



23. 3D-Tage in Dresden

25. und 26. Februar 2026

Lennart Hildebrandt,
Ferdinand Maiwald,
Danilo Schneider,
Till Sieberth
(Hrsg.)

Publikationen

der Deutschen Gesellschaft für
Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation e.V.



2026

Beiträge

23. 3D-Tage in Dresden

25. und 26. Februar 2026

M. Eng. Lennart Hildebrandt
Prof. Dr.-Ing Ferdinand Maiwald
Prof. Dr.-Ing Danilo Schneider
Prof. Dr.-Ing Till Sieberth

DOI beantragt

Hrsg.

Publikation der
Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
23. 3D-Tage, Dresden und Oldenburg 2026
Hrsg.: Lennart Hildebrandt, Ferdinand Maiwald, Danilo Schneider, Till Sieberth

© Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung
und Geoinformation (DGPF) e.V.
Stuttgart 2026

Geschäftsstelle der DGPF
c/o Universität Stuttgart
Institut für Photogrammetrie (ifp)
Geschwister-Scholl-Str. 24D
70174 Stuttgart
E-Mail: geschaeftsstelle@dgpf.de

Redaktion:

Lennart Hildebrandt
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fakultät Geoinformation
Professur für Photogrammetrie
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
E-Mail: lennart.hildebrandt@htw-dresden.de

Ferdinand Maiwald
Technische Universität Dresden
Professur für Optische 3D-Messverfahren
Hülße-Bau, Westflügel W235, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden
E-Mail: ferdinand.maiwald@tu-dresden.de

Danilo Schneider
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fakultät Geoinformation
Professur für Photogrammetrie
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
E-Mail: danilo.schneider@htw-dresden.de

Till Sieberth
Jade Hochschule
Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik (IAPG)
Fachbereich Bauwesen Geoinformation Gesundheitstechnologie
Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg
E-Mail: till.sieberth@jade-hs.de

Vorwort

Dieser Tagungsband fasst die Beiträge der 23. *3D-Tage* in Dresden zusammen, die zum ersten Mal in gemeinsamer Organisation der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, der Technischen Universität Dresden, der Jade Hochschule Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth am 25./26.2.2026 an der HTW Dresden durchgeführt wurden. Mit mehr als 200 Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurden Teilnehmerzahlen vergleichbar mit der Ausrichtung in Oldenburg erreicht und zeigen erneut die Bedeutung für die Fachcommunity und deren Zusammenhalt. In 40 Fachvorträgen wurde das breite Anwendungsspektrum von Photogrammetrie, Laserscanning und optischer 3D-Messtechnik behandelt.

Ein besonderes Merkmal der *3D-Tage* ist die Mischung von aktueller Forschung mit anwendungsorientierten Berichten und Produktinformationen. Die Vorträge zeichnen sich durch ihr breites Themenspektrum aus. Dies erlaubt den Teilnehmerinnen und Teilnehmern einmal mehr, über ihre eigenen Grenzen zu schauen und neue Ideen oder Anwendungsfelder zu erschließen. Mit Unterstützung von externen Kolleginnen und Kollegen konnten wieder Vortragssitzungen mit speziellen Themenschwerpunkten organisiert werden. Dadurch gewinnen die 3D-Tage einen noch aktuelleren fachlichen Fokus und binden gleichzeitig aktiv in der Thematik stehende Fachleute ein.

Dabei konnte insbesondere der Bereich Kulturerbe mit zwei dezidierten Sessions (Heidi Hastedt, Oldenburg und Anette Eltner, Dresden) zeigen wie groß die Bedeutung der Optischen 3D-Vermessung in diesem Bereich ist. Zusätzlich wurde eine spezielle Nachwuchs-Session (Robin Rofallski, Oldenburg) mit Ergebnissen aktueller studentischer Abschlussarbeiten und Projekten angeboten. Auch der Kompetenzkreis Industrievermessung (KKIV) war wieder mit einer Session vertreten (Jens Hartmann, Dessau) als auch das 3D Digitalisierungsnetzwerk „AG3D“ (Robert Päßler, Dresden). Weitere Sessions umfassten vielseitige Themen aus den folgenden Bereichen:

- Ingenieurgeodäsie (Robin Ullrich, Dresden)
- Laserscanning und Punktwolkenverarbeitung (Daniel Wujanz, Berlin)
- KI in der O3D-Messtechnik (Ferdinand Maiwald, Dresden)
- Photogrammetrische Messtechnik (Anwendung) (Martina Göring, Oldenburg)
- Photogrammetrische Messtechnik (Grundlagen) (Thomas Luhmann, Oldenburg)
- Qualitätskontrolle im Bauwesen /BIM (Christian Clemen, Dresden)
- Immersive Visualisierungstechniken (Melanie Elias, Dresden)

In diesem Tagungsband werden die schriftlichen Beiträge zu den Themensitzungen zusammengefasst, soweit sie eingereicht worden sind.

Auf der Homepage der Oldenburger 3D-Tage (<https://www.photogrammetrie.de/3dtage>) können die Präsentationen der Vorträge heruntergeladen werden. Die Beiträge in diesem Band unterliegen keinem strengen inhaltlichen Begutachtungsprozess und können sich daher in Qualität und Umfang unterscheiden.

Für die erfolgreiche Durchführung des Workshops und die Realisierung dieses Tagungsbandes sei allen Beteiligten gedankt, besonders allen Autorinnen und Autoren, Teilnehmerinnen und Teilnehmern und Sponsoren.

Oldenburg & Dresden, Mai 2026

Lennart Hildebrandt

Ferdinand Maiwald

Danilo Schneider

Till Sieberth

INHALTSVERZEICHNIS

INGENIEURGEODÄSIE

- ROBIN ULLRICH & EMANUEL SCHÜTZ:**
Aktuelle Trends beim berührungslosen Lasertracking 1
- MARTINA GÖRING:**
Geometrieerfassung und Profilschnittberechnung von Rotorblättern großer Windenergieanlagen
mittels terrestrischem Laserscanning 8
- CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT, CHRISTOPH MUNKELT, MATTHIAS HEINZE, INGO GEBHART,
PETER KÜHMSTEDT & GUNTHER NOTNI:**
Hochgenaue 3D-Erfassung großer Messvolumina bei der kaltplastischen Umformung
großer Bleche mittels optischer Sensorik 15

KULTURERBE I

- MALTE MARSMANN, THOMAS P. KERSTEN & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA:**
Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen von aktuellen kostengünstigen 3D-Handscannern 21
- AMANDINE COLSON, FREDERIC THEIS, DENNIS HOFFMANN, LUCA JUNGE, ANTJE SCHMIDT
& SEBASTIAN VEHLKEN:**
Die Digitale Dokumentation von S.M. U-16. Ein Modellfall für digitalgestütztes Forschen,
Sammeln und Ausstellen maritimer Großobjekte 32
- JOST-MICHAEL BROSER:**
Meydenbauers Messbilder und Punktwolken – ein nützliches Duo für die bauhistorische Forschung ... 37

LASERSCANNING UND PUNKTWOLKENVERARBEITUNG

- MARTIN GRANER:**
Von Scandaten zu visualisierten Punktwolken 46
- STEFAN BINAPFL, ROBERT BLASKOW & FERDINAND MAIWALD:**
Evaluierung des Genauigkeitspotentials der PLS-Systeme GeoSLAM ZEB Horizon und
Leica BLK2GO für die Erfassung einer komplexen Maschinenhalle 50
- NIKOLAUS STUDNICKA & FLORIAN PÖPPL:**
Integration statischer und kinematischer TLS-Daten: Evaluierung des RIEGL VZ-600i 58

NACHWUCHSFORUM

DENNIS BIBOW, JONAS SACKMANN, TOBIAS WEIMER & MARTINA GÖRING: Photogrammetrische Untersuchung von Verknüpfungspunkten für die relative Orientierung	64
JAN KUHLMANN & THOMAS WIEMANN: CHAD TSDF: TSDF Submapping mit Schleifenschluss und hoher Kompression mittels Knoten-Hashing	73
PAUL HINDORF: Kombinierter Einsatz von künstlicher Intelligenz und Time-Lapse-Photogrammetrie für die robuste Epochenregistrierung im geomorphologischen Monitoring	80

KULTURERBE II

THOMAS REUTER: 20 Jahre in Drei Dimensionen – Rückblick und Perspektiven der 3D- Funddokumentation mittels Nahbereichsscannern im Landesamt für Archäologie Sachsen	87
LEONIE SCHRÖDER, THOMAS P. KERSTEN & KLAUS MECHELKE: Untersuchungen zum Einsatz von Low-Cost-3D-Handscannern für archäologische sabäische Fundstücke	94

INDUSTRIEVERMESSUNG (KKIV)

CYRILL MILKAU, SEBASTIAN PREUSSEL, HANS-GERD MAAS & DANILO SCHNEIDER: Bildgestützte Lokalisierung von Zielkörpern in der Strahlentherapie	105
TINE MARQUARDT, TOBIAS LAPPAN, KERSTIN ECKERT & SASCHA HEITKAM: Stereophotogrammetrische Messung von Schaumhöhen in Flotationsprozessen	114

