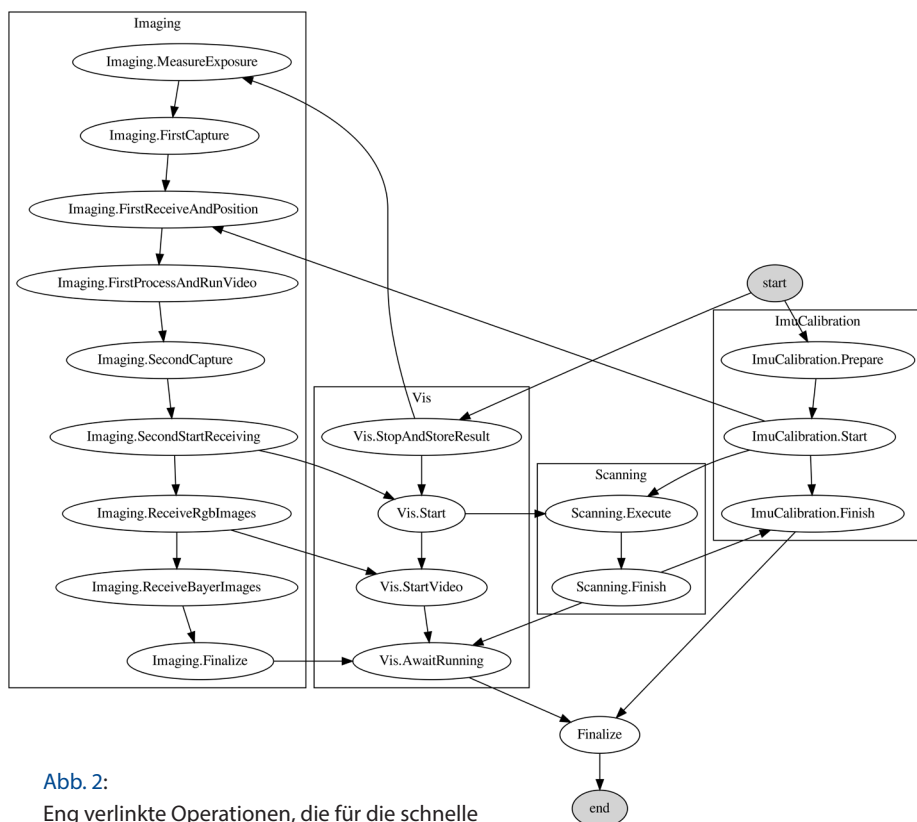


Abb. 2:

Eng verlinkte Operationen, die für die schnelle Datenerfassung durchgeführt werden.

2 20 Sekunden für eine vollständige Punktwolke und 360°-sphärisches Panoramabild

Ein zentrales Kernelement in der Entwicklung des neuen BLK360 war die schnelle Datenerfassung, bestehend aus einer vollständigen Punktwolke und einem 360°-sphärischen Panoramabild. Im schnellsten Messmodus dauert dieser Vorgang gerade einmal 20 Sekunden und ist damit um ein Fünffaches schneller als beim Vorgänger (Tab. 1).

Die für den Benutzer als sequenziell erscheinende Datenerfassung ist tatsächlich eine sehr eng getaktete Prozessierung im Inneren des BLK360 und kann in Abb. 2 schematisch eingesehen werden. Berechnungen für Scanning, Imaging und VIS sind eng miteinander verzahnt und werden oft parallel ausgeführt.

Tab. 1: Aufnahmezeiten für eine vollständigen Scan und sphärisches Panoramabild mit schnellsten Modi

Instrument	BLK360 G1	BLK360
Aufnahmezeit [min:sek]	1:40	0:20

2.1 Bilderfassung

Die neu entwickelte Prozessier- und Kalibrierungstechnologie des BLK360 liefert eine bessere Bildqualität, Datenvisualisierung und Farbgebung von Punktwolken. All dies zusammen verbessert das Bildgebungserlebnis erheblich.

Der BLK360 nimmt eine Halbkuppelaufnahme mit vier Kameras (Abb. 1) gleichzeitig auf und bewegt sich dann um 180 Grad, um die gegenüberliegende Seite mit weiteren vier Bildern aufzunehmen, wodurch das 360°-Gesamtbild schnell vervollständigt wird.

Der schnelle LDR-Modus dauert ungefähr sechs bis acht Sekunden für das 360°-Panorama und der HDR-Modus mit 5 Belichtungsstufen ungefähr 15 bis 20 Sekunden. Das Bedeutet eine im Vergleich zum ursprünglichen BLK360 G1 bis zu 7-mal schnellere Bildaufnahme (Abb. 2 und Tab. 2).

Tab. 2: Die Aufnahmezeiten ausschliesslich für die Bilderfassung der beiden BLK360

Instrument	BLK360 G1		BLK360	
Bildmodus	LDR	HDR	LDR	HDR
Aufnahmezeit [min:sek]	01:00	02:30	00:08	00:20



Abb. 3: Ein sphärisches HDR-Panoramabild mit dem neuen BLK360 (oben) und dem originalen BLK360 G1 (unten)

Das neue Konzept mit mehreren Kameras reduziert die Anzahl der Aufnahmepositionen für ein Vollpanorama von bisher zehn auf nur zwei Positionen, wodurch der Ablauf schneller ist. Trotzdem konnte auch die Bildqualität gesteigert werden. In [Abb. 3](#) ist das deutlich erkennbar.

Ermöglicht wird dies durch eine sehr aufwendige Bildverarbeitung, die für alle vier Bilder gleichzeitig durchgeführt wird. Die einzelnen Verarbeitungsschritte werden dabei auf mehrere Recheneinheiten im Scanner und dem Mobile Device verteilt ([Abb. 4](#)).

BLK360 folgt dem minimalistischen Produktdesign, welches charakteristisch für das gesamte BLK-Portfolio ist und erlaubt produktivste Datenerfassung mithilfe des einzigen Knopfs «single-button-operation». Gleichzeitig ermöglichen insbesondere die Panoramabilder einen intuitiven Zugang zur erfassten Situation, beispielsweise als erste Qualitätssicherung in anspruchsvollen Umgebungen. Diese Aufgabe übernimmt im Feld das Smartphone und/oder Tablet mit einer entsprechenden App (Cyclone Field360 oder BLK Live) ([Abb. 5](#)). Scanner und Mobil Device können daher als ein Gesamtsystem betrachtet werden.

Dies eröffnet weitere Effizienzsteigerungen, indem beispielsweise Teile der Berechnungen vom Scanner auf das Mobil Device ausgelagert werden. Da diese

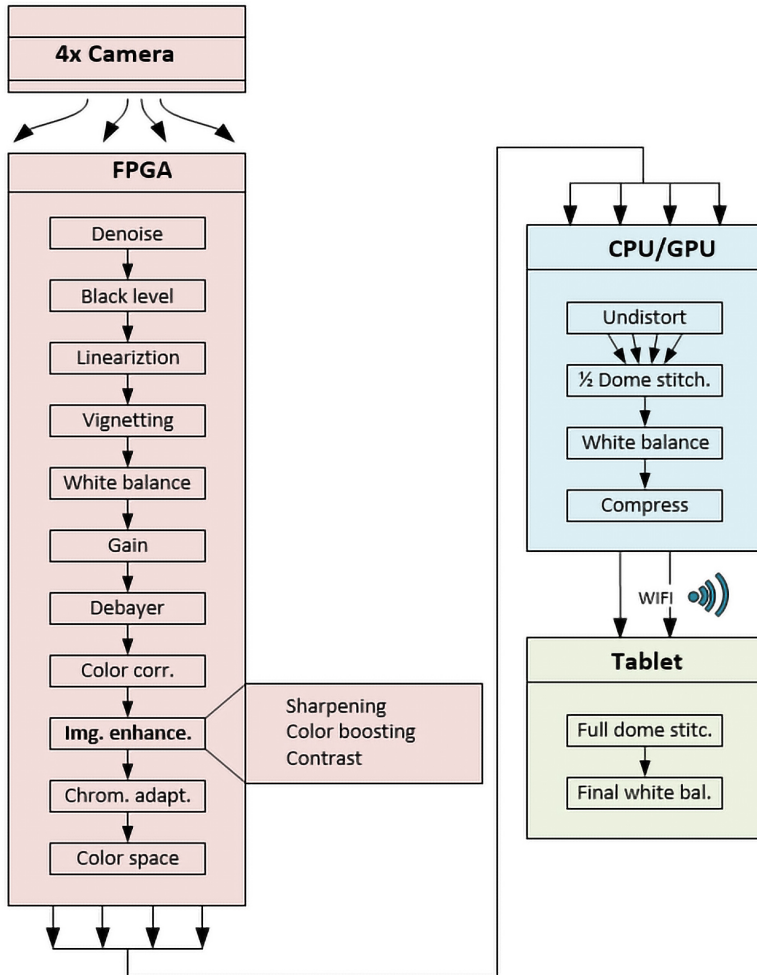


Abb. 4: Parallelverarbeitung der vier Kamerabilder mit Aufteilung der Berechnungsschritte auf verschiedene Hardwarekomponenten

Berechnungen bereits während der Datenerfassung beginnen, wird die Gesamtdauer des Workflows bis zur Darstellung des Ergebnisses im Feld deutlich reduziert. Das Gesamtsystem profitiert so auch von der schnell fortschreitenden Performancesteigerung mobiler Geräte und wird tendenziell in Zukunft schneller werden.

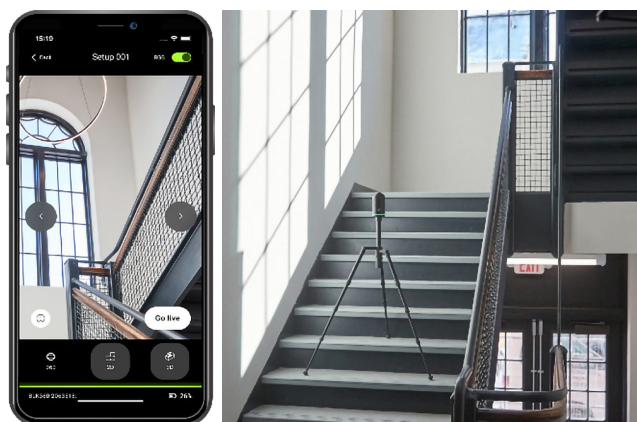


Abb. 5:

Das Smartphone mit entsprechender App ist Teil der BLK360-Gesamtlösung und visualisiert in Echtzeit das erfasste Panorama-bild.

2.2 Scanning

Die geringe Baugröße führt auch in diesem Bereich zu neuen Herausforderungen. Zwangsläufig reduziert sich mit der Größe des rotierenden Spiegels auch die Zahl der empfangenen Photonen, welche vom Messobjekt reflektiert werden. Da die Sendeleistung bei einem augensicheren Lasersystem nicht beliebig erhöht werden kann, besteht der klassische Ansatz in der Erhöhung der Verstärkung des empfangenen Signals. Dies führt jedoch auch zu größerem Messrauschen und zu einer Übersteuerung bei kurzen Distanzen und hellen Oberflächen, also zu zusätzlichen Messfehlern im Nahbereich. Beim BLK360 wird ein neuer Weg beschritten. Die interne Messfrequenz ist deutlich höher als die aufgezeichnete. Dadurch können zwei wesentliche Ansätze verfolgt werden. Zum einen wird die Laserleistung variiert, was die Auswahl der jeweils genauesten Messung für alle Entfernungen und Oberflächen ermöglicht. Andererseits werden die redundanten Messungen auch ausgewertet, um das Messergebnis zu verbessern. Insgesamt werden so die Genauigkeit und das Messrauschen gegenüber der Vorgängergeneration deutlich verbessert (Abb. 6). Analog zur Dynamikerhöhung bei

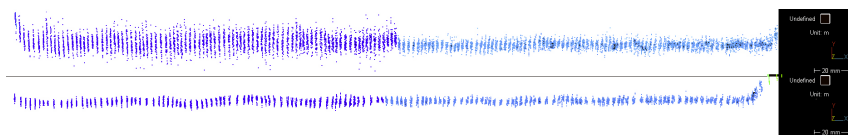


Abb. 6: Querschnitt des Scans einer sehr dunklen Oberfläche mit zwei unterschiedlichen Albedos. Oben: BLK360 G1, unten: BLK360

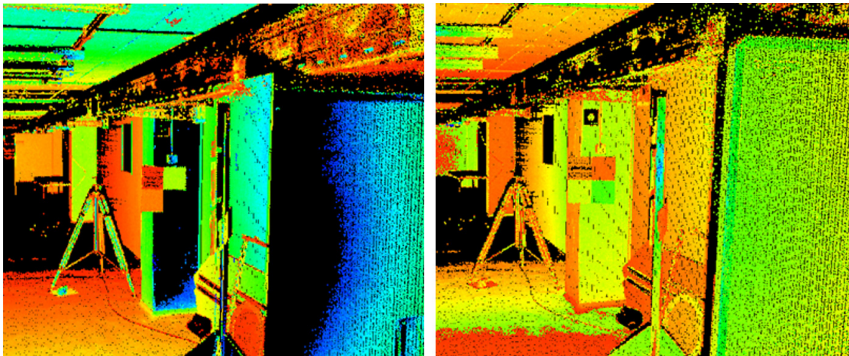


Abb. 7: Der grössere Dynamikumfang führt im rechten Scan zu mehr Messpunkten auf schwierigen Oberflächen

HDR Bildern kann dieses Scanverfahren durchaus als HDR Scanning betrachtet werden (Abb. 7).

Die hohe Scanqualität ist zutreffend für alle vier Auflösungsstufen, sodass erneut eine signifikant schnellere Datenerfassung (Tab. 3) in Kombination mit höherer Datenqualität und vollständigeren Daten erzielt werden konnte.

Damit ist der BLK360 aktuell der schnellste bildgebende terrestrische Laserscanner auf dem Markt und bietet eine drei- bis viermal schnellere Scangeschwindigkeit als sein Vorgänger.

Mit den räumlichen Daten wird auch immer die Neigung des Scanners gemessen. Bemerkenswert ist hierbei, dass bereits die Scandauer von sieben Sekunden kürzer ist als die in bisherigen Scannern immer notwendige Neigungskalibrierung. Auch in diesem Bereich wurden neue Wege beschritten. Die Sensorkalibration erfolgt nun permanent, also auch während der 3D-Datenerfassung, und verlängert daher den Workflow nicht mehr.

Tab. 3: Die Aufnahmezeiten für eine vollständigen Scan in Abhängigkeit der Punktdichte

Instrument	BLK360 G1			BLK360			
Auflösung [mm @ 10 m]	5	10	35	6	12	25	50
Aufnahmezeit [min:sek]	03:40	01:50	00:40	01:15	00:30	00:13	00:07

3 Visual Inertial System (VIS)

VIS ist eine aus dem high end Scanning bekannte patentierte Technologie, die die Vorregistrierung erfasster Daten im Feld unterstützt und die spätere voll-automatische Registrierung ermöglicht.

Dadurch wird die Zeit im Feld aber auch die Nachbearbeitung erheblich reduziert und die Produktivität weiter maximiert. 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.

Bisher wurde für die Erfassung der Bewegung ein eigenes Kamerasystem, basierend auf global shutter Kameras, benötigt. Dieser Kamertyp belichtet die Sensorfläche, ähnlich einem analogen Film, auf einmal. Dem steht der in fast allen Kameras verwendete rolling shutter-Sensor gegenüber, der zeilenweise und somit langsamer belichtet wird. Das führt bei schnellen Bewegungen zu massiven Verzerrungen der geometrischen Abbildung, weshalb dieser Sensor für ein Inertialsystem bisher ungeeignet war.

Die geringe Baugrösse des neuen BLK360 ermöglicht es nicht eigne VIS Kameras – beim Leica RTC360 sind es fünf Kameras – zu integrieren. Auch in diesem Bereich mussten daher neue, innovative Ansätze gewählt werden, um die vorhandenen Panoramakameras auch für diesen Zweck verwenden zu können. Dafür wurde das mit dem Leica RTC360 eingeführte VIS deutlich weiterentwickelt. Spezielle Algorithmen können die bei schnellen Bewegungen entstehenden Artefakte so gut kompensieren, dass auch unter schwierigen Bedingungen die erreichte Genauigkeit bei weitem ausreicht, um Punktwolken zueinander auszurichten.

Der BLK360 enthält somit das gleiche Kamerasystem zur Aufnahme von Scans (Einfärben von Punktwolken), Aufnahme von Bildern und VIS.

4 Formfaktor des neuen BLK360

Der neue BLK360 ist 20 % kleiner als sein Vorgänger. Er wiegt 850 Gramm mit Akku und ist klein und tragbar genug, um praktisch überall mitgenommen und verwendet werden zu können. Er enthält einen Akku für 60 Minuten Bild- und Scanaufnahme, Rohdatenspeicherung und einen USB-C-Anschluss für schnelle Datenübertragung. Eine wesentliche Verbesserung ist auch die geschlossene Ausführung, welche die optischen Komponenten vor Berührung und Schmutz schützt.

Der neue Formfaktor bedingt eine hohe Packungsdichte innerhalb des Gehäuses (Abb. 8). Gepaart mit der sehr hohen Performance führt dies zu großen Herausforderungen bei der Wärmeabfuhr. Erschwerend wirkt sich die matte schwarze Oberfläche und der Verzicht auf Kühlrippen aus. Des Weiteren kann der rotierende Spiegel wegen der geschlossenen Bauweise die Wärmeabfuhr nicht unterstützen.

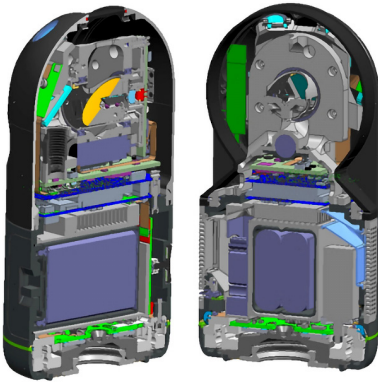


Abb. 8: Hohe Packungsdichte
im BLK360

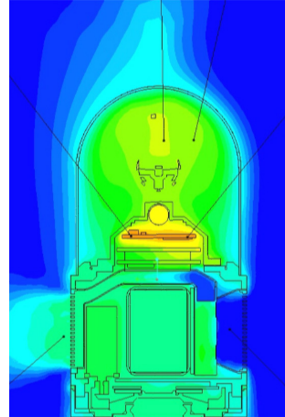


Abb. 9: Temperatur-
verteilung im Gerät

Dem Heat Management kommt daher besondere Bedeutung zu. Insbesondere gilt es das Messsystem vor schnellen Temperaturänderungen zu schützen und somit die Genauigkeit unter allen Einsatzbedingungen zu gewährleisten. In Abb. 9 ist erkennbar, wie gut die Wärmequellen in der Mitte vom weiter oben liegenden Messsystem abgeschirmt sind. Auch der für die Kühlung benötigte Luftstrom kommt nie direkt mit dem oberen Bereich in Berührung, kann also kritische Komponenten nicht verunreinigen.