PHOTOGRAMMETRISCHE MESSTECHNIK (ANWENDUNG)

HARTMUT CLAUSS: Genauigkeitsanalyse photogrammetrischer 3D-Digitalisierung durch transparente Objektträger	122
HANNES SARDEMANN, CHRISTIAN MULSOW, LAURE-ANNE GUEGUEN, GOTTFRIED MANDLBURGER & HANS-GERD MAAS: Simultane Bestimmung von non-planarer Wasseroberfläche und Unterwasserpunkten mit Mehrmedienphotogrammetrie	130
DANIEL WUJANZ, FELIX GRUNER & FRANK GIELSDORF: SLAMergency - Adaptive correction of distorted SLAM-scans	136

AG3D

FLORIAN THIERY, MEGAN-NICOLE KASTEN, ANNE-KAROLINE DISTEL & PETER ALOIS THIERY: Cultural Heritage as FAIR Digital Object? 3D Capturing and Semantic Interlinking of Heritage Objects in Ireland and Scotland	142
FLORIAN THIERY: From Pocket to Knowledge Graph: Low-Cost 3D Capturing with Smartphones and Semantic FAIR Modelling in the SquirrelBase	150

PHOTOGRAMETRISCHE MESSTECHNIK (GRUNDLAGEN)

FRANK LIEBOLD & HANS-GERD MAAS: Zur Korrektur von Exzentrizitäten bei der Bildellipsenmessung von Kugeln und Kreisen in der zentralperspektiven Abbildung	158
CHRISTIAN BRÄUER-BURCHARDT, CHRISTOPH FREITAG, ROLAND RAMM, MATTHIAS HEINZE, CHRISTOPH MUNKELT, PETER KÜHMSTEDT & GUNTHER NOTNI: Erweiterung des klassischen Lochkameramodells für die Verwendung von Ultra-Weitwinkelobjektiven bei der 3D-Rekonstruktion	169
ELLEN SCHWALBE & DANILO SCHNEIDER: Geometrische Modellierung und Kalibrierung eines rotierenden 360°-Panoramakamerasystems mit Flächensensor	175

KI IN DER O3D-MESSTECHNIK

MICHAEL KÖGEL & DIRK CARSTENSEN: Nahezeit Change Detection Tool für die photogrammetrische Hochwasservorsorge	183
---	-----

QUALITÄTSKONTROLLE IM BAUWESEN / BUILDING INFORMATION MODELING

LARS SÖRENSEN & THEO HASCHKE: BIM2water – 3D Bestandsmodelle für den Wasserbau im Konflikt zwischen der BIM-Methode und den Genauigkeitsanforderungen für die Fertigung oder hydraulische Modelle	190
VOLKER WEGENER: Eisenbahngeodäsie: Mobile Mapping / Digitaler Zwilling mit ± 5 mm bei 80 km/h	194
ALEXANDER BONG, ENRICO ROMANSCHKE & CHRISTIAN CLEMEN: Welchen Einfluss hat die kartographische Projektion auf die TLS-Registrierung?	198
JOACHIM BANK & MARC ZSCHIESCHANG: Modellbasierte visuelle Qualitätskontrolle: Methoden & Workflows auf Basis von 3D-Vermessungsdaten	204

IMMERSIVE VISUALISIERUNGSTECHNIKEN

GUNNAR SIEDLER, SEBASTIAN VETTER & JENS KAMINSKY

Digitale Kartierung – Ein Entwicklungsprozess von Methoden für 2D/3D Objektdokumentation,
Auswertung, Analyse und Abrechnung 211

MARTIN HESSE & ANDREAS NÜCHTER

Erhöhung der Präzision bei der Standortbestimmung mittels LiDAR Sensoren durch die
Integration einer Grundkarte 220

Aktuelle Trends beim berührungslosen Lasertracking

Robin Ullrich¹ & Emanuel Schütz¹

Zusammenfassung

Der Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen berührungslos arbeitender Industriemesssysteme und deren Einsatzpotenzial in der industriellen Qualitätssicherung. Moderne scannende Lasertracker kombinieren interferometrische Distanzmessverfahren mit hochpräziser Winkelmessung und ermöglichen dadurch die automatisierte Erfassung komplexer Geometrien mit hoher Genauigkeit. Besonders für großdimensionierte Bauteile des Schienenfahrzeug-, Automobil- und Schiffbaus eröffnen diese Systeme neue Möglichkeiten einer effizienten und flexiblen Geometrieerfassung. Am Beispiel der Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen wird dargestellt, inwieweit klassische taktile Messprozesse durch berührungslose Verfahren ersetzt oder ergänzt werden können. Experimentelle Untersuchungen mit einem Leica ATS600 zeigen, dass unter geeigneten Randbedingungen Messgenauigkeiten im Submillimeterbereich erzielt werden können. Gleichzeitig wird deutlich, dass Faktoren wie Einfallswinkel, Messdistanz und Oberflächenmaterial einen wesentlichen Einfluss auf die resultierende Scanqualität besitzen. Zur Bewertung und Optimierung automatisierter Messstrategien wurde daher ein simulationsgestütztes Verfahren zur Standpunktplanung entwickelt. Die Ergebnisse verdeutlichen insgesamt das Potenzial scannender Lasertracker für die automatisierte industrielle Qualitätssicherung und unterstreichen deren wachsende Bedeutung im Kontext zukünftiger Produktions- und Prüfprozesse.

Schlagwörter Lasertracking, Laser Radar, Laserscanning, Industrievermessung, Qualitätssicherung, Schienenfahrzeuge

1 Einführung

Bei genauer Betrachtung des Beitragstitels stellt sich zwangsläufig die Frage, ob zwischen den Begriffen „berührungslos“ und „Lasertracking“ nicht ein Widerspruch besteht. Unter Lasertracking wird ein grundlegendes polares Messprinzip verstanden, das meist unter Verwendung eines Interferometers sowie motorisierter Komponenten zum Nachführen des Fernrohrs, einen Reflektor hochfrequent verfolgt und durchgängig Koordinaten aufzeichnet (vgl. Möser et al., 2012). Dieses Prinzip setzt somit ein korrespondierendes Ziel voraus und kann daher nicht vollständig berührungslos erfolgen.

Der gewählte Beitragstitel soll demnach nicht das grundlegende Messprinzip beschreiben, sondern vielmehr auf eine moderne Instrumentenkategorie verweisen, die dem Anwendungsspektrum klassischer Lasertracker zuzuordnen ist und mit vergleichbaren Genauigkeiten berührungslos Messdaten liefert. Einige dieser Instrumente ermöglichen sowohl berührungslose als auch taktile Messungen.

Berührungslose Messverfahren gewinnen in der industriellen Messtechnik zunehmend an Bedeutung, da sie eine effiziente und hochpräzise Erfassung komplexer

Geometrien ermöglichen. Dies gilt insbesondere für Messobjekte mit Ausdehnungen von wenigen Metern bis hin zu mehreren zehn Metern in Länge, Breite und Höhe. Typische Anwendungsfelder finden sich beispielsweise in der Automobilindustrie, bei der Produktion von Schienenfahrzeugen sowie im Schiffbau.

Bei berührungslos arbeitenden polaren Messsystemen stellt der Anteil der Distanzmessung an der Gesamtmessunsicherheit häufig den genauigkeitslimitierenden Faktor dar. Moderne Messsysteme nutzen daher interferometrische Distanzmessverfahren in Kombination mit hochauflösender Winkelmess-technik. Dadurch ist die hochfrequente Bestimmung drei-dimensionaler Koordinaten auch ohne korrespondierendes Ziel möglich. Durch eine entsprechend ausgelegte Motorisierung (z. B. mit Piezo-Technologie) können dabei nicht nur Einzelpunkte, sondern auch flächenhafte Informationen in Form dichter Punktwolken erfasst werden.

Im Gegensatz zu klassischen Laserscannern arbeiten diese Systeme nach dem Prinzip des selektiven Scannings. Dabei definiert der Anwender die zu erfassenden Bereiche sowie die gewünschte Punktdichte gezielt. Dies erfolgt beispielsweise auf Grundlage von CAD-Daten oder Kamerabildern. Durch dieses Vorgehen kann die Datenmenge effizient reduziert werden, während der Fokus gleichzeitig z. B.

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland, E-Mail: robin.ullrich@htw-dresden.de; emanuel.schuetz@htw-dresden.de

auf die für die Funktionssicherheit des Produkts relevanten Geometrielemente gelegt wird. Aufwendige Messaufbauten, mechanische Adapter oder physische Zielmarken können dadurch reduziert oder sogar vollständig umgangen werden.