5 Zusammenfassung

Mit dem neuen Leica BLK360 wurde ein hoch performanter Imaging Scanner im bisher kleinsten Formfaktor entwickelt mit gleichzeitig noch besserem Benutzererlebnis. Der neue Leica BLK360 eröffnet damit den Nicht-Vermessungsexperten die Anwendung von state-of-the-art Reality Capture Lösungen im Zuge der Digitalisierung in Bereichen wie Architektur und Baubranche, aber auch für Behörden und Institutionen für Sicherheitsaufgaben oder im Segment Media & Entertainment. Mit seiner enormen Produktivitätssteigerung bietet er

sich aber auch für professionelle Vermessungsaufgaben als ergänzendes Werkzeug an und unterstützt vollständig neue Arbeitsabläufe. Diese Anforderungen brachten jedoch in vielen technischen Bereichen große Herausforderungen mit sich, die nur durch Weiterentwicklung bekannter Lösungen und Innovationen gemeistert werden konnten. Grundlegende Themen wie z. B. VIS-Algorithmen, Kalibration, Kühlung mussten neu gedacht werden. Daneben wurde Konnektivität wesentlich erneuert und somit die stetig steigende Rechenleistung mobiler Geräte als Teil des Gesamtsystems nutzbar und zukunftssicher gemacht.

<https://leica-geosystems.com/de-at/products/laser-scanners/scanners/blk360>

Kontakt

Christoph Herbst

System Architect Reality Capture, Leica Geosystems AG

Heinrich Wild Strasse, 9435 Heerbrugg, Schweiz

christoph.herbst@leica-geosystems.com

Gian-Philipp Patri

Product Manager Reality Capture, Leica Geosystems AG

Heinrich Wild Strasse, 9435 Heerbrugg, Schweiz

gian-philipp.patri@leica-geosystems.com

Digital Flash LiDAR Punktwolken – Consumer-Produkt oder geodätische Zukunftstechnologie?

Bastian Plaß | Thomas Klauer

1 Einleitung

Die Welt der Geodäsie und Geoinformatik hat in dem aktuellen Jahrzehnt einen aktiven Wandel beobachtet. Disruptive Technologien verändern die Art und Weise, wie Vermessungen seit jeher durchgeführt werden, grundlegend. Die 3D-Punktwolke als räumliche Datenstruktur, welche Objektrepräsentationen unterschiedlichen Maßstabs und variierender Komplexität flächenhaft beschreibt, stellt dabei eine zentrale und interdisziplinäre Modalität dar. Der Markt hat verschiedene Sensoren und damit in Zusammenhang stehende Messverfahren zur 3D-Datenerfassung hervorgebracht, um dem Anwender Punktwolken bereitzustellen. Die Wahl des Verfahrens wird dabei primär von der Anwendungsdomäne definiert und bildet ein komplexes Spannungsfeld zwischen den Aspekten Kosten, Zeit, Genauigkeit und Effizienz.

Im Architektur-, Ingenieurs- und Bauwesen (engl. architecture, engineering, construction, kurz AEC) impliziert der Begriff 3D-Punktwolke in aller Regel einen hochaufgelösten Datensatz, welcher aus einem professionellen terrestrischen Laserscanning (TLS) oder Structure-from-Motion (SfM) Verfahren resultiert. Beide Verfahren erfordern kostenintensive Investitionen in Hard- und Software, ausgebildetes Fachpersonal für qualitativ hochwertige Ergebnisse und eine umfangreiche Datennachverarbeitungsroutine, wodurch der Vorteil dieser Technologie überwiegend innerhalb der Fachdomänen verbleibt.

Durch die Veröffentlichung des Apple *iPhone 12 Pro*, des Apple *iPad Pro 2020* und deren Folge Modelle mit integriertem Laserscanner steht nun erstmalig auch dem breiten Anwenderkreis eine kostengünstige 3D-Datenerfassungstechnologie zur Verfügung. Diese Verfügbarkeit motiviert dazu, die Qualität dieses Laserscan-Moduls zu untersuchen und sich mit der Fragestellung „Consumer-Produkt oder geodätische Zukunftstechnologie?“ auseinanderzusetzen.

2 Digital Flash LiDAR

Die reflektorlose und flächenhaft vollständige 3D-Erfassung einer Objektoberfläche mittels Laserimpulsen wird als Laserscanning bezeichnet (Witte und Sparla 2010). Dabei wird grundsätzlich zwischen zwei Streckenmessverfahren unterschieden, dem Phasendifferenz- und dem Impulslaufzeitverfahren (Kuhlmann und Holst 2016). Das Impulslaufzeitverfahren, im Englischen Time-of-Flight (ToF) genannt, berechnet die Messentfernung über die Laufzeitdifferenz eines ausgesandten Laserimpulses und dessen Echo.

Der in den Geräten von Apple Inc. verbaute Laserscanner stellt ein LiDAR-Modul aus der Kategorie der ToF-Verfahren dar (Niclass et al. 2020). Im Vergleich zum klassischen TLS, welches die Objektoberfläche durch einen abgelenkten und isoliert ausgewerteten Laserimpuls mittels rotierendem Spiegelpolygon abtastet, kommt Apples LiDAR-Modul ohne bewegliche Teile aus und wird folglich Digital Flash LiDAR genannt (Zhang et al. 2019). Eine weitere im Netz kursierende und nach Sicht der Autoren für das technische Funktionsprinzip passende Bezeichnung ist nicht-scannendes LiDAR.

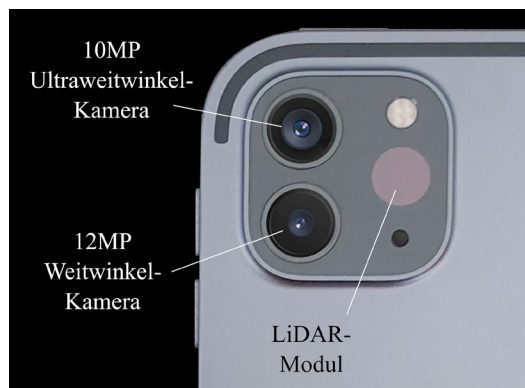


Abb. 1:
Kamera- und LiDAR-Modul
des während der Studie ge-
nutzten Apple iPad Pro 2020
(12,9", 4. Generation)

Die folgenden Abschnitte widmen sich der technischen Analyse von Apples integriertem LiDAR-Modul (siehe auch [Abb. 1](#)), welches sowohl in allen *iPhone Pro*- und *Pro Max*-Modellen beginnend ab der Serie 12 als auch in allen *iPad Pro*-Modellen seit 2020 verbaut ist und in Zusammenarbeit mit Lumentum Operations LLC und Sony produziert wird (Yoshida 2020). Nach aktuellem Kenntnisstand der Autoren und Luetzenburg et al. (2021) beinhalten *iPhones* und *iPads* dasselbe LiDAR-Modul. Die dargestellten Ergebnisse wurden mit der *3d Scanner App*¹ unter Verwendung des LiDAR-Sensors erfasst.

1 *3d Scanner App*[™] (Version 2.0.8) von Laan Consulting Corp

2.1 Direct Time-of-Flight

Spezifische Informationen zu den systemischen LiDAR-Komponenten finden sich vereinzelt in Patentschriften, einigen wenigen wissenschaftlichen Publikationen und Internetartikeln. Das 2020 veröffentlichte Patent von Niclass et al. fügt sich in die seit 2017 bestehende US-Patentreihe 15/586286 von Apple Inc. ein und beschreibt eine opto-elektrische Erfindung in direktem Zusammenhang mit LiDAR-Sensorik, die nach dem Prinzip der direkten Laufzeitmessung (engl. Direct Time-of-Flight, dToF) arbeitet.

Bei dToF wird die Oberfläche des Zielobjekts bzw. einer Zielszene aktiv durch einen optischen Lichtstrahl bestrahlt und das reflektierte Signal analysiert. dToF-Systeme bestehen aus einem Emitter und einem Rezeptor, welcher die Signallaufzeit mittels Histogramm-Analyse (Time Correlated Single Photon Counting, TCSPC) berechnet und als Tiefenkarte abspeichert, die wiederum in eine 3D-Punktwolke oder ein 3D-Mesh transformiert werden kann (Gyongy et al. 2022). Wie Apple diese Transformation löst, ist nicht bekannt. Als Emitter verbaut Apple Inc. rasterförmig angeordnete Oberflächenlaserdioden (engl. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL) von Lumentum Operations LLC, die einen Laserimpuls aus dem Nahinfrarotspektrum (NIR) mit $\lambda = 1550$ nm aussenden. Als Rezeptor dient ein rund 1" großer SPAD (engl. Single-Photon Avalanche Diode) NIR CMOS Sensor von Sony mit einer Pixelgröße von 10 μm und theoretischer Auflösung von 30.000 Pixel (Yoshida 2020). Das SPAD Array ermöglicht eine schnelle Abstandsberechnungsfolge, u. a. nach dem TCSPC-Prinzip, welches das Verfahren besonders geeignet macht für eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungsfällen in Verbindung mit Verbraucherendgeräten, wie z. B. die Erkennung von menschlichen Posen, Klassifikation von Objekten und Modellierung von Szenen. Gleichzeitig stellt die Kombination aus VCSEL und SPAD ein für mobile Endgeräte günstiges Verhältnis zwischen Sensorgöße, Produktionskosten und Leistungsaufnahme dar (Luetzenburg et al. 2021, MacKinnon 2021). Für eine vertiefende Beschreibung von dToF Systemen sei an dieser Stelle auf die Beiträge von Gyongy et al. (2022), Zhang et al. (2019) und Padmanabhan et al. (2019) verwiesen.

Das integrierte LiDAR-Modul ist durch eine Bildrate von 15 fps gekennzeichnet. Das zeigen Experimente unter Berücksichtigung des Abtasttheorems nach Nyquist und Shannon. Bei einer Wiederholungsrate von ≥ 66 fps lässt sich ein vierstufig-alternierendes Scanmuster erkennen, welches mittels Bildfolgen aus einer monochromen Kamera für das menschliche Auge sichtbar gemacht werden kann. Dessen Erzeugung und Repräsentation wird im nachstehenden Abschnitt behandelt.

2.2 Scanmuster

Die VCSEL in Apples dToF-Flash-LiDAR-System emittieren jeweils einen einzelnen NIR-Laserimpuls, welcher zur flächenhaften Bestrahlung eines Objekts ungeeignet ist. Folglich ist der Einsatz diffraktiver optischer Elemente (DOE) notwendig, die den Impuls in ein flächiges Intensitätsmuster streuen und dabei die Parameter des nativ emittierten Signals beibehalten. In Abb. 2 sind die Systemkomponenten VCSEL, SPAD NIR CMOS Sensor und DOE zu erkennen. Die DOE sind nach einer Plastiklinse kombiniert verbaut, welche den Laserimpuls kollimieren.

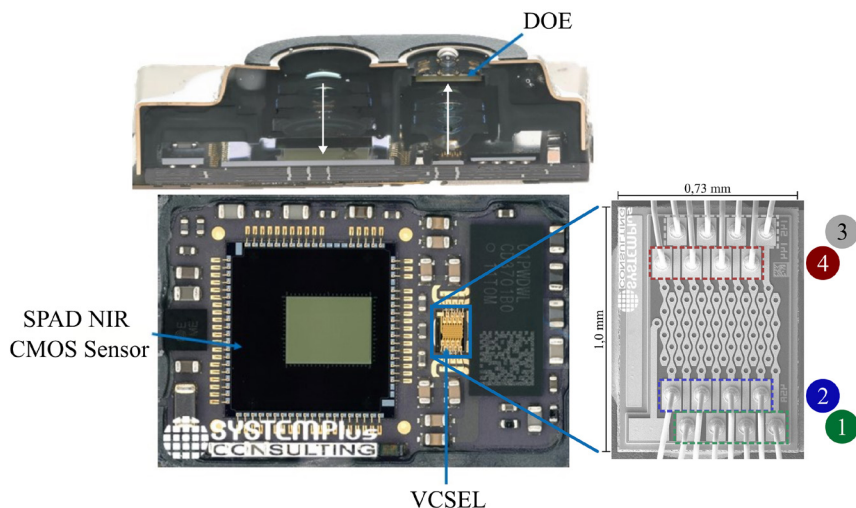


Abb. 2: Systemkomponenten des LiDAR-Moduls (Quelle: System Plus Consulting (2020), erweitert um VCSEL in vier durch Autoren markierten Strings)

Das LiDAR-Modul unterscheidet zwei Arbeitsmodi: den regulären Arbeitsmodus und den Energiesparmodus, welche jeweils unterschiedlich aufgelöste Scanmuster emittieren.

Im regulären Arbeitsmodus der Abb. 3a wird durch die Zerlegung der VCSEL-Impulse eine Punktmatrix von $9 \cdot 64 = 576$ Einzelimpulsen erzeugt, die in einem 3×3 Gitter á 8×8 Punkte angeordnet sind. Die Summe der Einzelimpulse reduzieren sich im Energiesparmodus auf $9 \cdot 16 = 144$ Punkte in identischer Gitterverteilung (vgl. Abb. 3b). Von einer Analyse der LiDAR-Scandaten aus dem Energiesparmodus wird im Rahmen dieses Beitrags abgesehen.

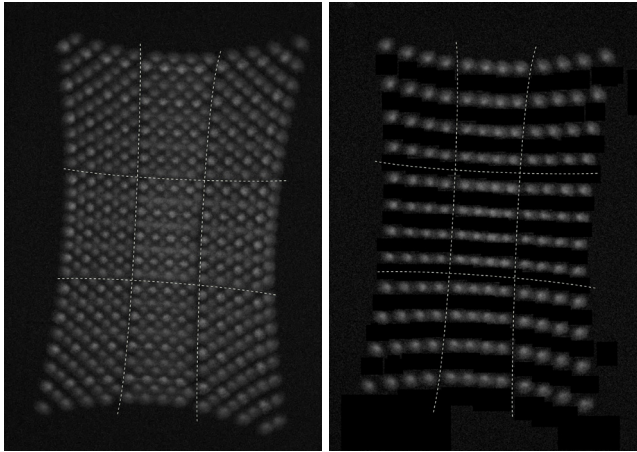


Abb. 3:
Scanmuster des Apple LiDAR-dToF-Scanners im regulären Arbeitsmodus (a) und im Energiesparmodus (b) in Portraitausrichtung, nachträglich ergänzt um Gitterquadranten durch gestrichelte Linien

(a) Regulärer Arbeitsmodus mit 8 x 8 Punkten je Gitterquadrant (b) Energiesparmodus mit 4 x 4 Punkten je Gitterquadrant

Laborversuche im regulären Arbeitsmodus mit der *UI-3370CP Rev. 2*² Industriekamera (nachfolgend uEye genannt) haben bei ≥ 66 fps darüber hinaus gezeigt, dass die Punktmatrix nicht zeitgleich, sondern alternierend in vier Gruppen projiziert wird. Diese Sequenzfolge ist farblich markiert in [Abb. 4](#) dargestellt. Die vier Projektionssequenzen alternieren dabei zeilenübersprungsweise und folgen der Anordnung der Dioden im VCSEL-Array aus [Abb. 2](#). Diese sind in vier Strings á 16 Lichtspots verschaltet, welche, mit dem Ziel das charakteristische Scanmuster auf die Objektoberfläche zu projizieren, abwechselnd aktiviert und durch die DOE gestreut werden. DOE fungieren dabei als Multiplikator von Faktor neun.

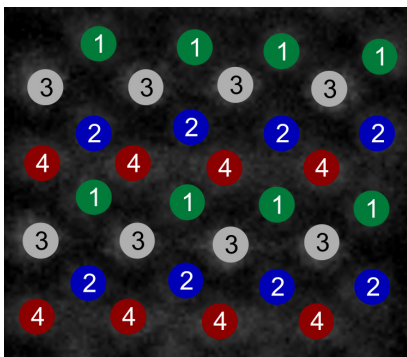


Abb. 4:
Sequenzdiagramm des alternierenden Scanmusters im regulären Arbeitsmodus aus dem mittleren Gitterquadranten, vertikal nach der Hälfte gekürzt

² UI-3370CP-NIR-GL Rev.2 von IDS Imaging Development Systems GmbH

Mit einer Summe von maximal 576 Einzelimpulsen ist der Emitter deutlich geringer aufgelöst als der Rezeptor, wodurch die theoretische Auflösung von 30.000 Pixel nicht vollumfänglich zur Berechnung der Tiefenkarte und damit Quantisierung der 3D-Punktwolke genutzt wird. Neben einem charakteristischen Scanmuster fällt in [Abb. 3](#) die geometrische Verzerrung auf, welche die Einzelimpulse zu den Rändern kissenförmig verzeichnet. Die Bestimmung der Verzeichnungsparameter von Sende- und Empfangseinheit wurde bisher nicht experimentell durchgeführt. Das Sichtfeld (engl. Field-of-View, FOV) des Moduls kann durch einen statischen Versuchsaufbau mit bekannter Messentfernung und paralleler LiDAR-Sensorausrichtung bestimmt werden. Nach eigenen Berechnungen in den projektiv entzerrten, monochromen uEye Bildaufnahmen beträgt das Sichtfeld des Apple *iPad Pro* $58^\circ \times 47^\circ$ bei einer Standardabweichung von $\pm 0,8^\circ \times \pm 0,6^\circ$. Das FOV beträgt bei einer Messentfernung von 0,25 m unter Vernachlässigung der Verzeichnungsparameter somit $27,6 \text{ cm} \times 21,9 \text{ cm}$ mit einem Punktabstand der Spots im mittleren Quadranten von $5^\circ \times 4^\circ$ respektive $0,24 \text{ cm} \times 0,18 \text{ cm}$.