Gleichzeitig erlauben die hohen Scanraten und die Automatisierbarkeit eine Integration in industrielle Fertigungsprozesse, etwa in Inline- oder Nearline-Produktionsketten. Dies führt zu einer Verkürzung der Messzeiten und einer Steigerung der Produktivität. Insbesondere im Rahmen kontinuierlicher Qualitätsüberwachungen können Prozessabweichungen frühzeitig erkannt und Nacharbeit sowie Ausschuss reduziert werden.

Darüber hinaus eröffnet die hohe Flexibilität hinsichtlich der Instrumentenposition und Einsatzumgebung zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten bei der Erfassung komplexer Bauteile. So können die Systeme beispielsweise auch in Kombination mit Linearschienen oder Industrierobotern betrieben werden. Sie stellen somit einen modernen Baustein zur Automatisierung und Effizienzsteigerung industrieller Produktionsprozesse dar.

Der Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle Messsysteme und zeigt anhand eines Beispiels aus der Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen eine praxisrelevante Anwendung auf.

2 Grundlagen

2.1 Industrielle Messsysteme

Aktuelle Vertreter berührungslos arbeitender 3D-Koordinatenmesssysteme sind unter anderem die Systeme Leica ATS800, Nikon APDIS und API Dynamic 9D LADAR (Abb. 1). Alle Systeme basieren auf einem polaren Messprinzip, bei dem interferometrisch bestimmte Distanzen mit hochpräzisen Winkelmessungen kombiniert werden. Gemeinsam ist diesen Systemen die Fähigkeit, mithilfe scannender Messverfahren hochaufgelöste Punktwolken zu erzeugen und komplexe Geometrien effizient zu erfassen.

Das Nikon APDIS (Automated Precision Data and Inspection System) wird vom Hersteller auch als Laser-Radar bezeichnet und ist das am längsten verfügbare System unter den genannten Instrumenten. Es nutzt ein Heterodyn-Interferometer mit einem frequenzmodulierten Infrarotlaser (Wellenlänge ca. 1550 nm). Die Distanzbestimmung erfolgt über die Auswertung der Frequenzdifferenz zwischen Sende- und Empfangssignal, wodurch eine Messgenauigkeit von $20 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}/\text{m}$ (MPE) bei Reichweiten bis zu 50 m erzielt wird. Ergänzt wird das System durch eine integrierte Kamera, die sowohl der Messdaten-Visualisierung als auch

der Identifikation von Geometriemerkmalen dient. Dadurch eignet sich das APDIS besonders für automatisierte Inspektionsaufgaben (Nikon, 2023).



Abbildung 1 (v.l.n.r.) Nikon APDIS MV450, API 9D LADAR LD25, Leica ATS800 (industry.nikon.com, apimetrology.com, hexagon.com)

Der API Dynamic 9D LADAR basiert auf der sogenannten OFCI-Technologie (Optical Frequency Chirping Interferometry), bei der ein frequenzmodulierter Laserstrahl (Chirping) eingesetzt wird. Dieses Verfahren führt zu einer hohen Signalempfindlichkeit und erlaubt eine präzise und stabile Distanzmessung. Die erreichbare Genauigkeit liegt bei etwa $20 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}/\text{m}$ (2σ). Charakteristisch für dieses System sind die sehr hohe Scanrate sowie das vergleichsweise geringe Gewicht, wodurch es besonders flexibel und mobil in industriellen Anwendungen eingesetzt werden kann (API, 2024).

Beim Leica ATS800 kommt ein interferometrisches Distanzmessverfahren auf Basis der C-FMCW-Technologie (Coherent Frequency Modulated Continuous Wave) zum Einsatz. Das System erreicht Distanzgenauigkeiten von $10 \mu\text{m} + 4 \mu\text{m}/\text{m}$ (MPE) und zeichnet sich durch eine sehr kleine Spotgröße aus. Selbst im Nahbereich sind dadurch Submillimetraufösungen realisierbar. Ein zentrales Merkmal ist die sogenannte TruePoint-Technologie: Dabei wird die Intensitätsverteilung im Laserspot analysiert, um die tatsächliche Position des Messpunktes unabhängig vom geometrischen Laserspot-Mittelpunkt zu bestimmen. Darüber hinaus bietet der ATS800 eine hybride Funktionalität: Neben der flächenhaften Erfassung durch berührungsloses Scanning sind auch Messungen auf Reflektoren möglich. Dadurch weist das System auch die Eigenschaften eines klassischen Lasertrackers auf. Ergänzend kommen kamera-basierte und KI-gestützte Verfahren zur automatischen Erkennung von Geometrielementen zum Einsatz (Hexagon, 2025).

Der Leica ATS600 ist der Vorgänger des ATS800. Laut Hersteller war er der weltweit erste direkt scannende

Lasertracker, der die klassische Einzelpunktmessung mit einer integrierten, berührungslosen Flächenerfassung kombinierte (Hexagon, 2019). Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Systemen basiert die Distanzmessung auf der von Hexagon entwickelten WFD-Technologie (Enhanced Wave Form Digitiser), welche Laufzeit- und Phasenmessungen kombiniert (Hexagon, 2014; Wolf, 2020). Das Distanzrauschen liegt dabei unter $80 \mu\text{m}$ (1σ). Beim Scanning erreicht das System eine Genauigkeit im Bereich von $300 \mu\text{m}$ bei Messdistanzen von bis zu 60 m. Neben der flächenhaften Datenerfassung kann der AT6600 auch für klassische 3D-Punktmessungen mit Reflektoren eingesetzt werden und erreicht dabei Genauigkeiten auf dem Niveau etablierter Lasertracker von Leica (bspw. Leica AT960). Diese hybride Funktionalität erlaubt die Kombination hochgenauer Referenzmessungen mit effizientem Scanning innerhalb eines Systems.

Alle der vier beschriebenen Systeme zeichnen sich durch ihre hohe Messgenauigkeit bei berührungslosen Messungen sowie durch die Möglichkeit zur automatisierten Erfassung komplexer Geometrien aus. Unterschiede bestehen insbesondere in der eingesetzten Distanzmess-Technologie, der Messgeschwindigkeit, der Systemintegration sowie im Funktionsumfang, beispielsweise hinsichtlich hybrider Messfunktionen oder automatisierter Merkmals-erkennungen. Tabelle 1 stellt die wesentlichen Parameter der Systeme zusammen. Um eine Vergleichbarkeit der Systeme zu ermöglichen, wurden aus den Herstellerangaben einheitlich

MPE-Werte (Maximum Permissible Error) für die 3D-Messunsicherheit abgeleitet. Die Begriffsdefinition sowie die Überführung aus einer Standardabweichung finden sich z. B. bei Kuhlmann et al. (2017).

2.2 Vermessung von Schienenfahrzeugen

Die Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen umfasst sämtliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Funktions-, Betriebs- und Verkehrssicherheit während der Herstellung, Instandhaltung und des späteren Betriebs. Aufgrund der Fahrzeugmasse, großen Abmessungen und dynamischen Belastungen im Fahrbetrieb ist eine hohe geometrische Qualität der Fahrzeuge erforderlich. Bereits geringe Abweichungen von definierten Toleranzen können zu ungleichmäßigen Kraftverteilungen, erhöhtem Verschleiß oder der Nichteinhaltung von bahnspezifischen Grenzlinien führen.

Ein zentraler Bestandteil der Qualitätssicherung ist daher die messtechnische Erfassung der Fahrzeuggeometrie. Diese erfolgt auf Basis definierter Normen (u. a. DIN 25043) und nutzt ein fahrzeugspezifisches Referenzkoordinatensystem. Dieses ist durch eine konstruktiv festgelegte Bezugsebene sowie die Längs- und Querachse definiert. Innerhalb dieses kartesischen Koordinatensystems werden Referenzpunkte (zur Realisierung des Referenzsystems) und Messstellen (zur Bestimmung der Geometrie) definiert, die später messtechnisch erfasst werden.

Tabelle 1 Systemparameter

System	Messbereich	Max. Scanrate	Wellenlänge (Träger)	3D-Messunsicherheit (MPE)
APDIS MV450	0,5 m bis 50 m	2000 Hz	1550 nm	$20 \mu\text{m} + 14,5 \mu\text{m}/\text{m}$ ¹⁾
API LD-25	1,5 m bis 25 m	20000 Hz	1550 nm	$37,5 \mu\text{m} + 9 \mu\text{m}/\text{m}$ ²⁾
Leica ATS800	0,8 m bis 40 m	2000 Hz	1550 nm	$21 \mu\text{m} + 8,5 \mu\text{m}/\text{m}$ ³⁾
Leica ATS600	1,5 m bis 60 m	1000 Hz	1520 nm - 1560 nm	$300 \mu\text{m}$ ³⁾

Spezifikationen nach: industry.nikon.com, apimetrology.com und hexagon.com

1) aus Messunsicherheiten der Winkel und Strecken abgeleitet

2) nach Kuhlmann et al. (2017) aus 2σ -Angaben abgeleitet

3) im Vergleich zum Kugelreflektor (RRR)

Die Messdaten werden in der Regel als 3D-Koordinaten durch Lasertracking aufgenommen und vielfältig weiterverarbeitet, z. B. zur

- Bestimmung von Länge, Breite und Höhe verschiedener Wagenlängs- und -querschnitte,
- Kontrolle von Abständen, Symmetrien und Formabweichungen
- sowie zur Überprüfung des Fahrzeugbegrenzungsprofils.

Dabei werden häufig mehrere hundert Messpunkte am gesamten Fahrzeug erfasst, die sich auf die Stirnwände, Seitenwände sowie das Dach- und Untergestell verteilen.

Ergänzend zur Geometrie wird die Kraftverteilung im Fahrzeug untersucht. Mithilfe der Messung von Eckkräften an den Auflagerpunkten einer Eckkraftmesseinrichtung lassen sich die Gewichtskraft, die Lage des Schwerpunktes sowie die Kräfte zwischen Wagenkasten und Fahrwerk ermitteln. Diese Größen sind entscheidend für die Beurteilung der Fahrstabilität und insbesondere der Entgleisungssicherheit. Sie sind im Zusammenhang mit der Geometrie zu betrachten.

3 Automatisierte Qualitätssicherung mit scannenden Lasertrackern

Das Ziel einer Automatisierung besteht darin, händisch durchgeführte taktile Messvorgänge durch ggf. auch mehrere autonom arbeitende, scannende Systeme zu ersetzen. Potenziell automatisierbare Messvorgänge werden in der DIN 25043:2012-02 aufgeführt. Zur Einschätzung der benötigten Genauigkeit berührungslos messender Systeme sind vor allem die Maßtoleranzen der definierten Messstellen zu betrachten. Diese Toleranzen werden entweder beispielhaft in der DIN 25043:2012-02 angegeben oder von den Schienenfahrzeugherstellern in fahrzeug-spezifischen Messblättern definiert.

Aus den definierten Messstellen und den zugehörigen Toleranzangaben lässt sich ableiten, dass insbesondere solche Messstellen für berührungslose Messtechniken infrage kommen, die gut zugänglich sind und vergleichsweise grob toleriert werden. Dies trifft beispielsweise auf die Seitenwandmessungen mit dem Dimensionsnamen Y32 nach DIN 25043:2012-02 zu (Abb. 2). Ein Auszug aus einem entsprechenden Messblatt kann Ullrich (2015) entnommen werden. Die zulässigen Toleranzen variieren je nach Wagentyp, liegen aber überwiegend im Bereich zwischen 10 mm und 20 mm. Für die folgenden Betrachtungen wird ein Toleranzwert T_{Y32} von 15 mm angenommen.

Nach DIN 18710-1 lässt sich das Verhältnis einer symmetrischen Maßtoleranz T zur Standardabweichung σ_X für eine Vertrauensniveau von 99,7% durch die Relation

$$0,07 < \frac{\sigma_X}{T} < 0,12 \quad (1)$$

abschätzen, wenn der Anteil der Vermessungstoleranz p an der Maßtoleranz in einem Bereich zwischen 0,1 und 0,3 bzw. 10% und 30% liegt. Für T_{Y32} ergibt sich somit eine Standardabweichung von $\sigma_{Y32} = 1,05 \text{ mm}$ bei $p = 10\%$, die im schlechtesten Fall als 3D-Messunsicherheit einer Punktkoordinate interpretiert werden kann.

Alle Messinstrumente, bzw. deren herstellerspezifische MPE-Angaben aus Tabelle 1, erfüllen diese Genauigkeitsanforderung problemlos über den gesamten möglichen Messbereich.



Abbildung 2 Seitenwandmessungen (Messstellen Y32) mit einem Lasertracker (Originalbild durch KI modifiziert)

3.1 Überprüfung eines Leica ATS600

Die in Tabelle 1 angegebenen Genauigkeitsangaben stellen zwar MPE-Werte dar, sie wurden jedoch unter idealisierten Untersuchungsbedingungen erhoben. Bei scannenden Messverfahren beeinflussen insbesondere der Einfallswinkel, die Oberflächenfarbe und -beschaffenheit sowie das Material die Scangenaugkeit (Joeckel u. a. 2008, Bauer und Ott 2019).

Im speziellen Fall der äußeren Seitenwände (Y32) treten je nach Bauzustand und Wagentyp Stahl- und Aluminiumkonstruktionen in lackierter und unlackierter Ausführung auf. Als repräsentative Auswahl zu den genannten Materialien standen für Prüfmessungen ebene Stahlbleche in lackierter (rot und weiß) und unlackierter Ausführung zur Verfügung.

Anhand der Stahlbleche wurde die Genauigkeit eines Leica ATS600 unter verschiedenen Distanzen und Einfallswinkeln untersucht. Hierzu wurden die Stahlbleche auf einer kipp- und schwenkbaren Testvorrichtung montiert (Abb. 3).

Mithilfe der Vorrichtung kann das Stahlblech vertikal bzgl. der Lotrichtung im Bereich zwischen 0° und 60° gekippt werden (Zenitwinkel). Zusätzlich kann es horizontal um die Stehachse verschwenkt werden. Dadurch lassen sich insbesondere spitze Auftreffwinkel des Laserstrahls simulieren. Für die Versuchsdurchführung wurden Winkeleinstellungen in der Horizontalen bzgl. der Sichtlinie zw. dem Instrumenten- und Zieltafel-Kipnullpunkt von 0° , 15° , 30° und 60° vorgenommen, wobei vertikal keine Kippung erfolgte (0°). Darüber hinaus wurden Kipp- und Schwenkkombinationen (horizontal/vertikal) von ($0^\circ/0^\circ$), ($15^\circ/15^\circ$), ($30^\circ/30^\circ$) und ($60^\circ/60^\circ$) untersucht. Die Kombinationen aus den horizontalen und vertikalen Winkeln entsprechen dabei den Einfallswinkeln bzgl. der Ebenennormalen des Stahlblechs von 0° ; $21,1^\circ$; $41,4^\circ$ sowie $75,5^\circ$.

Dieses grundlegende Konzept der Variation von Kipp- und Schwenkwinkeln wurde zusätzlich für unterschiedliche Messdistanzen von 4 m, 15 m und 30 m auf alle verfügbaren Stahlbleche umgesetzt. Insgesamt ergeben sich daraus 72 mit dem Leica ATS600 aufgenommene Punktwolken, die im Rahmen der Genauigkeitsanalyse einer Referenzebene gegenübergestellt wurden. Die Referenzebene wurde für jede Messkonstellation mit taktilen Messungen eines Lasertrackers Leica AT960-LR erfasst und anschließend als ausgleichende Ebene im Gauß-Helmert-Modell approximiert (Neitzel & Petrovic, 2008; Kisser, 2011). Sie dient somit als Bewertungsgrundlage für die Analyse der Scanqualität.



Abbildung 3 Rotes Stahlblech auf Kippvorrichtung

3.2 Ergebnisse

Da sowohl die Instrumentenstandpunkte der Scans als auch die taktilen Messungen zur Bildung der Referenzebenen durch Transformation im selben lokalen Koordinatensystem vorliegen, können sie direkt aufeinander bezogen werden.

Für jeden einzelnen Scanpunkt wird der vorzeichen-behaftete Abstand zur jeweiligen Referenzebene entlang der Ebenennormalen berechnet. Dies kann beispielsweise durch das Einsetzen der Punktkoordinate in die Hessesche Normalform der Referenzebene erfolgen. Die resultierenden Abstände werden in einem Vektor zusammengefasst und anschließend mittels eines 3σ -Tests von Ausreißern bereinigt. Separat für jede Prüfanordnung wurde aus den gefilterten Abstandsdaten der Mittelwert und das quadratische Mittel (RMS) berechnet. Mithilfe des RMS kann unabhängig von der Lage der Punktwolke vor oder hinter der Ebene festgestellt werden, inwieweit der Scan im Mittel von der Referenzebene abweicht. Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der Messreihen mit den jeweils berechneten RMS-Werten aus den Abständen zur Referenzebene dar. Die Tabelle wurde dabei anhand der RMS-Werte zur optisch besseren Differenzierung farblich codiert.