3 Evaluation

Nach der systemkomponentischen Betrachtung aus Kapitel 2 werden in diesem Abschnitt die Spezifikationen des LiDAR-Moduls evaluiert. Neben der Bestimmung von Punktdichte und Spotgröße innerhalb einer statischen Versuchsanordnung wird bei einem dynamischen Feldversuch ein Messobjekt mit bekannten Dimensionen erfasst und die mittlere 3D-Punktabweichung geschätzt. Dazu wird ein rechteckiges Referenzobjekt der Größe $46,5 \text{ cm} \times 17,0 \text{ cm} \times 34,0 \text{ cm}$ (zollstockgemessen) herangezogen. Der Messbereich des dToF-Scanners liegt laut Apple Inc. zwischen 0,25 m und 5,0 m.

Die Punktdichte und Spotgröße des LiDAR-Moduls werden anhand des Scanmusters abgeleitet, welches durch die uEye beobachtet wird. Das Apple *iPad* wird dabei zentrisch in verschiedenen Abständen von 0,25 m bis 5,0 m vor einer ebenen, weißen Fläche mit den Maßen $0,30 \text{ m} \times 0,35 \text{ m}$ positioniert. Die Punktzahl wird in den monochromen Bildaufnahmen innerhalb eines Bereiches der Größe $0,15 \text{ cm} \times 0,15 \text{ cm}$ gezählt und anschließend extrapoliert. Wie in [Abb. 5a](#) dargestellt, folgt die geschätzte Punktdichte bei logarithmischer Skalierung einem linearen Trend, beginnend mit 5486 Punkten pro m^2 bei 0,25 m Messentfernung und 38 Punkten pro m^2 bei 5,0 m. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass diese Punktdichte auf einem ruhenden Erfassungsprozess basiert. Eine Anwendung im Feld führt durch die Scandynamik des Anwenders zu einer variierenden, vermutlich höheren Punktdichte.

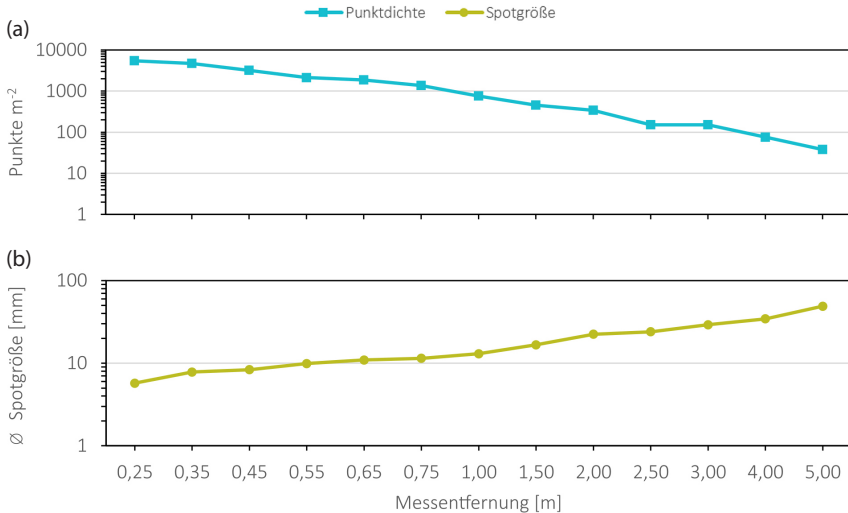


Abb. 5: Geschätzte Punktdichte pro m² (a) und Durchmesser der Spotgröße (b) über einen Messbereich von 0,25 m bis 5,0 m in logarithmischer Skalierung

Zur Bestimmung der Spotgröße wurde eine händische Ellipsenausgleichung im mittleren Quadranten des Scanmusters durchgeführt, um den Verzeichniseinfluss auszuschließen. Die Spotgröße, parametrisiert durch den Durchmesser, beträgt bei 0,25 m Messentfernung 5,7 mm und weitet sich bei 5,0 m zu 49,0 mm aus, wonach auch die Spotgröße bei logarithmischer Skalierung einen linearen Trend aufweist (siehe Abb. 5b). Zusammenfassend wird festgestellt, dass bei zunehmender Messentfernung die Spotgröße zu- und gleichzeitig die Punktdichte abnimmt.

Zur Berechnung der relativen und absoluten Punktabweichung wurde ein rechteckiges Referenzobjekt mit der *3d Scanner App* im „Point Cloud“ Modus und näherungsweise gleichem Orbit zwischen 0,5 m und 5,0 m mit einer Schrittweite von 0,5 m bzw. 1,0 m erfasst. Die einzelnen Scans benötigen dabei ein kurzes Zeitfenster, angefangen von 20 Sekunden bis maximal 1,5 Minuten bei der größten Messentfernung. Die Auswertung teilt sich in eine relative, prozentuale Ungenauigkeit, separiert nach Länge, Breite und Höhe, sowie eine absolute, mittlere 3D-Punktabweichung über den Cloud-to-Mesh (C2M) Vergleich in der Software *CloudCompare*.

Abb. 6a zeigt die relative Ungenauigkeit der Apple LiDAR-Punktwolken zu den Referenzmaßen. Eine positive Ungenauigkeit impliziert dabei eine Streckung und eine negative Ungenauigkeit eine Stauchung der über parametrische Modellierung ermittelten Objektmaße. Während die Höhenabweichung auf

einem konstanten Ungenauigkeitsniveau von ca. 10 % verbleibt, werden Objektlänge und -breite bis zu einer Messentfernung von 2,5 m systematisch gestaucht. Ab einer Messentfernung von 3,0 m folgt die Ungenauigkeit einem monoton steigenden Trend, wodurch das ursprünglich rechteckige Referenzobjekt immer mehr einem Pyramidenstumpf gleicht. Diese Ergebnisse fußen auf einer entsprechenden Streuung der LiDAR-Scanpunkte, die in Abb. 7 illustriert sind.

Zur Berechnung absoluter 3D-Punktabweichungen wird die normalverteilte C2M-Distanz herangezogen, dessen Gauß-verteilter Mittelwert inklusive Standardabweichung in Abb. 6b abgebildet ist. Bis zu einer Messentfernung von 2,5 m streut die 3D-Punktabweichung zwischen $\pm 0,8$ cm und $\pm 2,1$ cm. Mit größeren Abständen vervielfacht sich diese Streuung und weitet sich bei dem maximalen Messabstand des LiDAR-Sensors von 5,0 m auf bis zu $16,7$ cm $\pm 8,5$ cm aus. Eine vorausgegangene Studie, in welcher unterschiedliche 3D-Erfassungssensoren, darunter Apples LiDAR-Modul, für Scan-to-BIM in häuslichen Pflegeanwendungen evaluiert wurden, erzielte übereinstimmende Ergebnisse (Plaß et al. 2021). Die Grafiken aus Abb. 6 zeigen bei den Messentfernungen 2,0 m und 2,5 m eine Anomalie in der Objektbreite, welche sich von dem Ungenauigkeitstrend der Objektlänge unterscheidet, indem eine plötzliche Stauchung eintritt. Ursache hierfür kann ein Drift der Orientierungssensoren sein, welcher durch

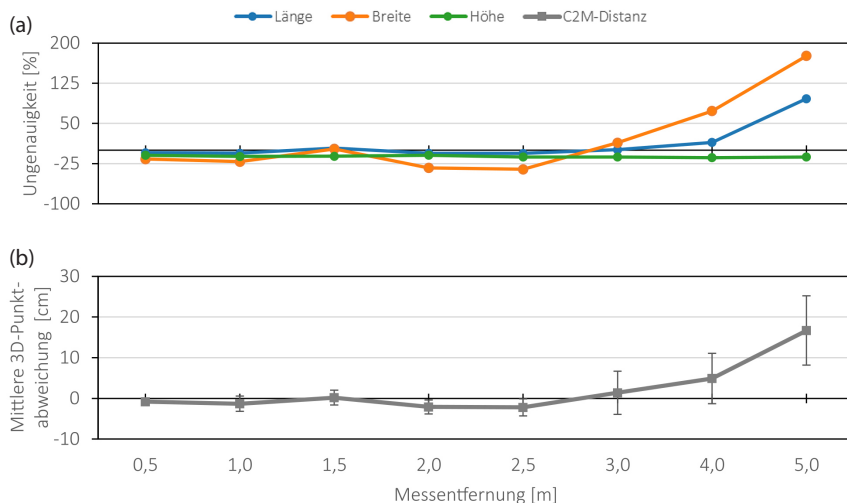


Abb. 6: Relative, prozentuale Ungenauigkeit zwischen gemessenen und wahren Werten eines rechteckigen Referenzobjekts nach Länge, Breite und Höhe (a) sowie die absolute, mittlere 3D-Punktabweichung mit Standardabweichung nach Gauß-Verteilung (b) über einen Messbereich von 0,5 m bis 5,0 m

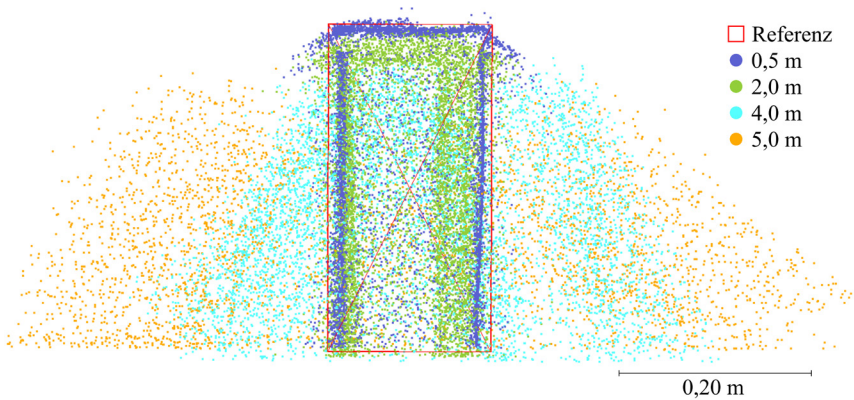


Abb. 7: Seitenansicht der kolorierter LiDAR-Punktwolken über verschiedene Messentfernungen im Vergleich zur Breite und Höhe des Referenzobjekts

überlappende Scanbereiche im Feldversuch festgestellt wird. Die erfasste Objekt Oberfläche wird dabei mit einem systematischen Versatz in der Punktwolke abgebildet. Dieses Phänomen ist in [Abb. 7](#) bei 2,0 m Messentfernung ersichtlich, indem auf der rechten Objektseite eine breitere Punktstreuung auftritt.

Abschließend wird resümiert, dass die Ungenauigkeit der LiDAR-Punktwolke mit zunehmender Messentfernung einem polynominalen Trend 2. Ordnung folgt. Ergebnisse ab einer Objektdistanz von etwa 3,5 m sind damit auch für Anwendungsfälle niedriger Genauigkeit nicht geeignet.

Die ermittelten technischen Daten des Apple LiDAR-dToF-Sensors werden zum Abschluss des Kapitels in [Tab. 1](#) gesammelt und sollen der wissenschaftlichen Community als Grundlage für zukünftige Untersuchungen dienen.

Tab. 1: Technische Daten des Apple LiDAR-dToF-Sensors

Distanzmessung	dToF	Laserklasse	1, $\lambda = 1550 \text{ nm}$
FOV	$58^\circ \times 47^\circ$	Spotgröße	$5^\circ \times 4^\circ @ 0,25 \text{ m}$
Reichweite	0,25 – 5,0 m	3D-Punktgenauigkeit	0,8 cm @ 0,5 m
Geschwindigkeit	15 fps		1,8 cm @ 1,5 m 5,3 cm @ 3,0 m

4 iOS-Applikationen

Neben der hardwareseitigen Bereitstellung des LiDAR-Moduls bietet Apple Inc. auch softwareseitig verschiedene Swift-Frameworks zur Implementierung in iOS-Applikationen (kurz App) an. Das *ARKit* (engl. Augmented Reality Kit) stellt dabei die Grundlage zur 3D-Erfassung der gescannten Zielszene durch sogenannte Ankerpunkte dar, welche als Stützpunkte für sich dynamisch zum Gerät generierende, polygonale 3D-Mesh-Datenstrukturen verstanden werden können. Laut Dokumentation wandelt *ARKit* die „[...] Tiefeninformationen in eine Vielzahl von Stützpunkten um, die sich zu einem Polygonnetz verbinden“ (Apple Inc. 2022, übersetzt durch Autoren). Eine detaillierte technische Beschreibung der Transformation bleibt der geodätischen Welt jedoch vorenthalten. *ARKit* greift während der Generierung des 3D-Meshes auch auf weitere integrierte Sensoren zu, wie z. B. das Kameramodul, den Beschleunigungssensor und das Gyroskop (zusammengefasst als Orientierungssensoren). Andere Schnittstellen, wie z. B. *SceneKit* zur Visualisierung oder *Model I/O* für Exportfunktionalitäten, komplettieren das Angebot, welches seit der Pionier-Applikation *3d Scanner App* inzwischen in diversen iOS-Applikationen implementiert und teilweise kostenlos zum Download angeboten wird.

Tab. 2: Frei verfügbare iOS-Applikationen zur 3D-Erfassung von Zielszenen

Applikation	3D-Erfassungsmethode	Datenexportformate
3d Scanner App	LiDAR, SfM	.dae, .e57, .fbx, .glb, .gltf, .las, .obj, .pcd, .ply, .pts, .stl, .usdz, .xyz, .raw*
RTAB-Map ³	LiDAR	.ply
Scaniverse ⁴	LiDAR, SfM	.fbx, .glb, .las, .obj, .ply, .stl, .usdz
Modelar ⁵	LiDAR	.csv, .e57, .obj, .ply, .stl, .usdz
Scanvas3D ⁶	LiDAR	.ply

* Schließt alle Aufnahme Dateien ein

In **Tab. 2** werden fünf aus 24 identifizierten Apps zur 3D-Erfassung von Zielszenen aufgelistet und nach Aufnahmemethode klassifiziert. Für die Selektion der Apps wurden die Parameter (a) Funktionsumfang (Scan-Modi und Datenexport-Formate), (b) Nutzbarkeit ohne Konto oder Abonnement sowie

³ RTAB-Map (Version 0.0.19) von M. Labbé

⁴ Scaniverse (Version 2.0.2) von Toolbox AI Inc.

⁵ Modelar (Version 1.7.5) von Persistent Ventures Inc.

⁶ Scanvas3D (Version 1.1) von Tycho Technologies Private Ltd.

(c) On-Premise-Datenspeicherung und -texturierung herangezogen. Die Sortierung der iOS-Apps ist an dem Funktionsumfang orientiert, beginnend mit der funktionsreichsten *3d Scanner App*. Alle Apps unterstützen eine initiale Sensorkonfiguration, welche gesamtheitlich von der Definition des Messbereiches, über die Konfidenz und Scanauflösung bis hin zu Objektmaskierung reicht. Davon werden je App verschiedene Parameter implementiert. Der Scanfortschritt wird in allen fünf Apps ähnlich grafisch unterstützt, wodurch die 3D-Erfassung intuitiv und niederschwellig erfolgt. Eine Auswertung von Scanschleifen erfolgt nach bestem Wissen der Autoren ausschließlich in „RTAB-Map“, entwickelt für robotische Anwendungsszenarien am 3IT in Kanada.

Die *3d Scanner App*, welche für die Experimente dieses Beitrags genutzt wird, empfiehlt die Vermeidung von Scanschleifen – was in dieser Form gegen geodätische Grundsätze spricht. In [Abb. 7](#) kann bei einer Messentfernung von 2,0 m der Punktwolkenversatz entlang einer Objektseite beobachtet werden, vermutlich als Folge einer Scanschleife mit nicht-korrigiertem Drift der Orientierungssensoren. Durch die intuitive Menüführung und das umfangreiche Funktionspektrum kam diese App sowohl in vorangegangene Studien als auch Beiträge zum Einsatz. Darüber hinaus diente sie als Vorbild für eine Eigenentwicklung im Rahmen des Forschungsprojektes bim4cAIre⁷, welches als Anwendungsfall im nächsten Kapitel beleuchtet wird.

5 Smarte Wohnraumanalysen für E-Health-Anwendungen

Vor dem Hintergrund einer sich zuspitzenden Wohnraumsituationen, Versorgungsengpässen und Ressourcenknappheit im betreuenden Gesundheitswesen, sehen sich breite Teile der älteren Gesellschaft mit wachsenden Herausforderungen konfrontiert. Antworten wie betreutes Wohnen oder Pflegeheime stehen dabei in erster Instanz dem Wunsch nach einem selbstbestimmten Leben in den eigenen vier Wänden entgegen, wodurch der Ruf nach personalisierten Lösungen für das Leben und Wohnen im Alter lauter wird.

Die Identifikation und Entwicklung innovativer E-Health-Anwendungen für ein zukunftsfähiges, smartes Wohnen im Alter untersucht das Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) der Hochschule Mainz in Kooperation mit dem Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen (iib) der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen des Forschungsprojekts bim4cAIre.

Begleitet durch die Fragestellung, wie Barrieren in der eigenen Wohnung erkannt werden können, ohne gleichzeitig die Selbstbestimmtheit und Privat-

7 [bim4cAIre](#) – Shaping the future of care with the digital twin, Forschungsprojekt am i3mainz

sphäre der dort lebenden Person einzuschränken, werden verschiedene Bemühungen unternommen, innovative Verfahren zur Datenerfassung mit flexiblen Lösungen zur Datenanalyse zu kombinieren. Daraus resultiert das Ziel eine holistische, zweistufige Software-Anwendung zu entwickeln, welche sowohl in Akutsituationen als auch präventiv einsetzbar ist. Zwecks Skalierbarkeit wird eine Lösung angestrebt, die (a) nicht von AEC-Fachpersonal abhängig ist, (b) auf verfügbaren, technischen Endgeräten aufbaut, welche (c) von der Zielgruppe beherrscht und gleichzeitig akzeptiert werden und (d) den Genauigkeitsanforderungen der anwendungsgetriebenen Nutzung entsprechen. Letztere orientieren sich an den Kriterien der DIN 18040-2 für die barrierefreie und rollstuhlgerechte Gestaltung von gebautes Wohnraum. Abb. 8 zeigt das Zusammenspiel der Komponenten im Überblick.

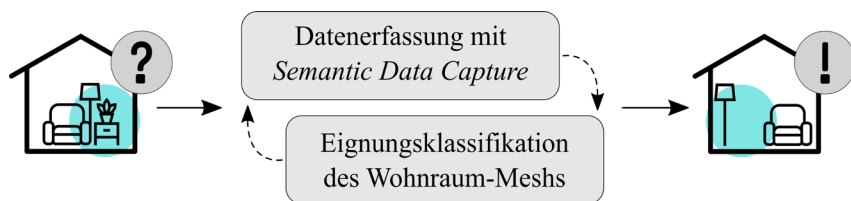
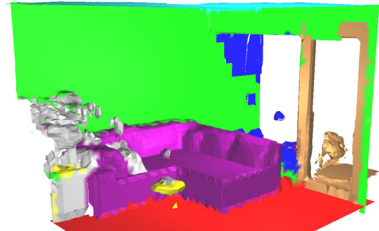
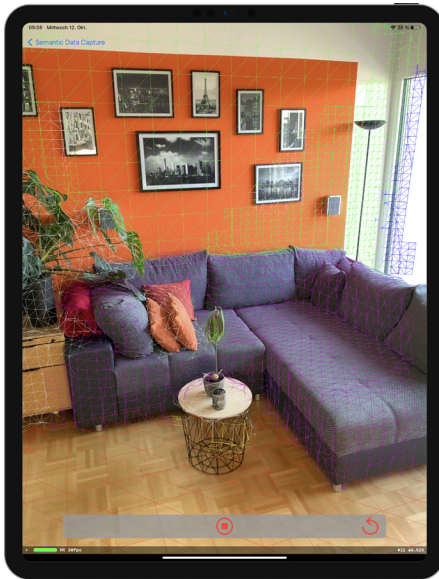


Abb. 8: Zusammenspiel der Komponenten zur smarten Wohnraumanalyse als E-Health-Anwendung

Die folgenden zwei Abschnitte adressieren die zusammenhängenden Komponenten der angestrebten Software-Anwendung zur smarten Wohnraumanalyse, wobei Abschnitt 5.1 die 3D-Datenerfassung durch eine iOS-basierte Eigenentwicklung und Abschnitt 5.2 die darauf aufsetzende Wohnraum-Eignungsklassifikation beschreibt.

5.1 iOS-Prototyp *Semantic Data Capture*

Die Integration des LiDAR-Moduls in Apples *iPhone Pro* und *iPad Pro* eröffnet seit 2020 erstmalig die Möglichkeit der schnellen 3D-Erfassung auf einem mobilen Endgerät. Dabei tritt der in Kapitel 2 beschriebene dToF-LiDAR nicht in Konkurrenz zu mobilen Handscannern renommierter Hersteller aus der Geodäsie, welche einem Downsizing-Trend zu folgen scheinen und im Zuge dessen immer handlichere Geräte auf den Markt bringen. Eine vorangegangene Studie von 2021 untersucht einen breit aufgefächerten Sensorzoo und kommt zu der Erkenntnis, dass das LiDAR-Modul von Apple Inc. vor den Genauigkeitsanforderungen der angestrebten E-Health-Anwendung ausreichend genaue 3D-Daten von Innenräumlichkeiten erzeugt (Platz et al. 2021).



(a) Semantic Data Capture



(b) 3d Scanner App

Abb. 9: Benutzeroberfläche während eines Scanprozesses von Semantic Data Capture (links) sowie die 3D-Meshes beider Apps (rechts)

Um die Prozesskette so effizient wie möglich zu gestalten, wurde eine eigene iOS-App namens *Semantic Data Capture*⁸ entwickelt, welche das in Kapitel 3 evaluierte LiDAR-Modul nutzt und ein semantisch segmentiertes 3D-Mesh als Ergebnis vorhält. Wie in Klauer und Plaß (2021) beschrieben, erfolgt die 3D-Datenerfassung und -klassifizierung simultan während des Scanvorgangs auf dem Endgerät. In Abb. 9 kann ein Eindruck vom Scanprozess und dem resultierenden, semantisch segmentierten 3D-Datensatz gewonnen werden, welche zu Vergleichszwecken dem Ergebnis aus der *3d Scanner App* gegenübergestellt ist.

In *Semantic Data Capture* werden die über *ARKit* abgeleiteten Stützpunkte mit Hilfe maschineller Lernmodelle nach aktuellem Stand der App in acht + fünf unterschiedliche Klassen von Relevanz für die Wohnraumanalyse eingeordnet. Die initialen acht Klassen basieren dabei auf dem von Apple Inc. bereitgestellten *ARMeshClassification*-Modul, während die Erweiterung eine gezielte Selektion aus dem populären YOLO-Modell (Redmon et al. 2016) zur Echtzeit-Objekterkennung repräsentiert und als nachgeschaltete Verfeinerung implementiert ist. Die Klassifikation beider Phasen erfolgt bildbasiert unter Verwendung des Kamera-Feeds. *Semantic Data Capture* ist als Apple *iPhone* und *iPad* App implementiert und erfordert das LiDAR-Modul.

8 [Semantic Data Capture](#) Projektseite, Prototyp als iOS Beta TestFlight verfügbar

Nach der 3D-Erfassung des Wohnraumes wird die Objektrepräsentation in Form eines 3D-Meshes auf dem Endgerät visualisiert und kann schlussendlich als Wavefront .obj-Datei mit Textur exportiert werden. Dieses Ergebnis stellt die erste Komponente der E-Health-Anwendung dar.

5.2 Eignungsklassifikation von LiDAR-Wohnraum-Punktwolken

Die an die Datenerfassung anschließende Komponente wird mit dem Ziel entwickelt, automatisiert Barrieren in dem semantisch segmentierten 3D-Datensatz (a) zu identifizieren und (b) in Zusammenhang mit allen erkannten Instanzen des erfassten Wohnraums zu klassifizieren. Die Instanzen selbst sind durch die in *Semantic Data Capture* implementierten Klassen definiert und reichen von strukturalen Elementen (exemplarisch Boden, Wand, Fenster, Tür) bis hin zu Einrichtungsgegenständen (z. B. Stuhl, Tisch, Bett) (vgl. Abb. 9a). Im Rahmen dieses Abschnitts wird die Eignungsklassifikation vereinfacht erläutert, da sie im Laufe des Jahres als Journal-Bertrag publiziert werden soll.

Nach aktuellem Stand findet die Datenanalyse in Python 3.7 und primär unter Verwendung des Frameworks *Open3D*⁹ statt. Die Routine nimmt das semantisch segmentierte 3D-Mesh sowie zwei Steuerungsparameter entgegen und führt vier Phasen der Datenverarbeitung aus, an dessen Schluss eine klassifizierte 3D-Punktwolke mit Erklärungsnotiz pro Wohnrauminstanz steht. Der Programmablauf gründet hauptsächlich auf einem funktionalen Paradigma und greift partiell auf Methoden des unüberwachten Maschinellen Lernens zurück. Der schematische Ablauf ist, ergänzt um ein Zwischenergebnis aus der Layouting-Phase und die final klassifizierte Punktwolke, in Abb. 10 dargestellt.

In der ersten Phase wird das 3D-Mesh mittels des Sampling-Steuerungsparameters in eine 3D-Punktwolke konvertiert. Daran anknüpfend wird eine Punktdichte berechnet, welche als Parameter für diverse Funktionen der Skript-routine Verwendung findet. Die Bereinigung der Punktwolke stellt eine zentrale Aufgabe innerhalb des Programmablaufs dar und wird folglich von Phase zwei und drei adressiert. In Phase zwei werden großflächige Artefakte, die z. B. durch Spiegel- und Glasflächen entstanden sind, mittels Schnittgeometrien entfernt (vgl. Abb. 9a und Abb. 10a). Dazu wird eine vorab definierte Anzahl an Hauptebenen parametrisch modelliert und als solche verwendet. In der dritten Phase wechselt der Datensatz erneut seine Modalität. Zunächst werden die einzelnen Klassen gefiltert und bis zum Ende des Abschnitts mikrokosmisch behandelt. Die Überführung in ein strukturiertes Voxelgrid bietet die Möglichkeit, Punktbeziehungen über eine Nachbarschaftstopologie abzubilden. Eine gekapselte

⁹ Open3D (Version 0.14.1) von Zhou et al. (2018)

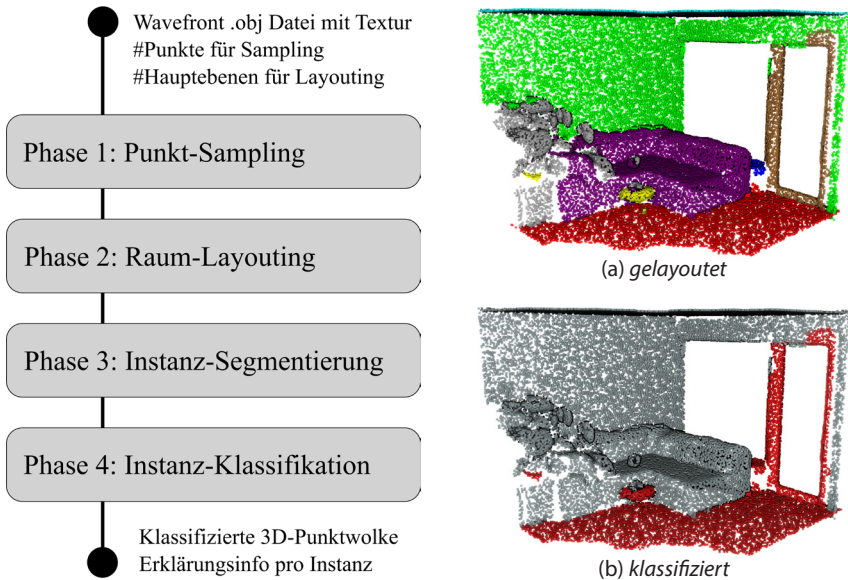


Abb. 10: Schematisches Ablaufdiagramm der automatisierten Eignungsklassifikation (links) sowie (a) das Zwischenergebnis aus Phase 2 und (b) die klassifizierte 3D-Punktwolke als Endergebnis, in welcher eine rote Einfärbung Nichteignung und eine graue Farbe die passive Teilnahme an einer Eignungsprüfung symbolisiert (rechts)

Filterfunktion ermöglicht anschließend die Entfernung kleinteiliger Artefakte. Der klassengefilterte und bereinigte Datensatz wird nun über eine Kombination aus Instanz-Segmentierung mittels klassischer Clustering-Algorithmen und einem Voting-Ansatz in atomare Instanzen zerlegt. Diese Instanzen werden innerhalb der letzten Phase in ein objektorientiertes Raummodell überführt und dort regelbasiert nach Eignung klassifiziert. Die Eignung des Wohnraums kann als logische Komposition der einzelnen Instanz-Zustände geschlussfolgert werden. Dabei kann eine Instanz den Zustand geeignet, ungeeignet oder nicht- bzw. passiv-evaluiert annehmen (vgl. Abb. 10b). Sobald eine Instanz den Zustand ungeeignet annimmt, werden die nicht-erfüllten Regelbedingungen als Handlungsempfehlung formuliert und für den Nutzer aufbereitet, welche somit autark in der Lage ist, seinen Wohnraum barrierefrei und rollstuhlgerecht zu gestalten.

Das visualisierte Beispiel aus Abb. 9, Abb. 10a und Abb. 10b zeigt den Ausschnitt eines Wohnraumes, welcher durch die entwickelte Routine als nicht-barrierefrei klassifiziert wird. Die Erklärungsnotiz liefert die entsprechenden Ursachen, wie beispielhaft einen nicht-freigehaltenen Türbereich (braun) von 1,50 m × 1,50 m, einen nicht-unterfahrbaren Tisch (gelb) oder das Fehlen ausreichend großer Bewegungszonen auf dem Fußboden (rot). Diese Informatio-

nen unterstützen ein gezieltes Handeln ohne Unterstützung von Fachpersonal aus AEC oder dem Gesundheitswesen und schaffen im Kontext der eingangserwähnt beschriebenen Herausforderungen einen wertvollen Mehrwert für ein barrierefreies und selbstbestimmtes Leben und Wohnen im Alter.

Bislang sind 12 Regeln im direkten Bezug zu den Klassen Boden, Fenster, Tür, Stuhl und Tisch implementiert. In Zukunft soll die Eignungsklassifikation weitere Regeln einschließen und zu einer medienbruchfreien E-Health-Anwendung mit *Semantic Data Capture* verschmolzen werden.

6 Schlussfolgerung mit einem Blick in die Zukunft

Durch die Integration von LiDAR in Apples Pro-Produkte erfährt die miniaturisierte Low-Cost-Sensorik zur aktiven 3D-Erfassung der gebauten Umwelt seit 2020 einen neuen Treiber. Diese Verfügbarkeit motiviert die Autoren dazu, einen wissenschaftlichen Blick auf das verbaute LiDAR-Modul zu werfen und solches in Verbindung mit einem konkreten Anwendungsfall zu bewerten.

Gemessen an den empirisch ermittelten Spezifikationen aus Kapitel 3, kann das dToF-LiDAR-Modul hauptsächlich Anwendungsfällen mit niedrigen Genauigkeits- und Integritätsanforderungen zugeordnet werden, wodurch sich per se eine Distanzierung von geodätischen Disziplinen ableitet. Darüber hinaus lässt sich das LiDAR-Modul weitestgehend als Black Box beschrieben, da es an belastbaren und wissenschaftlich-fundierten Informationen zur Interpretation der Tiefenkarte, z. B. hinsichtlich der Vermaschung, mangelt. Unter Vernachlässigung der strengen, geodätischen Gesichtspunkte offeriert Apples LiDAR-Modul jedoch eine bislang einzigartige Endgerät-Funktionalität, welche primär den Anforderungen eines breiten Anwenderkreises gerecht wird, gleichzeitig aber auch geodätischem Fachpersonal von Nutzen sein kann, um eine schnelle in-situ-Einschätzung über Sachverhalte zu dokumentieren. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass das Funktionalitätsspektrum der, im Rahmen der Unterhaltungselektronik gemessen, jungen Technologie noch in den Kinderschuhen steckt und Neuentwicklungen, vergleichbar mit *Semantic Data Capture*, nur eine Frage der Zeit darstellen. Neue Software-Frameworks, welche mit dem LiDAR-Modul kooperieren und immer performantere Modelle und etablierte Verfahren des Maschinellen Lernens integrieren, sind in der Entwicklung und werden den Weg für verschiedenste Teilaufgaben in der geodätischen Welt und AEC-Industrie neu definieren. Exemplarisch dafür sei an dieser Stelle Apples Framework *RoomPlan*¹⁰ genannt, mit welchem ein automatisierter Scan-to-BIM-Prozess greifbar wird.

¹⁰ *RoomPlan* Framework, verfügbar ab iOS 16.0+

Unter Berücksichtigung aller genannten Aspekte betrachten die Autoren Apples LiDAR-Modul als Consumer-Produkt mit der Kapazität, das geodätische Portfolio an 3D-Erfassungssensorik für den Nahbereich an geeigneter Stelle zu erweitern. Gleichzeitig bietet das LiDAR-Modul in Zusammenspiel mit Software-Frameworks die Chance, das geodätische Kompetenzspektrum in die sich rasant entwickelnde Welt von GeoAI und 3D-Apps einzupflanzen und damit einen Mehrwert zu generieren, welcher gesellschaftlichen Herausforderungen – wie beispielhaft das Leben und Wohnen im Alter – entgegentritt.

Literatur

- Apple Inc. (2020): Apple stellt neues iPad Pro mit fortschrittlichem LiDAR Scanner vor und bringt Trackpad-Unterstützung für iPadOS.
- Apple Inc. (2022): Visualizing and Interacting with a Reconstructed Scene. Estimate the shape of the physical environment using a polygonal mesh.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 18040-2:2011-09, Barrierefreies Bauen – Planungsgrundlagen – Teil 2: Wohnungen, ICS 11.180.01; 91.010.99. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Gyongy, I., Dutton, N. A. W., Henderson, R. K. (2022): Direct Time-of-Flight Single-Photon Imaging. In: IEEE Transactions on Electron Devices, 69 (6), 2794–2805. DOI: [10.1109/TED.2021.3131430](https://doi.org/10.1109/TED.2021.3131430).
- Klauer, T., Plaß, B. (2021): Point Cloud Capturing and AI-based Classification for as-built BIM using Augmented Reality. In: UR-AI 2021, 158–166.
- Kuhlmann, H., Holst, C. (2016): Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. In: Handbuch der Geodäsie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–46. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2_35-1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2_35-1).
- Luetzenburg, G., Kroon, A., Bjørk, A. A. (2021): Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. In: Scientific reports, 11 (1), 22221. DOI: [10.1038/s41598-021-01763-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9).
- MacKinnon, N. (2021): Image Sensor with Optical Communication Capabilities: USA patent US 2021/20210152789.
- Niclass, C. L., Shpunt, A., Agranov, G. A., Waldon, M. C., Rezk, M. A., Oggier, T. (2020): Imaging system with synchronized scan and sensing: USA patent US 2020/10795001 B2.
- Padmanabhan, P., Zhang, C., Charbon, E. (2019): Modeling and Analysis of a Direct Time-of-Flight Sensor Architecture for LiDAR Applications. In: Sensors (Basel, Switzerland), 19 (24). DOI: [10.3390/s19245464](https://doi.org/10.3390/s19245464).
- Plaß, B., Emrich, J., Götz, S., Kernstock, D., Klauer, T. (2021): Evaluation of point cloud data acquisition techniques for Scan-to-BIM workflows in Healthcare. In: Proceedings of FIG e-Working Week 2021, Netherlands.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A. (2016): You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In: 2016 IEEE CVPR, 779–788. DOI: [10.1109/CVPR.2016.91](https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91).

- Witte, B., Sparla, P. (2010): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen: 7., überarb. und erw. Aufl. Wichmann, Heidelberg.
- Yoshida, J. (2020): Breaking Down iPad Pro 11's LiDAR Scanner. www.eetimes.com/breaking-down-ipad-pro-11s-lidar-scanner/, letzter Zugriff 07.10.2022.
- Zhang, C., Lindner, S., Antolovic, I. M., Mata Pavia, J., Wolf, M., Charbon, E. (2019): A 30-frames/s, 252×144 SPAD Flash LiDAR With 1728 Dual-Clock 48.8-ps TDCs, and Pixel-Wise Integrated Histogramming. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits, 54 (4), 1137–1151. DOI: [10.1109/JSSC.2018.2883720](https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2883720).
- Zhou, Q.-Y., Park, J., Koltun, V. (2018): Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing. arXiv: [10.48550/arXiv.1801.09847](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.1801.09847).