Tabelle 2 RMS-Werte [mm] der Stahlbleche für unterschiedliche Winkelkombinationen und Distanzen

H _z	V _z	Blech	4 m	15 m	30 m
0°	0°	Rot	0,29	0,42	0,29
		Weiß	0,32	0,46	0,46
		Stahl	0,28	0,15	0,16
15°	0°	Rot	0,32	0,38	0,25
		Weiß	0,29	0,39	0,47
		Stahl	0,33	0,22	0,48
30°	0°	Rot	0,29	0,28	0,43
		Weiß	0,31	0,65	0,78
		Stahl	0,42	0,30	0,90
60°	0°	Rot	0,21	0,19	0,98
		Weiß	0,38	0,75	1,23
		Stahl	0,51	0,26	1,66
15°	15°	Rot	0,33	0,57	0,28
		Weiß	0,28	0,39	0,35
		Stahl	0,40	0,14	0,32
30°	30°	Rot	0,24	0,55	0,20
		Weiß	0,27	0,34	0,34
		Stahl	0,33	0,21	0,60
60°	60°	Rot	0,22	0,27	0,81
		Weiß	0,40	0,29	0,83
		Stahl	0,32	0,34	1,25
Mittelwert	alle		0,32	0,36	0,62

Es zeigt sich, dass der RMS-Wert erwartungsgemäß sowohl mit zunehmender Messdistanz als auch mit größer werdenden Neigungswinkeln ansteigt. Für Messdistanzen kleiner

als 15 m ergeben sich über alle Winkelkombinationen hinweg mittlere RMS-Werte von unter 0,40 mm. Bei einer Distanz bis zu 30 m liegen die mittleren RMS-Werte unter 0,65 mm. Die unlackierte Stahloberfläche weist insbesondere bei zunehmenden Neigungswinkeln die größten Abweichungen zur Referenzebene auf. Die besten Ergebnisse werden hingegen bei den rot lackierten Stahlblechen erzielt. Für Neigungswinkel kleiner als 60° ergeben sich dort durchgängig RMS-Werte von weniger als 0,5 mm.

Auf Grundlage der Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass unter ungünstigen Neigungswinkeln, bei großen Messdistanzen sowie in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften Abweichungen von der Referenzebene auftreten können, die den in Abschnitt 3 hergeleiteten Grenzwert von $\sigma_{Y32} = 1,05 \text{ mm}$ überschreiten. Die jeweilige Messkonstellation ist daher bei der Planung berührungsloser Messungen besonders zu berücksichtigen.

Als Folge dessen wurde ein Simulator entwickelt, der die zu erwartende Scangenauigkeit in Abhängigkeit vom Laser-Einfallswinkel auf dem Messobjekt visualisiert. Der Simulator wurde mithilfe der Open-Source-Software Blender erstellt und durch Geometrieknoten (Geometry Nodes) realisiert (Abb. 3). Mithilfe dieser Simulation kann die Standpunktplanung für automatisierte Messprozesse erfolgen. Dabei werden die instrumentenspezifischen Genauigkeiten berücksichtigt und die Erfassung großer Scanbereiche

ermöglicht. Für mehrere simultan arbeitende Messsysteme können mit dem Tool zusätzlich Bereiche zur Platzierung von Verknüpfungspunkten ermittelt und visualisiert werden (Abb. 3). Darüber hinaus lassen sich in der Simulation auch Halleneinbauten berücksichtigen, die die Sichtverbindung zum Fahrzeug einschränken.

4 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass scannende Lasertracker grundsätzlich für die Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen geeignet sind. Während hochpräzise Messungen weiterhin taktil durchgeführt werden müssen, können große Bereiche der äußeren Fahrzeuggeometrie effizient und berührungslos erfasst werden. Insbesondere bei automatisierten Messprozessen, bei denen mehrere scannende Lasertracker autonom zum Einsatz kommen, lassen sich die Messzeiten entscheidend reduzieren und der Bedarf an zusätzlichen Hilfsmitteln minimieren.

Gleichzeitig sind anwendungsspezifische Limitierungen zu berücksichtigen, die insbesondere ungünstige Einfallswinkel und schwer messbare Oberflächen betreffen. Das untersuchte Instrument, der Leica ATS600, erfüllt bereits die grundlegenden Voraussetzungen für eine automatisierte Anwendung. Eine Flexibilisierung des Einsatzspektrums kann zudem durch höhere Messgenauigkeiten erreicht werden.

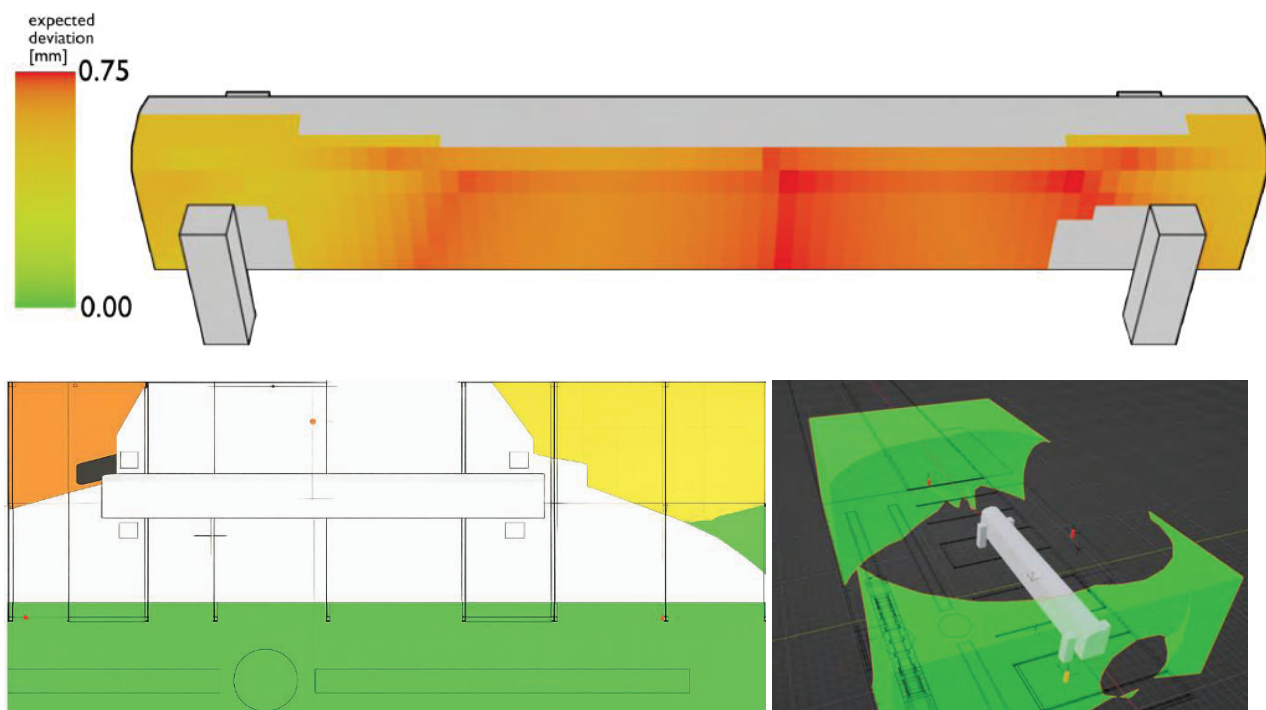


Abbildung 3 Blender Tool: (oben) Simulation der zu erwartenden Genauigkeit auf Grundlage des Laser-Einfallswinkels und der Distanz, (unten) mögliche Positionen von Verknüpfungspunkten

Moderne Systeme wie der Leica ATS800, API Dynamic 9D LADAR oder Nikon APDIS erfüllen diese Anforderungen bereits weitgehend.

Die Systeme von Leica bieten darüber hinaus den Vorteil einer hybriden Nutzung, da sie sowohl als vollwertige Lasertracker als auch als scannende Messsysteme einsetzbar sind. Für eine belastbare Validierung der resultierenden Scangenaugigkeit sind jedoch auch dafür Validierungs-messungen erforderlich, insbesondere im Hinblick auf die spezifischen Oberflächeneigenschaften der Eisenbahn-industrie.

Zudem besteht weiterer Bedarf hinsichtlich der Schaffung normativer Grundlagen. In der DIN 25043 werden bislang ausschließlich diskrete Messstellen betrachtet. Punktwolken, selbst wenn sie lediglich Teilbereiche der Fahrzeuggeometrie umfassen, können jedoch einen wesentlichen Beitrag zur ganzheitlichen Bewertung der Fahrzeuggeometrie leisten.

Aufgrund des steigenden Bedarfs an Schienen-fahrzeugen ist langfristig davon auszugehen, dass berührungslose Messverfahren insbesondere aufgrund ihres hohen Automatisierungspotenzials einen größeren Anteil in der industriellen Qualitätssicherung einnehmen werden (vgl. Schütz & Ullrich, 2020; Ullrich & Enders, 2020).

Ein Teil der Untersuchungen dieses Beitrags fanden im Rahmen des ZIM-Projekts AQuaS (Automatisierte Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen) statt. Für die Unterstützung sei an dieser Stelle dem BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) als Zuwendungsgeber, VermDok for Industries als Projektpartner und Hexagon MI für den technischen Support gedankt.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Literaturverzeichnis

- API (2024). Dynamic 9D LADAR. Produktbroschüre Rev. 3, Automated Precision GmbH, 2024.
DIN 18710:2010-09. Ingenieurvermessung - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, 2010.
DIN 25043:2012-02: Bahnanwendungen – Messen von Schienenfahrzeugen beim Neubau, 2012.