Kontakt

Bastian Plaß | Thomas Klauer

i3mainz – Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik

Hochschule Mainz

Lucy-Hillebrand-Straße 2, 55128 Mainz

bastian.plass@hs-mainz.de | thomas.klauer@hs-mainz.de

Session 4:

Scanning der bebauten Umwelt

Wasser, Muscheln und luftige Höhen – Herausforderungen für den TLS-Einsatz an der Wasserstraße

Florian Zimmermann | Rainer Krahe | Thomas Artz

1 Einleitung und Hintergrund

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV¹) ist als eine der größten Bauverwaltungen Europas für viele tausend Infrastrukturbauwerke wie Schleusen, Wehranlagen, Brücken oder Hebewerke verantwortlich. Die Verantwortung umfasst den gesamten Lebenszyklus der Bauwerke, also von der Planung und dem Neubau, über den Betrieb und die Unterhaltung, bis hin zum Abbruch der Bauwerke. Aufgrund der zunehmenden Überalterung vieler existierender Bauwerke besteht ein immenser Handlungsbedarf in Form von Ausbau-, Modernisierungs- oder Instandsetzungsarbeiten, um die Verfügbarkeit und Sicherheit der Infrastrukturbauwerke sicherzustellen. Um diese Tätigkeiten möglichst effizient und wirtschaftlich zu gestalten wird auf die konsequente Digitalisierung sämtlicher Abläufe in Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung abgezielt.

Eine Grundvoraussetzung sind digitale Bestandsunterlagen, welche aktuell und qualitativ hochwertig bereitgestellt werden sollen. Auf Grund des Alters der Bauwerke liegen diese allerdings häufig nicht vor, oder es handelt sich um nachträglich digitalisierte Unterlagen aus der Bauzeit. Dies bringt erhebliche Probleme mit sich, da die Übereinstimmung mit den tatsächlichen Gegebenheiten nicht sichergestellt und damit in vielen Fällen eine effiziente Umsetzung der zuvor genannten Tätigkeiten nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grund wächst auch in der WSV ständig der Bedarf an entsprechenden 3D-Bestandsinformationen der Ingenieurbauwerke, welche in Genauigkeit, Auflösung und Aktualität den jeweiligen Anforderungen entsprechen. Folglich kommt nun – wenn auch mit erheblicher zeitlicher Verzögerung – der vielbeschriebene und in weiten Teilen der Geodäsie bereits vollzogene Paradigmenwechsel (Kuhlmann et al. 2016) in Form des Übergangs von der punkthaften zur flächenhaften Datenerfassung und Abbildung auch in der WSV an.

1 www.gdws.wsv.bund.de

Um die WSV bei dessen Bewältigung zu unterstützen, erarbeitet die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen ihres Beratungsauftrags gemeinsam mit den ausführenden Ämtern Strategien und Konzepte, welche unter Beachtung des aktuellen Stands der Technik an konkreten Anwendungsfällen erprobt und evaluiert werden.

Um in diesem interdisziplinären Kontext die Zusammenarbeit zwischen Bauingenieur- und Vermessungswesen zu vereinfachen und qualitätsgesicherte Nutzerprodukte sicherzustellen wird über die Verwaltungsvorschrift VV-WSV 2602 „Ingenieurvermessung im Bauwesen“ (GDWS 2006, Backhausen 2009) bereits seit über 15 Jahren ein Schema für die Aufstellung von Messprogrammen genutzt, welches die messtechnischen Umsetzung aus geodätischer Sicht auf die seitens des Bauingenieurwesens formulierten Anforderungen abstimmt und festlegt. Durch den genannten Übergang von der punkthaften zur flächenhaften Datenerfassung verlangen Messprogramme zum Einsatz des terrestrischen Laserscannings (TLS) allerdings eine Anpassung der in der VV-WSV 2602 aufgelisteten Vorgaben und Inhalte.

Im Folgenden werden exemplarisch am Beispiel von zwei Anwendungsfällen Untersuchungen zum TLS-Einsatz im WSV-Kontext beschrieben, wobei vor dem Hintergrund der genannten Entwicklungen verschiedene Ziel- und Fragestellungen im Fokus stehen.

- Der erste Anwendungsfall (Kapitel 2) beschreibt eine Pilotstudie zur TLS-basierten Bestandserfassung einer Eisenbahnhochbrücke. Ziele waren die Erprobung der dreidimensionalen Zustandserfassung eines komplexen Bauwerks mittels TLS, inkl. der anschließenden Modellierung, sowie die Bewertung hinsichtlich der Einsatzpotenziale in Richtung Wirkbetrieb.
- Der zweite Anwendungsfall (Kapitel 3) fokussiert sich auf erste Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten des TLS im Zuge einer Bauwerksinspektion. Des Weiteren sollten die erzeugten Punktwolken auch als Vergleichsdaten für die Bewertung anderer Verfahren zur Bestandserfassung unter Wasser gelegener Bauwerksbereiche dienen.

Kapitel 4 fasst die wesentlichen Erkenntnisse, aber auch die identifizierten WSV-spezifischen Herausforderungen und Handlungsbedarfe zusammen.

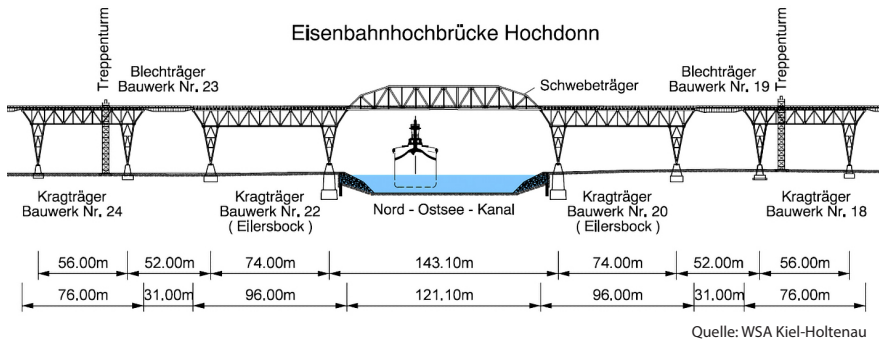
2 Anwendungsfall „Eisenbahnhochbrücke Hochdonn“

Als Untersuchungsobjekt der Pilotstudie wurde die am Nord-Ostsee-Kanal (NOK) gelegene Eisenbahnhochbrücke (EHB) Hochdonn ausgewählt. Diese stellt auf Grund ihrer Dimensionen und der vorliegenden Objekteigenschaften

spezielle Herausforderungen an die TLS-basierte Zustandserfassung und eignet sich dadurch insbesondere, um Stärken und Schwächen der Methode zu identifizieren. Als zu erzeugende Nutzerprodukte wurden sowohl plausibilisierte und georeferenzierte Punktwolken, sowie daraus abgeleitete CAD-Modelle definiert, wobei derzeit aus Sicht des zuständigen Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes (WSA) insbesondere die Verwendbarkeit und Einsatzmöglichkeiten der Modelle im bautechnischen Bereich von primärem Interesse ist. Die Datenerfassung und -modellierung wurde im Rahmen der Pilotstudie als Dienstleistung über eine Vergabe an ein Ingenieurbüro realisiert.

2.1 Eisenbahnhochbrücke Hochdonn

Die Eisenbahnhochbrücke Hochdonn wurde als Kreuzungsbauwerk über den Nord-Ostsee-Kanal von 1913 bis 1920 errichtet. Die Brücke hat eine Gesamtlänge von 2218 m und wurde als Fachwerk (Stahlkonstruktion) ausgebildet. Das Brückenelement über dem Kanal wird als „Schwebeträger“ (Länge 121,028 m) bezeichnet und wurde im Jahr 2006 als Schweißkonstruktion ausgetauscht.



Quelle: WSA Kiel-Holtenau

Abb. 1: Auszug aus Übersichtsplan der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn

Die seitlichen Bauwerke neben dem Schwebeträger werden als Kragträger bezeichnet. Die lichte Durchfahrtshöhe für die Schifffahrt beträgt 42 m, die höchste Stelle am Schwebeträger misst 57,724 m ü. NHN. In [Abb. 1](#) ist ein Auszug aus dem Übersichtsplan der Eisenbahnhochbrücke mit der Bezeichnung der entsprechenden Bauwerke (BW) dargestellt.

Zur besseren Veranschaulichung der Dimension der Eisenbahnhochbrücke zeigt [Abb. 2](#) den Schwebeträger (BW 21) während einer Schiffsdurchfahrt, sowie eine Detailaufnahme des Stahlfachwerks des Kragträgers BW 24. Aufgrund der Länge der EHB Hochdonn von über zwei Kilometern wurden aus



Quelle: BfG

Abb. 2: Schwebeträger der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn (links) und Detailansicht des Stahlfachwerks in einem Kragträger (rechts)

ökonomischen Gründen diese beiden Bauwerke als in dieser Pilotstudie zu erfassende Bauwerksbereiche ausgewählt (vgl. [Abb. 1](#)).

2.2 Messdatenaufnahme, Datenprozessierung und Modellierung

Als Vorbereitung des Laserscannings und zur Anbindung der Vermessungsergebnisse an das übergeordnete Lage- und Höhensystem wurde zunächst ein Festpunkt- und Passpunktfeld angelegt (siehe Abschnitt 2.2.1). Im Anschluss erfolgte die Bauwerkserfassung mittels TLS (Abschnitt 2.2.2), sowie die Modellierung einzelner Bereiche der finalen Punktwolkenprodukte (Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Festpunktfeld

Im Umfeld der Eisenbahnhochbrücke wurde ein Festpunktfeld angelegt, in welches auch fünf vorhandene Messpfiler eingepflegt wurden. Zum einen wurden auf dem Bauwerk Zielzeichen angebracht und zum anderen an den Fundamenten der Brücke dauerhafte Objektpunkte vermarktet. Hierbei handelte es sich um Prismen, welche über eingebrachte Bohrungen an den Fundamenten adaptiert wurden. Im Rahmen einer klassischen terrestrischen Netzmessung wurden die Koordinaten von knapp 40 Passpunkten und 25 Zieltafeln bestimmt. Die Netzmessung erfolgte mit einer Totalstation vom Typ Leica TDRA6000 und die zugehörige Netzausgleichung in der Software Spatial Analyzer. Neben der Lage der Festpunkte wurde auch ein Anschluss an das übergeordnete Höhensystem über einen vorhandenen Höhenbolzen sichergestellt.

2.2.2 TLS-Datenerfassung

Die Dimension und Konstruktionsweise der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn stellen eine Herausforderung für die messtechnische Umsetzung dar. Speziell die vollständige Erfassung des Stahlfachwerks verlangt eine Vielzahl an Scannerstandpunkten, wobei die Messungen zum Teil unter erschwerten Bedingungen, wie z. B. schwerzugänglichen Aufstellungsorten oder engen Platzverhältnissen, erfolgen müssen. Gleichzeitig spielen auch äußere Einflüsse eine entscheidende Rolle. Zum einen ist das Bauwerk klimatischen Einflüssen ausgesetzt, wobei aufgrund der exponierten Lage insbesondere starker Wind zu Beeinträchtigungen des Messbetriebs führen kann. Zum anderen ist durch den Zugverkehr der Zugang für die Messtrupps auf die frühen Abendstunden und die Nacht begrenzt und der Transport des Messequipments muss über einen seitlich angebrachten Treppenturm erfolgen.



Quelle: BfG

Abb. 3: Scanner auf Magnetfuß während Punktaufnahme

Bei der TLS-Datenerfassung kamen zwei Scanner der Firma FARO (FARO Focus S150/S350) zum Einsatz. Auf dem Bauwerk wurden diese über einen Magnetfuß an der Stahlkonstruktion befestigt. Bei Scanaufnahmen, welche vom Boden aus erfolgten, wurden Scanstative genutzt. Für die Registrierung und Georeferenzierung der Einzelscans wurden Scankugeln und Schachbrett-Zielmarken verwendet. [Abb. 3](#) zeigt einen Scanner während der Punktaufnahme.

Abhängig von der Zielweite zum Objekt wurden die Auflösungsstufen 1,5 mm/10 m, 3,1 mm/10 m und 6,1 mm/10 m gewählt. Zudem wurde auf die Aufnahme von RGB-Bildern mit der integrierten Kamera verzichtet. Dies ist zum einen durch die Datenerfassung bei Nacht, und zum anderen durch den erheblichen zeitlichen Mehraufwand begründet.

Für die vollständige Erfassung der beiden ausgewählten Bauwerke waren insgesamt 504 Standpunkte erforderlich (BW 21 – 353, BW 24 – 151). Im aktuellen Aufnahmebereich des jeweiligen Scannerstandpunktes wurde ein Abstand

zwischen den Zielzeichen > 15 m angestrebt, wobei, wenn möglich, zusätzliche Verknüpfungspunkte in höheren bzw. tieferen Ebenen (z. B. zwischen den Untergurtebenen) angebracht und erfasst wurden.

Die Rohdaten der Scanner wurden in der Software FARO-SCENE verarbeitet und registriert. Die Punktwolkenbereinigung und Plausibilisierung erfolgte manuell in der Software Autodesc-RECAP Pro. Abb. 4 zeigt die bereinigten Punktwolken der beiden erfassten Bauwerke 21 (Schwebeträger) und 24 (Kragträger). Die Gesamtpunktwolke besteht nach einer Rasterung auf einen minimalen Punkt-zu-Punkt Abstand von 3 mm aus ca. 921 Millionen Scanpunkten (BW 21 – 585 Mio. Punkte, BW 24 – 336 Mio. Punkte), was einer Dateigröße von etwa 14 Gigabyte entspricht.

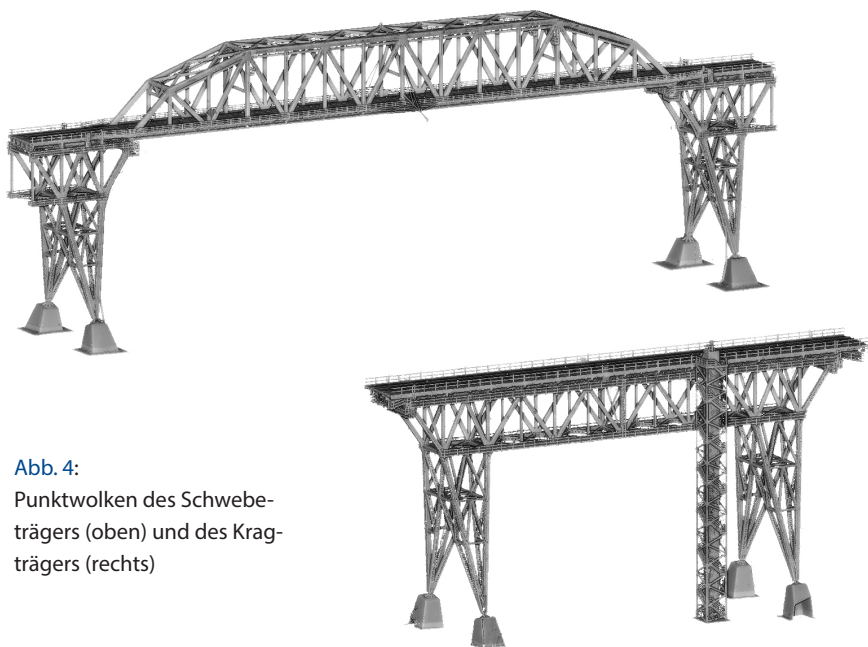


Abb. 4:

Punktwolken des Schwebeträgers (oben) und des Kragträgers (rechts)

2.2.3 Datenmodellierung

Im Rahmen dieser Pilotstudie wurden aufwandsbedingt zwei Bauwerksbereiche für eine entsprechende Punktwolkenmodellierung ausgewählt. Hierbei handelt es sich um einen Teil des Schwebeträgers BW 21 (Nordseite) und einen Knoten im Untergurt des Kragträgers BW 24. Die Modellierung der Punktwolkenbereiche erfolgte jeweils in der Software Tekla.

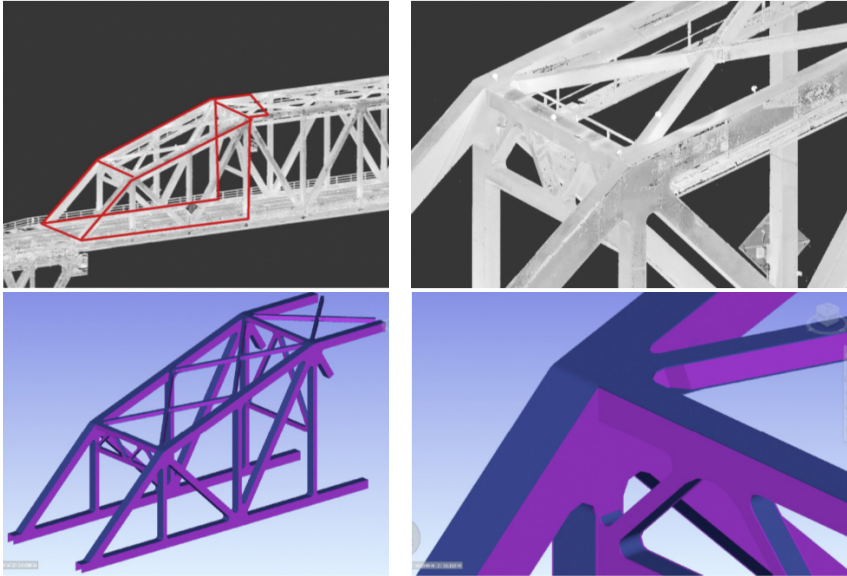


Abb. 5: Punktwolke des Modellierungsbereichs (oben) und Modellierungsergebnis nach Variante 1 (unten)

Im Zuge der Modellierung des Schwebeträgers wurden zwei Varianten verfolgt. Zum einen erfolgte eine möglichst detailgenaue Abbildung des Bauwerks durch eine Modellierung aller Stahlteile als einzelne Bleche. So wurde z. B. ein Kastenträger, welcher aus vier Blechen besteht, auch mit vier Einzelblechen modelliert. Dies hat zur Konsequenz, dass die Information, dass es sich hierbei um einen einzelnen Träger handelt zwar nicht vorhanden ist, dafür aber alle Ausrundungen in den Übergangsbereichen der Stahlteile erfasst werden. Abb. 5 zeigt den für die Modellierung ausgewählten Punktwolkenbereich und die Ergebnisse dieser Modellierungsvariante.

Bei der zweiten Variante (hier nicht gezeigt) wurden die Träger nicht als einzelne Bleche, sondern als echte Träger modelliert. Dadurch liefert Variante 2 zwar eine weniger exakte Abbildung des Bauwerks, speziell in den Übergangsbereichen, ermöglicht aber die direkte Einbindung in Stabwerksprogramme.