- Bauer, S. & Ott, G. (2019). Reflexion und Transmission von künstlicher optischer Strahlung an Schweißarbeitsplätzen. Forschungsbericht, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Hexagon (2014). WFD – Wave Form Digitizer Technology White Paper. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland.
- Hexagon (2019). Leica Absolute Tracker ATS600 – Der erste direkt-scannende Laser Tracker auf dem Markt. Produktbroschüre, Hexagon AB, 2019.
- Hexagon (2025). Leica Absolute Tracker ATS800 Key features. Data Sheet, Hexagon AB, 2025.
- Joeckel, R.; Stober, M. & Huep, W. (2008). Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren. 5. Auflage. Heidelberg: Wichmann Verlag.
- Kisser, W. (2011). Ausgleichende Ebene im Gauß-Helmert-Modell. Online: <https://kisser.online/ausgleichung/ghm/ebene>. Beitrag erstellt: 24.05.2011.
- Kuhlmann, H., Hesse, C. & Holst, C. (2017): Standardabweichung vs. Toleranz. DVW-Merkblatt 12-2017. DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V.
- Neitzel, F. & Petrovic, S. (2008). Total Least Squares (TLS) im Kontext der Ausgleichung nach kleinsten Quadraten am Beispiel der ausgleichenden Geraden. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 3/2008, S. 141-148, Wißner-Verlag, Augsburg.
- Nikon (2023). Laser Radar APDIS MV430 / MV450, MV430E / MV450E. Produktbroschüre, Nikon Corporation, 2023.
- Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H. & Werner, H. (Hrsg.) (2012). Handbuch Ingenieurgeodäsie – Grundlagen. 4., bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin/Offenbach: Wichmann Verlag.
- Schütz, E. & Ullrich, R. (2020). Zum Einsatz scannender Totalstationen in der industriellen Fertigung. In: VDVmagazin 71 (2020), Nr. 6, S. 512–517.
- Ullrich, R. (2015). Qualitätssicherung von Schienenfahrzeugen. In: VDVmagazin 66 (2015) 5, S. 390 – 401.
- Ullrich, R. & Enders, A. (2020). Automatisierte Messverfahren beim Schienenfahrzeugbau. In: Tagungsband zum Seminar Gleisbau 2020 – Planung, Bau und Vermessung (2020), S. 42–45.
- Wolf, M. (2020). Leica Absolute Tracker ATS600 - Examining the metrology-grade application of Wave Form Digitiser technology in the development of the Leica Absolute Tracker ATS600 direct scanning laser tracker. White Paper, Hexagon AB.

Geometrierfassung und Profilschnittberechnung von Rotorblättern großer Windenergieanlagen mittels terrestrischem Laserscanning

Martina Göring¹

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Geometrie eines Rotorblattes einer realen Windenergieanlagen mittels terrestrischem Laserscanning (TLS) erfasst und ausgewertet. Die Messdaten werden aus mehreren zeitlich parallel aufgenommenen Scans registriert, um Bewegungseinflüsse während der Aufnahme zu reduzieren. Anschließend werden entlang der Blattlängsachse Profilschnitte abgeleitet, die eine detaillierte Rekonstruktion der realen Blattgeometrie ermöglichen. Auf Basis der Punktwolken werden geometrische Kenngrößen wie Profiltiefe, Twist-Verlauf sowie lokale geometrische Abweichungen bestimmt. Der Vergleich mit Referenz- bzw. Designdaten zeigt eine gute Übereinstimmung in der Nähe der Blattwurzel, während die Abweichungen in Richtung der Blattspitze zunehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass TLS eine geeignete Methode für die hochauflösende geometrische Erfassung großskaliger Rotorblätter darstellt und eine konsistente Ableitung relevanter Strukturparameter ermöglicht.

Schlagwörter Terrestrisches Laserscanning · Geometrie · Rotorblatt · Profilschnitte

1 Einführung

Windenergieanlagen sind in der Regel für eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Nach Ablauf dieser Zeit ist entweder ein Rückbau vorgesehen oder es muss im Rahmen eines Gutachtens die strukturelle Sicherheit für eine Laufzeitverlängerung nachgewiesen werden. Angesichts der großen Anzahl von Anlagen, die derzeit das Auslegungsende erreichen (The Wind Power, 2026), gewinnt die belastbare Bewertung einer möglichen Weiterbetriebsdauer zunehmend an Bedeutung. Die Datengrundlage für entsprechende Laufzeitverlängerungsgutachten ist jedoch häufig begrenzt. Fehlende Bestandsdaten, vereinfachte Modellannahmen oder der Rückgriff auf generische Referenzmodelle führen zu erhöhten Unsicherheiten in der strukturellen und aeroelastischen Bewertung. Diese Unsicherheiten werden üblicherweise durch konservative Sicherheitsaufschläge berücksichtigt, wodurch das tatsächliche Restlebensdauerpotenzial nicht vollständig genutzt wird (Nielsen et al., 2021). Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor ist die reale Geometrie der Rotorblätter. Sie beeinflusst unmittelbar die aerodynamischen Lasten, das Schwingungsverhalten und damit die ermüdungsrelevante Beanspruchung der Gesamtstruktur. Da herstellerspezifische Geometriedaten meist nicht vollständig verfügbar sind, werden in der Praxis

häufig Referenzgeometrien angesetzt, wie beispielsweise die des National Renewable Energy Laboratory (NREL).

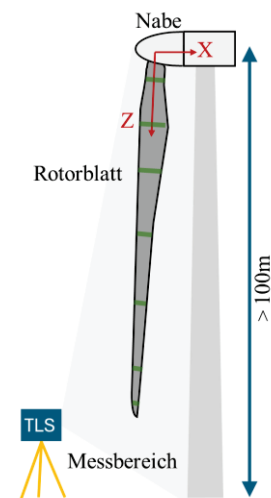


Abbildung 1 Seitenansicht bei der Erfassung eines Rotorblattes in der 6-Uhr-Position zur Erzeugung von Profilen (grün) im Koordinatensystem des Rotorblattes (rot)

Die vorliegende Arbeit zeigt das Verfahren zur hochauflösenden Erfassung der Geometrie eines Rotorblattes einer Windenergieanlage mittels terrestrischem Laserscanning (TLS). Ziel ist die präzise Bestimmung der

¹ Jade Hochschule, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16/19, 26121 Oldenburg, Deutschland, E-Mail: martina.goering@jade-hs.de

tatsächlichen Blattgeometrie sowie die Ableitung profilbezogener Kenngrößen entlang der Blattlängsachse als Grundlage für weiterführende strukturmechanische und schwingungsrelevante Analysen im Kontext der Laufzeitverlängerung (Abbildung 1).

Das Kapitel 2 beschreibt die Methode zur geometrischen Erfassung von Rotorblättern. Anschließend werden im dritten Kapitel die Ergebnisse präsentiert. Die gesamte Arbeit wird in Kapitel 4 diskutiert und im Kapitel 5 erfolgt das Fazit und der Ausblick.

2 Methode

Im folgenden Kapitel werden zunächst die relevanten Informationen zum Messobjekt der Windenergieanlage beschrieben. Im Anschluss werden die eingesetzten Messsysteme und die Aufnahme-strategie sowie die Auswerteverfahren erläutert.

2.1 Messobjekt

Windenergieanlagen stellen großskalige, schlanke und elastische Tragstrukturen dar, deren Komponenten unter Betriebsbedingungen signifikante Verformungen und Schwingungen aufweisen können. Für geometrische Messungen ist daher sicherzustellen, dass äußere Einflüsse wie Windlasten minimiert werden, um eine möglichst bewegungsarme Erfassung zu gewährleisten.

Die Rotorblätter besitzen eine komplexe, entlang der Blattlängsachse variierende Geometrie, die maßgeblich die aerodynamischen und strukturellen Eigenschaften beeinflusst. Da detaillierte Geometriedaten häufig nicht verfügbar sind, ist eine experimentelle Erfassung der realen Geometrie erforderlich.

Für die Messung befindet sich die Anlage im Stillstand, sodass ein Rotorblatt in einer definierten Position erfasst werden kann. Geeignete Umgebungsbedingungen (insbesondere geringe Windgeschwindigkeiten und trockene Witterung) sind erforderlich, um Bewegungen des Messobjekts während der Datenerfassung zu minimieren.

2.2 Messsystem und Aufnahme-strategie

Die geometrische Erfassung erfolgt mittels terrestrischem Laserscanning (TLS), das eine berührungslose und hochauflösende Aufnahme komplexer Strukturen ermöglicht. Der Einsatz von TLS zur Vermessung von Windenergieanlagen wurde bereits in mehreren Studien untersucht und zeigt die Eignung für großskalige Geometrien und strukturelle Analysen (Grosse-Schwiep,

2013; Mitka et al., 2019; Helming et al., 2023). Auch für die detaillierte Erfassung von Rotorblättern wurde TLS erfolgreich eingesetzt (Stalowska et al., 2023).

Aufgrund der Größe des Messobjekts ist eine geeignete Aufnahme-strategie erforderlich, die sowohl eine vollständige Abdeckung als auch eine ausreichende geometrische Auflösung sicherstellt. Hierzu werden mehrere Scanpositionen um das Objekt verteilt, um Abschattungen zu minimieren und unterschiedliche Blickwinkel zu ermöglichen (Abbildung 2).

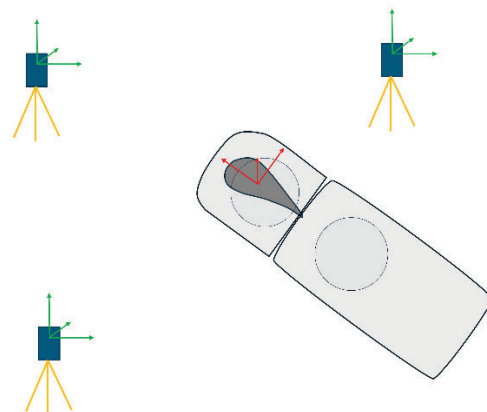


Abbildung 2 Geplanter Messaufbau mit drei TLS, Windenergieanlage in der Draufsicht. Die Messdaten sollen im Koordinatensystem des Rotorblattes (rot) vorliegen.

Zur Reduzierung von Messunsicherheiten infolge möglicher Objektbewegungen kann eine parallele Datenerfassung mit mehreren Scansystemen erfolgen. Dadurch wird die Aufnahmezeit verkürzt und die zeitliche Konsistenz der Messdaten verbessert. Der Einfluss durch Bewegung verursachter Effekte auf TLS-Messungen ist in der Literatur beschrieben (Vaaja et al., 2016).

Die Datenerfassung erfolgt mittels vollständiger Rundumschans, um neben dem eigentlichen Messobjekt auch die Umgebung zu erfassen. Dies soll eine robuste Registrierung der Einzelaufnahmen sowie eine flexible Selektion relevanter Datenbereiche ermöglichen.

2.3 Registrierung und Transformation in das Blatt-Koordinatensystem

Die Registrierung mehrerer Scans erfordert eine stabile Bestimmung gemeinsamer Referenzen zwischen den einzelnen Aufnahmen. In naturnahen Umgebungen, in denen keine ausreichend strukturierten oder dauerhaft stabilen Objekte vorhanden sind, erfolgt dies typischerweise über künstliche Zielmarken.

Aufgrund der großen Messdistanzen bei Windenergieanlagen müssen diese Zielmarken eine ausreichende geometrische Ausdehnung aufweisen, um zuverlässig detektiert werden zu können. Insbesondere sphärische Referenzkörper haben sich hierfür als geeignet erwiesen, da sie aus unterschiedlichen Blickrichtungen eindeutig identifiziert und geometrisch robust approximiert werden können.

Nach der Registrierung liegen die Daten im Koordinatensystem des jeweiligen TLS vor. Für weiterführende Analysen ist eine Transformation in ein objektbezogenes Koordinatensystem erforderlich.

Zur Definition eines rotorblattbezogenen Koordinatensystems wird die Geometrie im Bereich der Blattwurzel genutzt, die näherungsweise als zylindrisch angenommen werden kann. Auf dieser Grundlage erfolgt die Bestimmung der Blattlängsachse durch Zylinderanpassung an die Punktwolke.

Der Ursprung des Koordinatensystems wird über die geometrische Beziehung mehrerer Rotorblätter bestimmt, indem die Achsen der jeweiligen Blattwurzelbereiche kombiniert werden. Die resultierende Schnittpunktbestimmung approximiert den Mittelpunkt der Rotornabe (Abbildung 3).

Die Transformation in dieses Koordinatensystem ermöglicht eine konsistente Beschreibung der Blattgeometrie sowie die Ableitung von Querschnitten entlang der Blattlängsachse.

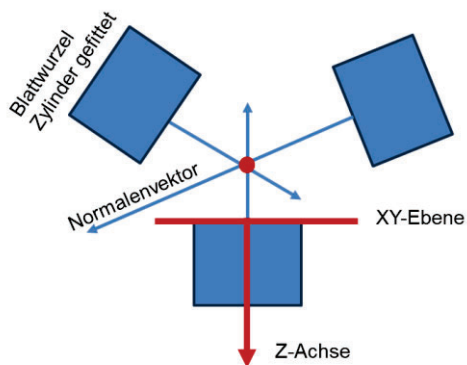


Abbildung 3 Bestimmung der Ausrichtung des Koordinatensystems des Rotorblattes durch Fitten von Zylindern (blaue Rechtecke) in den drei Rotorblättern. Der Normalenvektor der Zylinder definiert den Koordinatenursprung.

2.4 Profilschnitte

Zur Analyse der Rotorblattgeometrie werden Profilschnitte entlang der Blattlängsachse abgeleitet. Da Designdaten

üblicherweise in Form zweidimensionaler Profile vorliegen, ist eine Reduktion der dreidimensionalen Punktwolke auf entsprechende Querschnitte erforderlich. Die Profilschnittberechnung erfolgt in mehreren Schritten:

1. Definition der Schnittebenen
Entlang der Blattlängsachse werden diskrete Positionen definiert. An diesen Positionen werden Ebenen erzeugt, die orthogonal zur Achse ausgerichtet sind.
2. Selektion relevanter Punkte
Für jede Schnittebene werden alle Punkte berücksichtigt, die sich innerhalb eines definierten Abstandsbereiches entlang der Achse befinden.
3. Räumliche Aggregation
Die projizierten Punkte werden innerhalb der Schnittebene in ein zweidimensionales Raster überführt (Abbildung 4).
4. Glättung und Mittelwertbildung
Innerhalb jeder Rasterzelle wird der Mittelwert berechnet, um Messrauschen zu reduzieren und robuste Profilkpunkte zu erhalten.

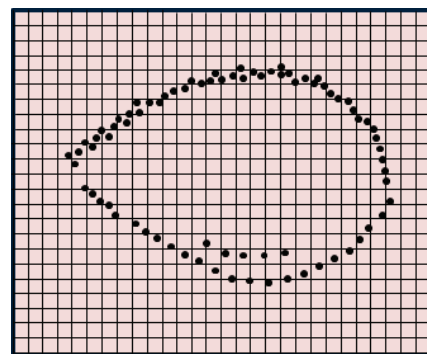


Abbildung 4 Berechnung der Profilschnitte durch ein definiertes Raster

Das Ergebnis sind geglättete zweidimensionale Profile, die den realen Querschnitt des Rotorblattes repräsentieren und für den Vergleich mit Designdaten verwendet werden können.

3 Ergebnisse

3.1 Datengrundlage

Die Messdaten werden an einer Prototyp-Windenergieanlage (Adwen, 2026) erfasst. Aufgrund der geometrischen Dimensionen und der schwierigen Sichtbedingungen ergibt sich eine heterogene Datenbasis mit variierender Punktdichte entlang der Struktur. Insbesondere die Rotorblattgeometrie stellt durch ihre

Ausdehnung und Bewegung eine besondere Herausforderung für die geometrische Rekonstruktion dar.

3.2 Registrierung und Transformation

Die Registrierung der Einzelaufnahmen erfolgt auf Basis künstlicher Zielmarken (weiße Gymnastikbälle). Dabei zeigt sich eine insgesamt stabile Ausrichtung im Bereich der Zielmarken.

Bei Betrachtung des Messobjektes (WEA) treten jedoch Inkonsistenzen auf, die insbesondere in strukturell wenig ausgeprägten Bereichen wie der Rotorblattstruktur und der Gondel sichtbar werden. Diese äußern sich in zunehmenden geometrischen Abweichungen zwischen überlagerten Scans.

Aufgrund der eingeschränkten Stabilität der Registrierung wird eine zusätzliche globale Registrierung mittels eines iterativen Closest-Point-Verfahrens (ICP) durchgeführt. Dadurch wird eine konsistente Gesamtregistrierung der Anlage erreicht (Abbildung 5).

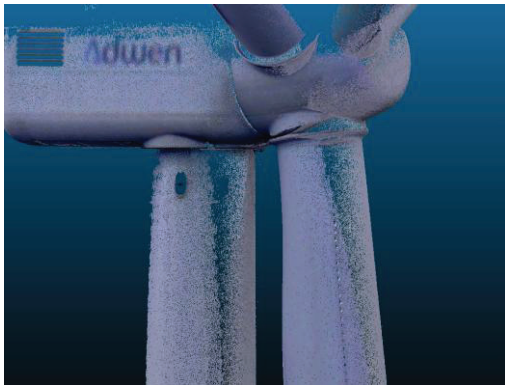


Abbildung 5 Registrierte Punktwolke der Windenergieanlage mittels ICP

Im Ergebnis verbessert sich die geometrische Übereinstimmung der Punktwolke insbesondere in den stabilen Bereichen wie Turm und Blattwurzel. In dynamisch beeinflussten Bereichen wie der Blattspitze bleiben jedoch geometrische Abweichungen sichtbar.