Im zweiten Modellierungsbereich (Kragträger) führt die komplexe Ausführung des Bauwerks zu erheblichen Sichtbehinderungen, wodurch speziell in den innenliegenden Teilen des Knotens die Datenaufnahme mittels TLS stark eingeschränkt wird. Folglich wurden auf einigen Blechen in diesen Bereichen gar keine, oder nur sehr wenige Messpunkte bestimmt. Da die Modellierung des Knotens rein auf der Punktwolke basiert, konnte dementsprechend keine voll-

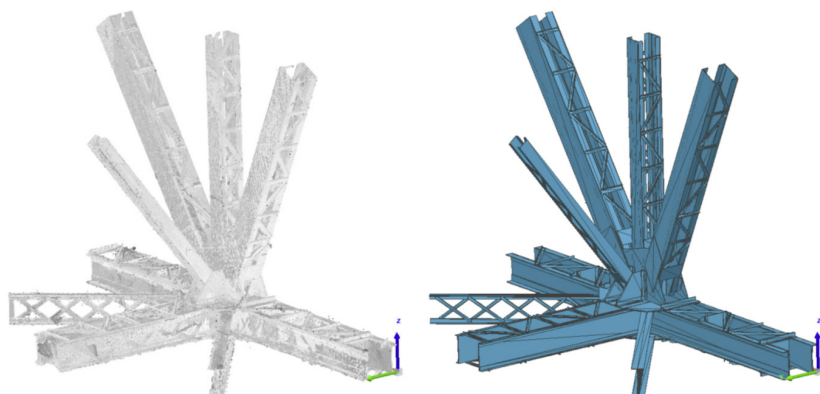


Abb. 6: TLS-Punktwolke (links) und daraus abgeleitetes CAD-Modell (rechts) des Knotens im Untergurt des Kragträgers BW 24

umfängliche Modellierung aller Bauteile erfolgen. Abb. 6 stellt die Punktwolke und das daraus abgeleitete CAD-Modell gegenüber.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass sämtliche Blechdicken aus der Punktwolke abgeleitet wurden, wodurch die aufgetragene Korrosionsschutzschicht und Farbe in den bestimmten Blechdicken enthalten sind. Dies gilt auch für das Modell des Schwebeträgers BW 21.

2.3 Ergebnissbewertung

Im Rahmen des hier beschriebenen Anwendungsfalls „Eisenbahnhochbrücke Hochdonn“ wurde die TLS-basierte Bestandserfassung, von der Messkonzepterstellung bis zur Ableitung von Nutzerprodukten, pilothaft umgesetzt und erprobt. Die dabei gewonnenen wesentlichen Erkenntnisse sind:

- Bis auf Bereiche mit starken Sichtbehinderungen war die flächenhafte Bestandserfassung erfolgreich.
- Die Bewertung der Qualität der Punktwolken gestaltet sich schwierig und konnte nur exemplarisch in drei Bauwerksbereichen näher analysiert werden, welche zusätzlich mit Industriemesssystemen übergeordneter Genauigkeit erfasst wurden (hier nicht gezeigt). Hierbei lagen die Abweichungen überwiegend im Bereich weniger Millimeter, was auf eine hohe Qualität der erzeugten Punktwolken hindeutet.
- Neben den Herausforderungen im Rahmen der messtechnischen Umsetzung haben sich die Nachbearbeitung und Modellierung der Punktwolken als enorm zeitaufwendiger und schwieriger Prozess herausgestellt.

- Die Übereinstimmung zwischen Punktwolke und abgeleitetem CAD-Modell variiert im Bereich weniger Millimeter bis einiger Zentimeter und hängt primär von der Art der Modellierung und dem Grad der Generalisierung ab.
- Als potenzielle Nutzungsmöglichkeiten sind die Kollisionsprüfung von Gerüstbauteilen bzw. die Identifikation von Anbaumöglichkeiten, oder die Planung von Instandsetzung und Austausch von Bauwerksteilen zu nennen.

3 Anwendungsfall „Schleusenkammer Enkirch“

Die an der Mosel gelegene Schleusenkammer Enkirch wurde im Zuge der Schleusensperre 2022 für einen Zeitraum von 10 Tagen trockengelegt, gereinigt und den üblichen Inspektions- und Instandsetzungsmaßnahmen unterzogen. Im Anschluss an diese Arbeiten und vor den ersten Probeschleusungen konnte die Kammer mittels TLS erfasst werden, wobei sich die Vermessungsarbeiten in die regulären Tätigkeiten im Zuge der Schleusensperre eingliedern und ggf. auch unterordnen mussten. Die TLS-Daten sollten zu zweierlei Zwecken dienen:

1. Im Zuge einer Schleusensperre erfolgen in der Regel geodätische Messungen zur Bauwerksinspektion. Hierbei werden nach einem VV-WSV-2602-konformen Messprogramm vermarkte Objektpunkte an den Kammerrändern zu unterschiedlichen Lastfällen tachymetrisch und nivellitisch bestimmt und einem Koordinatenvergleich mit vorhergehenden Epochen unterzogen. Ziel der TLS-Erfassung ist es, in diesem Kontext das Potenzial und den Mehrwert flächenhafter Daten herauszuarbeiten und erste Erfahrungen im Hinblick auf die Aufstellung eines entsprechenden Messprogramms zu gewinnen.
2. Die Schleusenkammer Enkirch ist eines der Infrastrukturbauwerke, an welchem die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks² die Zustandserfassung mittels unbemannter Plattformen erprobt. Hierbei kommt unter anderem ein USV (unmanned surface vehicle) zum Einsatz, welches bei gefüllter Kammer die unter Wasser gelegenen Bereiche mittels Fächerecholotung erfasst. In diesem Zusammenhang sollen die TLS-Punktwolken als Vergleichsdaten herangezogen werden.

3.1 Messdatenaufnahme und Prozessierung

Die Schleusenkammer Enkirch wurde 1964 errichtet und besteht aus monolithischen Blöcken (Häupter) sowie Schwergewichtskammerblöcken. Die Kammer ist 12,08 m breit, 170 m lang, die maximale Hubhöhe beträgt 7,5 m. Abb. 7 zeigt die Kammer während der Schleusensperre.

² www.bmdv-expertennetzwerk.bund.de



Quelle: BfG

Abb. 7: Schleusenammer Enkirch

Für die Bestandserfassung wurde durch das ortsansässige WSA ein Pano-ramascanner vom Typ Leica ScanStation P50 zur Verfügung gestellt. Die Messdatenerhebung erfolgte durch die BfG. Aufgrund des verfügbaren Zeitrahmens wurde der Fokus bewusst auf die Kammerwände und nicht auf die detaillierte Erfassung der beiden Schleusentore und weiterer Einbauten gelegt.

Nach der tachymetrischen Einmessung und Kontrolle des örtlichen Festpunktfeldes wurde die flächenhafte Datenerfassung mittels TLS in zwei getrennten Arbeitsschritten durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgte die Erfassung von der Schleusenplattform aus, welche bereits parallel zu den Reinigungs- und Sanierungsarbeiten in der Kammer möglich war.

Im zweiten Schritt erfolgte die Erfassung in der Schleusenammer, nachdem die genannten Arbeiten nahezu abgeschlossen waren und sich somit auch weniger störende Objekte im Sichtfeld des Scanners befanden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass beide TLS-Aufnahmen an verschiedenen Tagen stattfanden und eine Verknüpfung der Aufnahmen über Zielzeichen aufgrund fehlender Sichtbarkeiten und Vermarkungen nicht möglich war. Folglich liegen aus beiden TLS-Aufnahmen Punktwolken im lokalen Bauwerkssystem vor, welche aber unabhängig voneinander prozessiert wurden.

Auf der Schleusenplattform wurden je neun Standpunkte auf der linken und rechten Seite der Kammer besetzt. Das Scanning in der Schleusenammer erfolgte von neun Standpunkten aus, welche ungefähr in der Bauwerksachse, also mittig zwischen den Kammerwänden lagen. Zur Registrierung wurden im Vorfeld angebrachten Wandbolzen mit Zielzeichen besetzt. Die Registrierung der Einzelscans erfolgte im Anschluss zielzeichenbasiert in der Software Leica Cyclone Register und die weiterführende Bearbeitung in der Software Leica Cyclone 3DR. Hierzu zählt insbesondere die Bereinigung der registrierten Punktwolken, welche im Bereich der Schleusenplattform ca. 178 Millionen



Abb. 8: Unbearbeitete Punktwolke der Schleusenammer Enkirch

Punkte und im Bereich der Schleusenammer ca. 270 Millionen Punkte umfasst. [Abb. 8](#) zeigt die Punktwolke der Schleusenammer Enkirch im unbereinigten Zustand.

Da Schleusen nur in einem sechsjährigen Turnus trockengelegt werden tritt über die Jahre eine erhebliche Verschmutzung durch Algen- und Muschelbewuchs auf. Zudem lagern sich auf der Kammersohle bis zu einer Dicke von mehreren Dezimetern Sedimente ab. Aus diesem Grund wird zur Vorbereitung der handnahen Bauwerksinspektion zunächst immer eine aufwendige Reinigung der Kammern durchgeführt. Zugleich liefert dies aber auch die Begründung, warum die TLS-basierte Erfassung der Schleusenklammer effektiv und ohne aufwendige Nachbearbeitungen erst am Ende der Schleusensperre erfolgen kann. Da in diesem Praxisbeispiel bereits zu Beginn der Schleusensperre TLS-Scans von der Schleusenplattform aus möglich waren, welche auch die Kammer abdecken, wurde oft nur der ungereinigte oder teilgereinigte Zustand erfasst. Dies kann zu Abweichungen zwischen der erfassten Oberfläche und der tatsächlichen Bauwerksoberfläche in der Größenordnung mehrerer Zentimeter führen. Zur Verdeutlichung zeigt [Abb. 9](#) exemplarisch das Ergebnis eines M3C2-Punktwolkenvergleichs (Holst et al. 2017, Lague et al. 2013) für einen Bereich, welcher im teilgereinigten Zustand von der Schleusenplattform aus und im vollständig gereinigten Zustand aus der Kammer heraus erfasst wurde.

Mit Differenzen bis zu 5 cm zeigt der Punktwolkenvergleich deutlich den Muschelbewuchs im rechten Bereich des Übergangs zwischen Kammerwand

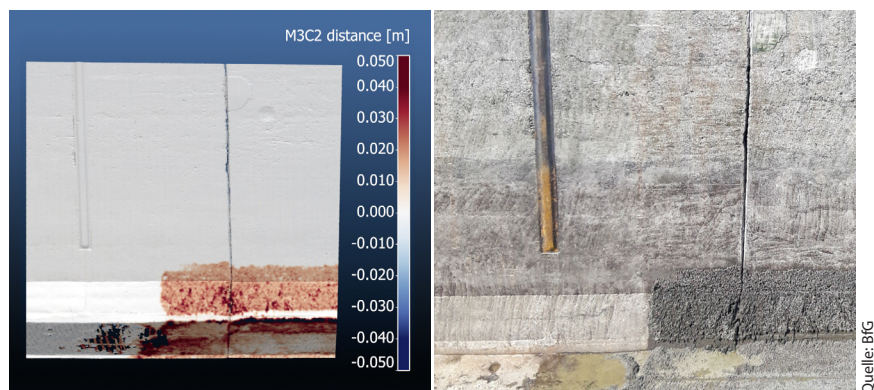


Abb. 9: M3C2-Punktwolkenvergleich zwischen Scans der Kammer mit unterschiedlichen Reinigungs Zuständen und Foto des Muschelbewuchses im betreffenden Bereich

und -sohle. Ebenso werden auch die während der Reinigung auftretenden Ansammlung im Sohlenbereich sichtbar.

Ein weiteres, grundlegendes Problem stellt das wieder eindringende Grundwasser im Bereich der Kammersohle dar, welches nur mit einem erheblichen permanent notwendigen Zusatzaufwand vollständig aus der Kammer gepumpt werden kann. Da in diesem Bereich folglich keine TLS-basierte Datenerfassung möglich ist, müsste im Bedarfsfall die Geometrie der Kammersohle mit anderen Messverfahren bestimmt werden.

3.2 Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Bauwerksinspektion

Derzeit beschränkt sich der geodätische Beitrag zur Bauwerksinspektion auf die Erfassung und Veränderungsanalyse einzelner Objektpunkte im Bereich der Kammerränder, bzw. daraus abgeleiteter Distanzen, also auf eine punkthafte Betrachtung der Bauwerksgeometrie. Da allerdings nach der TLS-basierten Erfassung für die Kammerwände und einen Teil der Kammersohle eine flächenhafte Abbildung der gereinigten Bauwerks Oberfläche vorliegt, ergeben sich weitere Einsatzmöglichkeiten.

Zunächst können, z. B. per Schnittbildung im Bereich der vermarkten Objektpunkte auch aus der Punktwolke Abstandsmaße zwischen den Kammerwänden abgeleitet werden, welche sich mit den bestehenden Koordinatenzeitreihen in Verbindung bringen lassen. Grundsätzlich bietet sich nun jedoch der enorme Vorteil einer flächenhaften Betrachtung der Bauwerksgeometrie – und im Hinblick auf weitere Messepochen – auch die Analyse derer Veränderung.

Abb. 10 zeigt die Abweichungen in Y-Richtung zwischen senkrechten Ebenen und der Punktwolke im Bereich der Kammerwände, wobei die Ebenen auf Basis der Sollgeometrie der Kammer konstruiert wurden.

In verschiedenen Bereichen zeigen sich großräumige Abweichungen von der Senkrechten in der Größenordnung einiger Zentimeter. Da die hier vorliegende Messung die Nullepoche darstellt, wird zunächst nur der Ist-Zustand und die tatsächliche Bauausführung in den 1960er Jahren dokumentiert. Rückschlüsse auf den Bauwerkszustand werden perspektivisch mit weiteren Messepochen möglich, da dann auch Veränderungsprozesse in dieser Art flächenhaft abgebildet und über die Zeit zu verfolgt werden können. Des Weiteren können diese Daten z. B. für die Verortung der Schadensdokumentation oder für die Detektion größerer Abplatzungen genutzt werden. Aufgaben wie die Risserkennung sind dagegen nur eingeschränkt möglich.

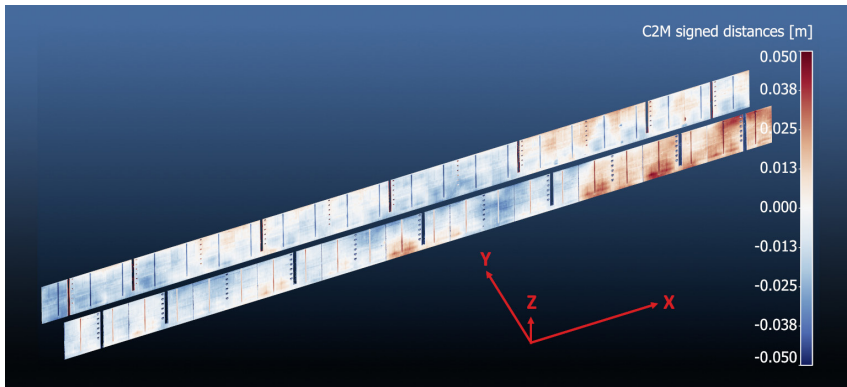
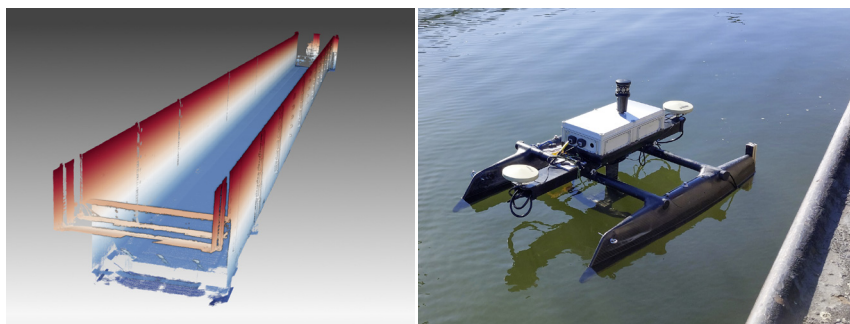


Abb. 10: Abweichungen in Y-Richtung zwischen Punktwolke und senkrechten Ebenen im Bereich der Kammerwände

3.3 Vergleichsdaten zu USV-basierter Bestandserfassung

Im Rahmen des BMDV-Expertennetzwerks wurde die Schleusenkammer unmittelbar nach der Schleusensperre von einem USV mittels Fächerecholotung erfasst. Abb. 11 zeigt die erfasste Punktwolke und das eingesetzte USV des Ingenieurbüros Ocean Maps aus Salzburg, Österreich.

Eine der relevanten Fragestellungen ist, inwieweit Systeme dieser Art und die damit erhobenen Daten dazu geeignet sind den Zustand unter Wasser gelegener Bauwerksbereiche zu bewerten um ggf. – ohne den enormen logistischen, zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand einer Trockenlegung – zeitlich engmaschigere Messepochen zu ermöglichen.



Quelle: Ocean Maps/BfG

Abb. 11: Punktwolke aus USV-Befahrung und USV-Plattform in Schleusenkammer

Abb. 12 zeigt äquivalent zu Abb. 10 die Abweichungen in Y-Richtung zwischen senkrechten Ebenen und der Punktwolke des USV im Bereich der Kammerwände.

Es wird deutlich, dass auch hier die großräumigen Bereiche mit Abweichungen einiger Zentimeter detektiert werden, was bereits ein sehr gutes Ergebnis darstellt und das Potenzial des Systems verdeutlicht. Allerdings werden die Bereiche nicht ganz so scharf erfasst wie im Fall des TLS. Zum einen ist die Qualität der Punktwolke nicht mit der des TLS zu vergleichen – das Rauschen in der Punktwolke liegt hier im unteren Zentimeterbereich. Zum anderen zeigt sich in der Punktwolke aus der USV-Befahrung auch ein systematisches Verhalten in Form einer jeweils nach außen gerichteten leichten Neigung der Kammerwände. Die Ursachenfindung und -behebung ist Gegenstand der aktuellen Untersuchungen.

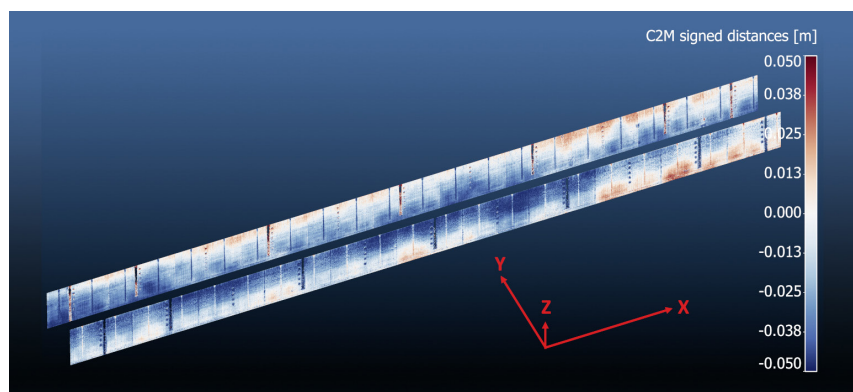


Abb. 12: Abweichung in Y-Richtung zwischen Punktwolke des USV und senkrechter Ebenen im Bereich der Kammerwände

4 Zusammenfassung und Fazit

Anhand zweier Anwendungsbeispiele wurden Möglichkeiten zum TLS-Einsatz an der Wasserstraße beschrieben. Zum einen wurde mit der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn ein komplexes Bauwerk unter schwierigen Messbedingungen erfolgreich flächenhaft erfasst. Zum anderen konnten am Beispiel der Schleusenkammer Enkirch erste Erfahrung zum TLS-Einsatz im Zuge einer Schleusensperre gewonnen und weiterführende Einsatzmöglichkeiten identifiziert werden. Die wesentlichen Erkenntnisse sind:

- Das terrestrische Laserscanning bietet ein enormes Potenzial und sollte in der WSV zwingend als ein weiteres Standardverfahren eingeführt werden.
- In Bereichen wie dem Stahlbau, in dem sehr hohe Genauigkeitsanforderungen vorliegen, wird TLS nicht alle Anforderungen erfüllen können. Auch sehr komplexe Strukturen stellen eine Herausforderung dar.
- Der im Zuge einer Schleusensperre verfügbare zeitliche Rahmen ist zu kurz um eine vollständige Aufnahme der gesamten Schleuse, inklusive aller Einbauten zu ermöglichen. Hieraus resultieren drei Handlungsoptionen:
 - Die zu erfassenden Bereiche müssen zu Beginn klar abgestimmt und eingegrenzt werden.
 - Abhängig von der Aufgabenstellung müsste gegebenenfalls für die Vermessungstätigkeiten ein größerer Zeitrahmen eingeplant werden.
 - Es müssen effizientere Messstrategien oder -verfahren erprobt werden.
- Die Qualitätsbewertung der erzeugten Punktwolken in Form von Genauigkeitsangaben ist für den Einsatz im Rahmen der Bauwerksinspektion zwingend notwendig, aber weiterhin problematisch. Daher besteht hier ein großes Interesse an den dahingehenden aktuellen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.
- Der zeitliche Aufwand für eine vollumfängliche flächenhafte Abbildung größerer Bauwerke steigt in Abhängigkeit der Komplexität der Bauausführung enorm. Insbesondere die Aufbereitung und Modellierung der Punktwolken ist hier als kritisch zu nennen und verlangt eine entsprechende IT-Ausstattung für ein effizientes Handling der erhobenen Massendaten.

An einigen Stellen in der WSV sind bereits verstärkt Aktivitäten im Bereich des terrestrischen Laserscannings, bzw. generell in der Nutzung flächenhafter 3D-Daten zu verzeichnen, welche weiter zu forcieren sind um in der gesamten WSV das Potenzial dieser Technik und daraus ableitbarer Produkte abzuschöpfen. Insbesondere im interdisziplinären Dialog sollten hierfür künftig mögliche Einsatzszenarien gemeinsam entwickelt, sowie die bestehenden Bedarfe und Anforderungen klar definiert werden.

Literatur

- Backhausen (2009): Die Messprogramm-Strategie der WSV zur Förderung einer interdisziplinären Zusammenarbeit. Kolloquium der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) – Ingenieurvermessung im Bauwesen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung, Koblenz, Februar 2009, 7–114.
- GDWS (2006): VV-WSV 2602 – Ingenieurvermessung im Bauwesen, Verwaltungsvorschrift, nicht veröffentlicht.
- Holst, C., Schmitz, B., Schraven, A., Kuhlmann, H. (2017): Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2017, 142. Jg., 98–110. DOI: [10.12902/zfv-0158-2017](https://doi.org/10.12902/zfv-0158-2017).
- Kuhlmann, H., Schwieger, V., Wieser, A., Niemeier, W. (2016): Engineering geodesy – definition and core competencies. *J. Appl. Geodesy* 8(4), 327–334.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013): Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26.

Kontakt

Florian Zimmermann | Rainer Krahe | Thomas Artz
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
zimmermann@bafg.de

3D-Punktwolkenbasierte Umgebungserfassung für die Detektion klimarelevanter Immobilienparameter

Jens-André Paffenholz | Anette Eltner | Ulrike Dingerdissen |
Holger Flatt | Harry Fast | Sören Loges | Stefan Ostrau |
Matthias Soot | Alexandra Weitkamp

1 Motivation

Maßnahmen für Klimaschutz und -anpassung sowie zur Energieeinsparung stehen im Fokus aktueller Diskussionen. Der Immobiliensektor trägt dabei maßgeblich zur Treibhausgasemission bei und muss in den kommenden Jahren wesentlich verändert werden, um die notwendigen Einsparungen zu erzielen. Der Gebäudesektor stellt mit 25 % der Gesamtemission an CO₂ einen der wesentlichen Emittenten der Treibhausgase dar. Allein für die Beheizung, Warmwasserbereitung und Kühlung fallen durch den täglichen Verbrauch der Immobilien 14 %, unter Berücksichtigung der Bereitstellung von Energie sogar rund ein Viertel, der Emissionen in Deutschland an. Darüber hinaus verursachen Konstruktion und Abriss der Immobilien einen nicht unerheblichen Anteil an Emissionen (BMUV 2019, S. 50). Zwar hat der Gebäudesektor seit 1990 eine Reduktion der CO₂-Emissionen von 210 Mio. Tonnen auf 120 Mio. Tonnen im Jahr 2021 erreicht, allerdings ist seit 2014 keine wesentliche Abnahme erkennbar. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist eine weitere Halbierung auf ca. 67 Mio. Tonnen bis 2030 notwendig (Hein et al. 2021). Die drohende Gas-mangellage aufgrund des Ukraine-Krieges verschärft die Notwendigkeit des Energieeinsparens.

Eine Wohnimmobilie ist bei ordentlicher Bewirtschaftung ca. 50 bis 100 Jahre wirtschaftlich nutzbar (Kleiber et al. 2014, S. 860 ff.). Jedoch weisen viele Gebäude aufgrund ihres frühen Baujahres keine Wärmeisolation nach heutigem bautechnischem Standard auf. Erst nach der Öl-Krise in den 1970er Jahren wurden erste Gesetzesgrundlagen geschaffen, die eine Gebäudedämmung erforderlich machten. Viele ältere Gebäude wurden noch nicht wesentlich oder zeitgemäß energetisch saniert (Henger et al. 2017). Damit die gesetzten Klimaziele erreicht werden, bedarf es einer zeitnahen Sanierung (ebd.). Nach BMWi (2015, S. 31) wurden 84 % der Wohngebäude vor 1995 errichtet. Entsprechend ist von einem großen Potenzial für die Verbesserung der Klimaeffizienz der Wohngebäude

auszugehen, denn pro unsaniertem Bestandsgebäude mit Baujahr vor 1995 kann im Maximum von einem Einsparpotenzial von 100 bis 150 kWh/m²a ausgegangen werden. Eine Bilanzierung des stadtweiten Potenzials existiert in der Regel nicht.

Da viele Eigentümer:innen die Investitionskosten scheuen oder nicht aufzubringen vermögen, können als Anreize Förderprogramme zu einem beschleunigten Handeln motivieren. Die Sanierung der Immobilie ist mit einer Wertsteigerung verbunden und entsprechend sollte die maximale Förderhöhe nur die durch die Wertsteigerung nicht abgedeckten Kosten umfassen. Hierzu bedarf es weiterer Erkenntnisse über die Auswirkung energetischer Sanierungen auf den Gebäudewert. Zur zielgerichteten Steuerung der Fördermittel durch die Kommune ist neben der Kalkulation der Höhe der notwendigen Fördermittel auch eine Kenntnis über Quartiere mit hohem Sanierungsbedarf notwendig. Diese sollten mit geeigneten Methoden möglichst automatisiert identifiziert werden.

Dieser Beitrag stellt eine umfangreiche Datenerfassung für ein städtisches Quartier einer Mittelstadt vor, die das Ziel hat, klimarelevante Immobilienparameter zu erfassen. Dabei wurde die Geometrie der Gebäude des Quartiers mit verschiedenen scannenden und bildgebenden Verfahren erfasst, so dass in einem ersten Schritt 3D-Punktwolken aus unterschiedlichen Perspektiven und mit unterschiedlichem Detailgrad zur Verfügung stehen. Daneben lag der Fokus auf der Erfassung von Wärmedaten zur Informationsgewinnung über den Zustand der energetischen Sanierung bzw. Dämmung der Gebäude. Zusätzlich wurde das Mikroklima mit lokalen Temperatursensoren an ausgewählten Stellen im Quartier erfasst. Für eine spätere Quantifizierung der Werteinflüsse von energetischen Sanierungen auf die Verkehrswerte der Immobilien erfolgte eine Begehung durch Immobilienexperten. Ausführliche Darstellungen zu diesem zuletzt genannten Aspekt finden sich in Soot et al. (2022). Der Beitrag ordnet im Folgenden kurz die eingesetzten Verfahren der Thermographie und des Laser-scannings im Kontext der eingangs formulierten Zielstellung ein. Anschließend werden das erfasste Quartier sowie exemplarische Ausschnitte der erfassten Daten gezeigt.

2 Einordnung in den Stand der Forschung

Die Thermographie ist ein Verfahren, dass basierend auf bildgebenden Methoden die Anzeige von Oberflächentemperaturen erlaubt. Entsprechend eignet es sich zur Gebäudeinspektion, damit u. a. der Sanierungszustand im Hinblick auf Wärmeverlust beurteilt werden kann (Wild 2007). Erste Anwendungen von Thermischen Infrarot (TIR)-Bildern in Kombination mit Mobile Mapping zur

Erfassung von Fassaden erfolgten bereits Anfang der 2000er Jahre (Hoegner et al. 2007). Die Methode hat sich seitdem stark weiterentwickelt. Es existieren inzwischen verschiedene Verfahren zur Erzeugung von thermischen Fassadenbildern, die terrestrisch aufgenommene 3D-Punktwolken und TIR-Bilder fusionieren z. B. Dlesk und Vach (2019) und Hoegner et al. (2022).

UAV-Plattformen zur Erfassung von thermischen Informationen nehmen ebenfalls an Bedeutung zu (Faye et al. 2022). Im urbanen Raum werden sie bereits genutzt und ihre Anwendung umfassen Straßen- und Gebäudebegutachtung (Westfeld et al. 2015, Hoegner et al. 2016, Nooralishahi et al. 2021) sowie die Erkennung von Wärmebrücken in Fassaden (Ficapal und Mutis 2019).

Eine Herausforderung bleibt die automatische Zuordnung thermischer Bilder zu RGB-Bildern aufgrund der meist niedrigeren Auflösung der TIR-Kamera sowie niedrigerem Kontrast und Textur in den TIR-Bildern. Jedoch zeigen Künstliche Intelligenz (KI)-basierte Bildzuordnungsverfahren ein hohes Potenzial zur Adressierung dieser Herausforderung, was u. a. die Zuordnung von Tag- und Nachtszenen zeigt (Dusmanu et al. 2019).

Zur hochauflösenden, geometrischen Beschreibung der Gebäudestruktur können 3D-Punktwolken mit dem Verfahren des Laserscannings effizient für die weitere Nutzung erzeugt werden. Es existieren verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von 3D-Punktwolken in Abhängigkeit des Sensors und dessen Nutzung z. B. auf einer Plattform, wie das statische terrestrische Laserscanning (TLS), das mobile Laserscanning (MLS) oder das Mobile Mapping Systeme auf fahrenden Plattformen oder handgehaltene Systeme (PLS – Personal Laserscanning), siehe z. B. Holst et al. (2015). Eine weitere Möglichkeit ist das luftgestützt UAV-Laserscanning (ULS). Die Wahl der Erfassungsweise bzw. Plattform orientiert sich am Messobjekt bzw. -gebiet. Hier ergibt insbesondere die Kombination der bodengebundenen, terrestrischen 3D-Punktwolke mit einer luftgestützt erfassten 3D-Punktwolke einen signifikanten Mehrwert in der vollständigen Abdeckung von Gebäuden hinsichtlich der Fassaden und Dächer, siehe u. a. Luhmann et al. (2019). PLS in Kombination mit SLAM (Simultaneous Location and Mapping)-Algorithmen erlauben die flexible Erfassung größerer Gebiete zu Fuß. Beim Einsatz von Laserscanning und SLAM muss bedacht werden, dass aufgrund von Drifterscheinungen der eingesetzten Navigationssensoren sowie potentiell, unzureichendem Informationsgehalt in den 3D-Punktwolken für eine zuverlässige 3D-Punktwolkenregistrierung geringere Genauigkeiten möglich sind. Andererseits erfordert die Erfassung mittels statischem TLS wesentlich längere Datenakquisitionszeiten, so dass bei der Wahl der Erfassungsplattform die Aufgabenstellung, respektive das Ziel, mit seinem erforderlichen Detailgrad im Vordergrund stehen muss bzw. vorab klar bekannt sein sollte.

3 Pilotstudie zur Erhebung wertbeeinflussender Parameter hinsichtlich der Klimaeffizienz

3.1 Das Gebiet der Pilotstudie in Lemgo

Die alte Hansestadt Lemgo ist mit ca. 41.000 Einwohnern eine von insgesamt 181 Mittelstädten in Nordrhein-Westfalen (NRW). Da ca. 45 % (7,6 Mio.) aller NRW-Bürger in Mittelstädten leben, ist die historisch gewachsene Stadt repräsentativ für eine Vielzahl vergleichbarer Städte in NRW und dem gesamten Bundesgebiet. Die Wahl fiel auf Lemgo, da die Stadt mit dem Reallabor Lemgo-Digital über eine Innovationsplattform für die digitale Transformation von Mittelstädten verfügt und sich auf Grund der verfügbaren Internet of Things (IoT)-Infrastruktur im Stadtgebiet (z. B. LoRaWAN sowie Umweltsensoren) für die Durchführung von Forschungsvorhaben in Verbindung mit digitalen Technologien besonders auszeichnet. Zudem existiert ein digitaler Zwilling für das Stadtgebiet.

Basierend auf dem Ziel zur Abschätzung von verschiedenen Baualtern und Sanierungsständen wurde ein Quartier gewählt, dass sowohl sehr inhomogene

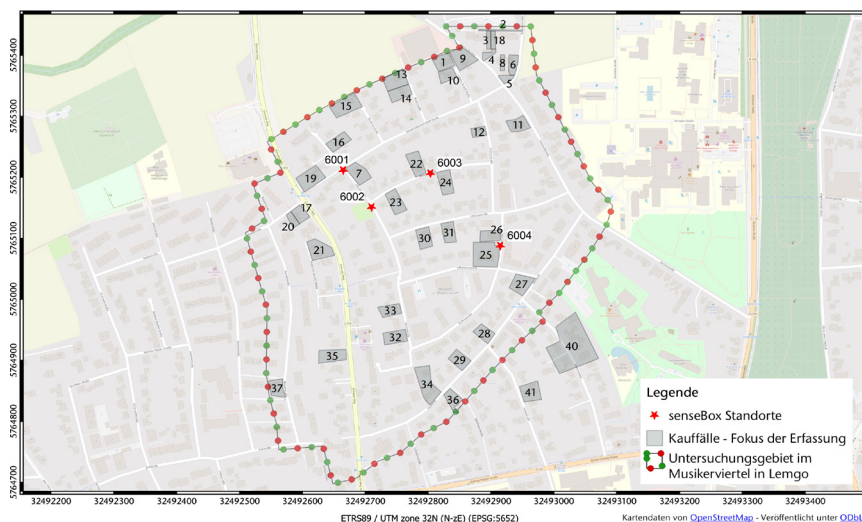


Abb. 1: Übersicht des Beobachtungsgebietes der Messkampagne am 10. März 2022 im Musikerviertel in Lemgo. Das Beobachtungsgebiet ist im Norden durch die Johann-Sebastian-Bach-Straße, im Osten durch den Steinmüllerweg, im Süden durch den Slavertrift und im Westen durch den Entruper Weg begrenzt. Die Kauffälle im Fokus der Erfassung sind nummeriert in grau hervorgehoben. Die Standorte der senseBox-Sensoren zur Erfassung des Mikroklimas sind mit einem Stern gekennzeichnet.

Baujahre der Gebäude, als auch Sanierungsstände aufweist. Als Beobachtungsgebiet wurde das Musikerviertel in [Abb. 1](#) gewählt, das Baualter von den 1930er Jahren bis heute aufweist. Ebenso finden sich in diesem Gebiet Einfamilienhäuser als freistehende Häuser, sowie Reihenhäuser und Doppelhaushälften. Zudem stehen im Gebiet diverse Mehrfamilienhäuser. Das Gebiet hat eine Fläche von ca. 27 ha, was eine vollständige Begehung innerhalb eines Tages erlaubt. Als Jahreszeit wurde der Winter gewählt, um bei möglichst niedrigen Temperaturen während der typischen Heizperiode messen zu können. Um eine erste Machbarkeit einer Superresolution auf andere Stadtquartiere abzuschätzen, wurde als weitere Voraussetzung für die Terminierung der Messkampagne der Überflug des Erdbeobachtungssatelliten Landsat 8 der NASA in Betracht gezogen. Der Erdbeobachtungssatellit Landsat 8 nimmt Bilddaten im optischen sowie im thermal-infraroten Spektralbereich auf; letzterer ist von besonderem Interesse. Der Überflug von Landsat 8 (Path 195, Row 24) erfolgte am Beobachtungstag, dem 10. März 2022, um 11:15 h (MEZ).

3.2 Erfassung der Geometrie mit scannenden und bildgebenden Verfahren zur Ableitung von 3D-Punktwolken

Die Geometrie des Stadtquartiers wurde mit vier primär scannenden bzw. ergänzenden bildgebenden Verfahren aus unterschiedlichen Perspektiven und mit unterschiedlichem Detailgrad erfasst: (1) der mobile, handgehaltene Laser-scanner ZEB-Horizon der Firma GeoSLAM, (2) der mobile, getragene Sensor VLX 2.0 der Firma NavVis, (3) der statisch eingesetzte terrestrische Laserscanner Zoller+Fröhlich (Z+F) IMAGR 5016 und (4) eine DJI Matrice 300 RTK mit einem Zenmuse L1-Modul zur 3D-Punktwolkenerfassung als Nutzlast. Für Details zu den eingesetzten Sensoren bzw. Sensorsystemen wird auf die Datenblätter der jeweiligen Hersteller verwiesen. Für die Geo-Referenzierung der 3D-Punktwolken sowie die Korrektur der Drifts der mobilen, getragenen Sensorsysteme wurden im Vorfeld markierte, mit RTK-GNSS bestimmte Passpunkte genutzt.

Der ZEB-Horizon erfasst Punkte mit einer Geschwindigkeit von 300 kHz und Genauigkeiten von 1 cm bis 3 cm (laut Hersteller). Insgesamt wurden vier Datensätze aufgezeichnet. Die einzelnen Begehungszeiten betrugen zwischen 16 min und 22 min. Es wurde auf Schleifenschlüsse geachtet, indem Start- und Zielpunkt zusammenfielen. Die erzielten Genauigkeiten der Geo-Referenzierung betrugen zwischen 4 cm und 11 cm.

Mit dem NavVis VLX 2.0 wurde in fünf separaten Abschnitten das Messgebiet erfasst. Im Rahmen der Auswertung im Post-processing mittels der Cloud-Lösung NavVis IVION wurde ein Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Ansatz genutzt und eine geo-referenzierte, eingefärbte 3D-Punktwolke

mit einer Auflösung von 5 mm am Objekt berechnet. Abb. 2 zeigt einen exemplarischen Straßenausschnitt der Johann-Sebastian-Bach-Straße im Norden des Quartiers.

Die Erfassung mit dem Z+F IMAGER 5016 wurde von 22 festen Standpunkten für den nördlichen Bereich des Messgebietes (Johann-Sebastian-Bach-Straße) und mit 22 festen Standpunkten für den südlichen Bereich des Messgebietes (Slavetrift) mit den Erfassungsparametern für die Auflösung High und

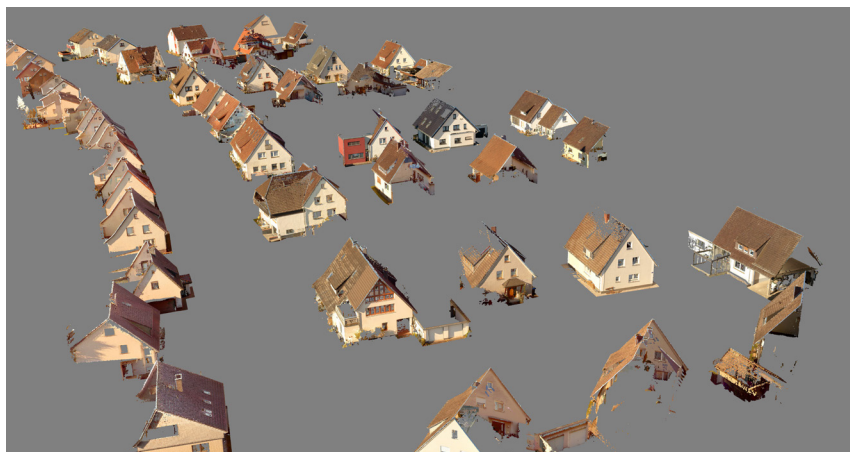


Abb. 2: 3D-Punktwolke der Gebäude in der Johann-Sebastian-Bach-Straße im Norden des Quartiers – erfasst mit dem NavVis VLX 2.0

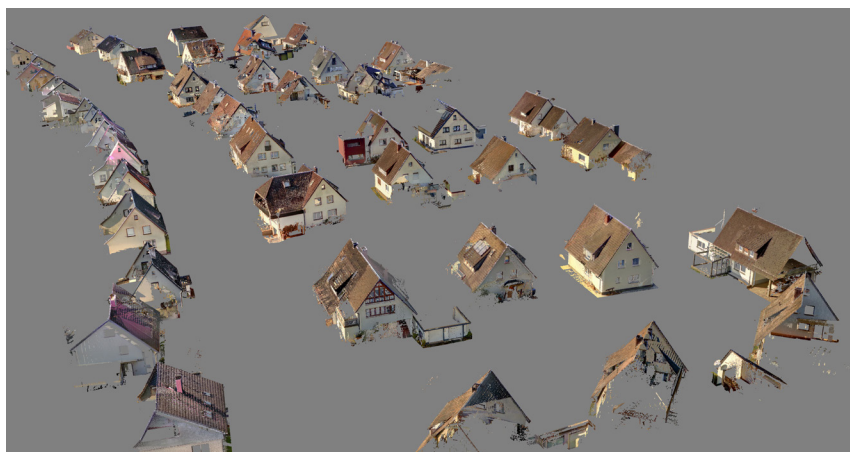


Abb. 3: 3D-Punktwolke der Gebäude in der Johann-Sebastian-Bach-Straße im Norden des Quartiers – erfasst mit dem Z+F IMAGER 5016

Quality+ (entspricht 14 rps also Umdrehungen des Ablenkspiegels bei einer Lasermessrate von 137 kHz und einer Scandauer von 6:06 min) durchgeführt. Die Geo-Referenzierung der 3D-Punktwolken erfolgte ebenfalls über die GNSS-Passpunkte und lieferte ein Ergebnis von 1 cm bis 2,4 cm und entspricht somit den Erwartungen bei mit RTK-GNSS bestimmten Passpunkten. In [Abb. 3](#) ist der bereits aus [Abb. 2](#) bekannte Straßenausschnitt der Johann-Sebastian-Bach-Straße im Norden des Quartiers für den Z+F IMAGER 5016 dargestellt.

Um neben der Erfassung von Fassaden auch detaillierte Informationen über die Geometrie der oberen Gebäudestruktur zu erhalten, wurde das Untersuchungsgebiet mittels des UAV DJI Matrice 300 RTK befliegen. Die zur Erfassung der detaillierten 3D-Punktwolke eingesetzte Nutzlast Zenmuse L1 hat eine Systemgenauigkeit von horizontal respektive vertikal von 10 cm und 5 cm bei einer Flughöhe von 50 m. Die Erfassung der 3D-Punktwolke erfolgte durch eine zweitägige Befliegung auf einer Flughöhe von 85 m durch Schrägaufnahmen im 85°-Winkel. Es wurde eine Kreuzbefliegung in 5 Richtungen durchgeführt. Pro Richtung beträgt die Auflösung ca. 166 Punkte pro m², vgl. [Abb. 4](#) für einen Ausschnitt des Quartiers im Bereich der Johann-Sebastian-Bach-Straße.

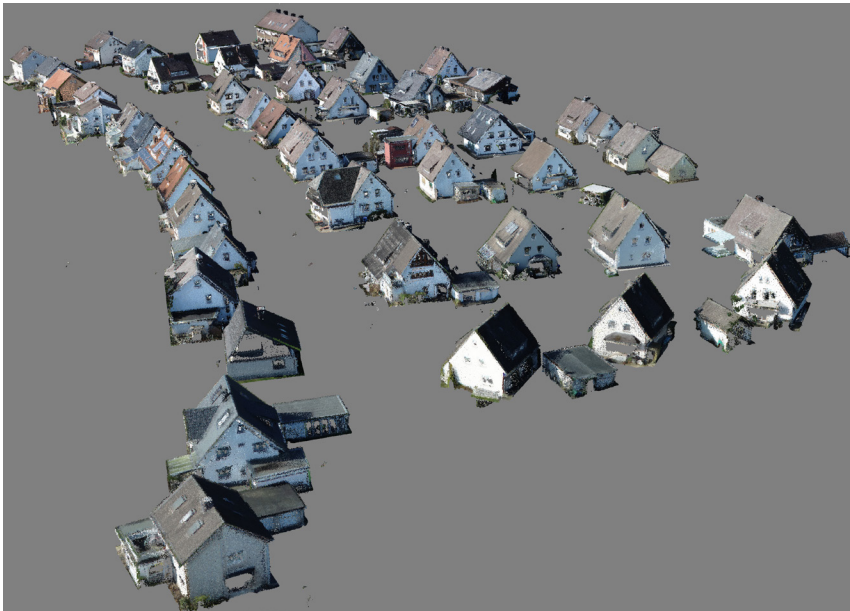


Abb. 4: 3D-Punktwolke der Gebäude in der Johann-Sebastian-Bach-Straße im Norden des Quartiers – erfasst mit der UAV DJI Matrice 300 RTK und der Nutzlast Zenmuse L1

3.3 Erfassung von Wärmeinformationen

Die Erfassung der Wärmedaten dient der Informationsgewinnung über den Zustand der energetischen Gebäudesanierung bzw. -dämmung. Hierzu wurde zum einen das Mikroklima in Form der Temperatur sowie weiterer Umgebungsparameter an vier ausgewählten Standorten im Quartier (vgl. Abb. 1) mit Low-Cost-Sensoren vom Typ senseBox der Firma Reedu GmbH & Co. KG. erfasst. Die einzelnen Gebäude im Quartier wurden mit einer video-optischen und einer TIR-Kamera (VarioCAM HDx head 610) aufgenommen. Das eingesetzte TIR-System ist in der Lage Bilder mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln (Pixelgröße: $17 \mu\text{m}$) bei einer thermischen Auflösung von min. 30 mK zu erfassen. Entsprechend hochaufgelöst können Temperaturunterschiede gemessen werden. Die absolute Temperaturmessgenauigkeit ist jedoch wesentlich niedriger und liegt in der Größenordnung von $\pm 2^\circ\text{C}$. Die verwendete Brennweite betrug 10 mm . Die Bilder wurden in annähernd senkrechter Orientierung zu den Fassaden in Abständen von ca. 10 bis 25 m zu den Gebäuden aufgenommen. Die resultierende Bodenauflösung der Pixel beträgt zwischen 17 und 43 mm. Diese hohe Auflösung erlaubt ein sehr differenziertes Bild der Temperaturverteilung auf den Fassaden und Dächern der Gebäude.



Abb. 5: Wärmeverteilung im Quartier. Hierbei stehen die magenta eingefärbten Bereich für kältere Temperaturen, wohingegen die über rot nach gelb eingefärbten Bereiche für wärmere Temperaturen stehen. Aus dieser thermischen Aufnahme lassen sich erste flächenhafte Erkenntnisse sowohl über individuelle Gebäude als auch über das Quartier als solches ableiten.

Zusätzlich ist das Quartier parallel zu den terrestrischen Erfassungsmethoden mit einem UAV DJI Matrice 300 RTK befliegen worden. Die zur Erfassung der detaillierten Wärmeinformation eingesetzte Nutzlast ist die Zenmuse H20T, welche unter anderem eine radiometrische Wärmebildkamera mit einer Auflösung von 640×512 Pixel umfasst. Hier wurde in zwei Flughöhen befliegen. Die Bodenauflösung der Pixel beträgt $10,67 \text{ cm @ } 120 \text{ m}$ Flughöhe bzw. $5,78 \text{ cm @ } 65 \text{ m}$ Flughöhe. Die Ergebnisse der Befliegung sind Thermalaufnahmen die im .jpg-Format gespeichert werden sowie berechnete Orthophotos mit einer thermischen Auflösung von $\min < 50 \text{ mK}$. Abb. 5 zeigt im Überblick die Wärmeverteilung für das Quartier.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Immobiliensektor trägt maßgeblich zur Treibhausgasemission bei und muss daher in den kommenden Jahren wesentlich verändert werden, um die notwendigen Einsparungen zu erzielen. In diesem Beitrag wurden die im Rahmen einer Pilotstudie für ein Quartier einer Mittelstadt primär mit Laserscannern erfassten geometrischen Informationen sowie Wärmeinformationen vorgestellt.

Die terrestrischen TIR-Bilder lassen vielfältige Rückschlüsse auf die Baualterklasse und den Sanierungsstand zu. Dies ist aufgrund der Außensicht limitiert; innen vorgenommene Maßnahmen wie die Erneuerung einer Heizungsanlage können nicht erfasst werden.

Die erfassten 3D-Punktwolken stellen im Rahmen ihrer Fusion zu einer homogenen 3D-Punktwolke aus den unterschiedlichen Erfassungssystemen verbunden mit unterschiedlichen Aufnahmegeometrien und Unsicherheiten einen Forschungsaspekt dar. Der Fokus liegt auf der Herausforderung der Ableitung u. a. der Wandstärke der Gebäude aus den 3D-Punktwolken und der Verknüpfung mit der intersubjektiven Einschätzung der Immobilienexperten. Der schrägen Sicht der terrestrisch erfassten 3D-Punktwolken auf ein Fenster kommen dabei eine große Bedeutung zu, da der Einfallswinkel der Laserstrahlen seitlich auf die Fensteröffnung fällt und sich somit potentiell ein Maß für die Wandstärke bzw. Fensterleibung ableiten lässt. Weiterhin wird ein Schwerpunkt der weiteren Analysen der 3D-Punktwolken in der Betrachtung der Rauigkeit und des Abstrahlverhaltens zur Informationsgewinnung über Unterschiede in den Baumaterialien liegen.

Die Daten des Quartiers sind im Zuge eines Kooperationsprojektes der TU Clausthal, der TU Dresden, dem Fraunhofer IOSB-INA sowie der Geoinformationsbehörde des Kreises Lippe und dem Gutachterausschuss für Grundstückswerte im Kreis Lippe und in der Stadt Detmold erfasst worden. Weitere Information insbesondere unter Einbeziehung der Aspekte und ersten Resultate aus der Begehung durch Immobilienexperten finden sich in Soot et al. (2022).

Literatur

- BMUV (Bundesministerium für Umwelt und Verbraucherschutz) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude – Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand. Eigenverlag.
- Dlesk, A., Vach, K. (2019): Point cloud generation of a building from close range thermal images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 42(5/W2), 29–33. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-29-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-29-2019).
- Dusmanu, M., Rocco, I., Pajdla, T., Pollefeys, M., Sivic, J., Torii, A., Sattler, T. (2019): D2-Net: A Trainable CNN for Joint Description and Detection of Local Features. *CVPR*.
- Faye, E., Jolivot, A., Théau, J., Regnard, J.-L., Gómez-Candón, D. (2022): Thermal-infrared imaging. In: Eltner, A., Karrasch, P., Stöcker, C., Klingbeil, L., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Rovere, A. (Ed.): *UAVs in Environmental Sciences – Methods and Applications*. WBG Academic, 492 pages.
- Ficapal, A., Mutis, I. (2019): Framework for the detection, diagnosis, and evaluation of thermal bridges using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. *Buildings*, 9(8). DOI: [10.3390/buildings9080179](https://doi.org/10.3390/buildings9080179).
- Hein, F., Litz, P., Grauchen P. (2021): Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021. *Agora Energiewende* 227/04-A-2021/DE.
- Henger, R., Runst, P., Voigtländer, M. (2017): *Energiewende im Gebäudesektor – Handlungsempfehlungen für mehr Investitionen in den Klimaschutz*. 119.
- Hoegner, L., Kumke, H., Meng, L., Stilla, U. (2007): Automatic extraction of textures from infrared image sequences and database integration for 3d building models. *PFG Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation* 2007(6): 459–468.
- Hoegner, L., Tuttas, S., Xu, Y., Eder, K., Stilla, U. (2016): Evaluation of methods for co-registration and fusion of RPAS-based 3D point clouds and thermal infrared images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives*, 41, 241–246. DOI: [10.5194/isprsarchives-XLI-B3-241-2016](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B3-241-2016).
- Hoegner, L., Zhu, J., Xu, Y., Stilla, U. (2022): Generierung von thermischen Punktwolken von Gebäuden aus Infrarotbildsequenzen und MLS-Punktwolken. In: Luhmann, T., Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage*, 422 Seiten, vde-Verlag.
- Holst, C., Kuhlmann, H., Paffenholz, J.-A., Neumann, I. (2015): TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz. In: DVW e. V. (Hrsg.): *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS 2015)*. DVW-Schriftenreihe, Band 81, Wißner-Verlag, Augsburg, 9–26.
- Kleiber, W., Simon, J., Weyers, G. (2014): *Verkehrswertermittlung von Grundstücken: Kommentar und Handbuch zur Ermittlung von Marktwerten (Verkehrswerten), Versicherungs- und Beleihungswerten unter Berücksichtigung der ImmoWertV*. Köln: Bundesanzeiger-Verlag.

- Luhmann, T., Chizhova, M., Gorkovchuk, D., Hastedt, H., Chachava, N., Lekveishvili, N. (2019): Combination of terrestrial laserscanning, uav and close-range photogrammetry for 3d reconstruction of complex churches in Georgia, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 753–761. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W11-753-2019).
- Nooralishahi, P., Ibarra-Castanedo, C., Deane, S., López, F., Pant, S., Genest, M., Avdelidis, N. P., Maldague, X. P. V. (2021): Drone-based non-destructive inspection of industrial sites: A review and case studies. In: *Drones* (Vol. 5, Issue 4). MDPI. DOI: [10.3390/drones5040106](https://doi.org/10.3390/drones5040106).
- Soot, M., Dingerdissen, U., Eltner, A., Flatt, H., Fast, H., Loges, S., Ostrau, S., Paffenholz, J.-A., Weitkamp, A. (2022): Vorstudie zu wertbeeinflussenden Parametern hinsichtlich der Klimaeffizienz von Wohngebäuden. In: *allgemeine vermessungs-nachrichten (avn)*, 129. Jg., Heft 5, 163–178.
- Westfeld, P., Mader, D., Maas, H.-G. (2015): Generation of TIR-attributed 3D Point Clouds from UAV-based Thermal Imagery. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, Vol. 2015(5): 381–393.
- Wild, W. (2007): Application of infrared thermography in civil engineering. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, 13, 436–444.

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jens-André Paffenholz
Institute of Geo-Engineering, Technische Universität Clausthal
Erzstraße 18, 38678 Clausthal-Zellerfeld
jens-andre.paffenholz@tu-clausthal.de

Terrestrisches Laserscanning (TLS) – ein Thema, das die geodätische Fachwelt nun schon seit vielen Jahren beschäftigt und auch zukünftig beschäftigen wird. Getrieben von messtechnischen Weiterentwicklungen, fortschrittlichen Automatisierungsmöglichkeiten in der Erstellung von Laserscans und immer effizienter werdenden Softwareprogrammen zur Analyse der Massendaten, ist der Laserscanner mittlerweile ein Standardinstrument der geodätischen Praxis.

Dieser Tagungsband greift insbesondere die Themenfelder Scanning mit Qualitätssicherung, Scanning natürlicher Oberflächen, Scanning heute und morgen und Scanning der bebauten Umwelt auf.



ISBN: 978-3-95786-329-4



9 783957 863294

Schriftenreihe des DVW
Band 104 / 2022
Printversion: 29,60 Euro
PDF: kostenfrei
www.geodaesie.info