Im Anschluss werden die registrierten Punktwolken in ein rotorblattbezogenes Koordinatensystem überführt, das Auswertungen entlang der Blattlängsachse ermöglicht.

3.3 Geometrische Abweichungen an der Blattspitze

Die Analyse der registrierten Punktwolken zeigt systematische geometrische Differenzen zwischen den einzelnen Blattaufnahmen. Diese Abweichungen sind entlang der Blattlängsachse nicht konstant, sondern nehmen

mit zunehmender Entfernung zur Nabe tendenziell zu. Besonders im Bereich der Blattspitze treten deutliche Unterschiede zwischen den Einzelaufnahmen auf (Abbildung 6).

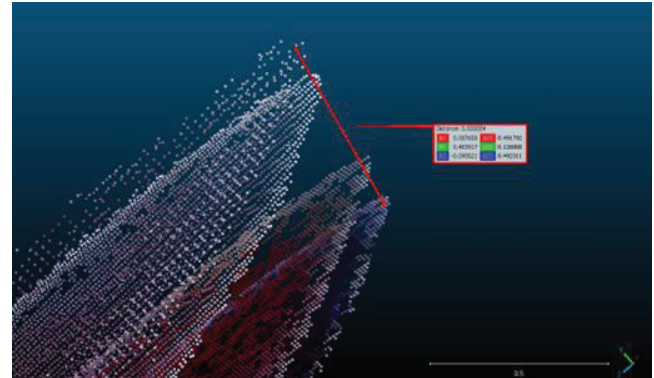


Abbildung 6 Abweichungen an der Blattspitze zwischen einzelnen Punktwolken

Aufgrund dieser Unterschiede werden die Profilschnitte nicht aus der vollständig zusammengeführten Punktwolke abgeleitet, sondern getrennt für jeden Einzelscan berechnet (Abbildung 7). Anschließend erfolgt eine konsistente Zusammenführung der resultierenden Profile unter Berücksichtigung der jeweiligen Scanposition.



Abbildung 7 Darstellung einer Punktwolke und den dazugehörigen Profildaten

Der Vergleich der auf diese Weise erzeugten Profilschnitte zeigt eine hohe Übereinstimmung in der Nähe der Blattwurzel. Mit zunehmender Blattlänge nimmt die Streuung der Profile jedoch zu. Dieser Effekt ist insbesondere im Bereich der Blattspitze ausgeprägt und weist auf eine Kombination aus Bewegungsartefakten während der Messung sowie residualen Unsicherheiten in der Registrierung hin.

3.4 Vergleich mit Designdaten und geometrische Ableitungen

Die aus den Profilschnitten abgeleiteten geometrischen Informationen bilden die Grundlage für die Validierung der rekonstruierten Rotorblattgeometrie. Ein Bestandteil der Auswertung ist dabei der Vergleich der aus den Einzelscans gewonnenen Profile mit den zugrunde liegenden Designdaten.

Zur Auswertung werden die Profilschnitte getrennt für jeden Einzelscan berechnet und anschließend in einem gemeinsamen rotorblattbezogenen Koordinatensystem verglichen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine differenzierte Betrachtung der geometrischen Übereinstimmung entlang der Blattlängsachse und ermöglicht die Reduzierung durch den Einfluss von Bewegungen während der Messung.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Vergleich eines Profilschnitts aus mehreren Einzelscans (gestrichelte Linien in unterschiedlichen Farben) mit der zugehörigen Sollgeometrie (durchgezogene Linie in Lila). Zusätzlich ist die zur Bestimmung der Profiltiefe verwendete Verbindungslinie zwischen Vorder- und Hinterkante des Profils dargestellt.

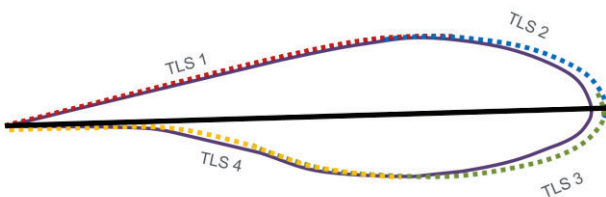


Abbildung 8 Vergleich der aus den Einzelscans abgeleiteten Profilschnitte (gestrichelte Linien) mit der Sollgeometrie (durchgezogene Linie).

Der Vergleich der aus den TLS-Daten abgeleiteten Profilschnitte mit den entsprechenden Designdaten wird im Rahmen einer separaten Untersuchung am Fraunhofer IWES durchgeführt und veröffentlicht (Rosemeier et al., 2025). Die Ergebnisse zeigen eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Sollgeometrie. Konkrete Geometriedaten werden aus Vertraulichkeitsgründen nicht dargestellt.

Auf Grundlage der berechneten Profilschnitte lassen sich weitere geometrische Kenngrößen des Rotorblattes ableiten. Dazu zählt insbesondere die lokale Verdrehung (Twist), die über die Verbindungslinie zwischen Vorder- und Hinterkante eines Profils bestimmt wird.

Neben der globalen Blattgeometrie wird die Punktwolke zusätzlich zur Analyse lokaler Anbauteile verwendet. Am Beispiel des im mittleren Blattbereich befindlichen Spoilers zeigt sich, dass auch kleinräumige geometrische Strukturen zuverlässig in den TLS-Daten enthalten sind und geometrisch ausgewertet werden können.

Insgesamt bestätigen sowohl der Vergleich mit den Designdaten als auch die abgeleiteten geometrischen Parameter die Eignung der TLS-basierten Datengrundlage für die struktur- und geometriebezogene Analyse von Rotorblättern.

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Auswertung der Punktwolken zeigt eine insgesamt konsistente geometrische Erfassung der Rotorblattstruktur, jedoch mit lokal variierenden Abweichungen. Diese treten insbesondere an der Blattspitze auf und stehen im Zusammenhang mit Bewegung des Blattes sowie verbleibenden Unsicherheiten der Registrierung.

Für eine robuste geometrische Auswertung ist die getrennte Betrachtung der Einzelscans erforderlich. Nur so kann eine konsistente Zuordnung der Profilgeometrien entlang der Blattlängsachse gewährleistet werden und eine Verfälschung durch Überlagerung dynamischer Effekte vermieden werden.

4 Diskussion

Die Analyse der Punktwolken und Profilschnitte zeigt, dass die Bewegung der Rotorblätter während der Messung einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden geometrischen Abweichungen hat. Besonders an der Blattspitze treten höhere Differenzen auf, während die Blattwurzel aufgrund ihrer geringeren dynamischen Auslenkung stabilere Ergebnisse liefert. Die eingesetzte Messstrategie mit zeitgleicher Erfassung durch drei Laserscanner reduziert diese Effekte bereits, kann jedoch die Blattbewegung nicht vollständig kompensieren.

Eine vollständige Eliminierung dieser Einflüsse wäre durch eine zeitliche Synchronisierung der Messsysteme oder eine signifikante Verkürzung der Aufnahmezeit möglich. Ergänzend wäre die Integration der Bewegungsinformationen, beispielsweise aus photogrammetrischen Verfahren oder Tracking-Systemen, denkbar, um die gemessenen Punktwolken nachträglich zu korrigieren. Dieser Ansatz ist jedoch mit einem erheblich erhöhten Auswerteaufwand verbunden und muss gegen den erwarteten Mehrwert abgewogen werden.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die geometrische Rekonstruktion des Koordinatensystems des Rotorblattes. Insbesondere die Definition der Blattachse über lokale Geometrieapproximationen stellt eine kritische Einflussgröße dar, da kleine Winkelfehler über die Blattlänge hinweg zu verstärkten Abweichungen in den abgeleiteten Profilen führen können. Die Genauigkeit der nachfolgenden Analysen ist daher unmittelbar an die Robustheit der Registrierung und Transformation gekoppelt. Bekannte Anlagenparameter wie Rotororientierung und Blattwinkel können hierbei als zusätzliche Randbedingungen genutzt werden (NREL, 2026).

Alternativ zu dem gewählten Mess- und Auswerteansatz existieren Verfahren auf Basis unbemannter Luftfahrtsysteme in Kombination mit terrestrischem Laserscanning oder photogrammetrischen Verfahren. Diese könnten insbesondere eine vollständigere Erfassung der Blattgeometrie und Bewegungszustände ermöglichen, sind jedoch in Bezug auf Synchronisation, Datenvolumen und Auswertungskomplexität deutlich anspruchsvoller.

Insgesamt zeigt sich, dass die Kombination aus terrestrischem Laserscanning, ICP-basierter Registrierung und rotorblattbezogener Transformation eine geeignete Grundlage für die geometrische Analyse von Windenergieanlagen darstellt, jedoch insbesondere hinsichtlich dynamischer Effekte und globaler Referenzdefinitionen weiterhin Optimierungspotenzial besteht.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erfassung der Rotorblattgeometrie mittels terrestrischem Laserscanning auch unter den komplexen Randbedingungen großer Windenergieanlagen erfolgreich durchgeführt werden kann. Die Kombination aus Registrierung, der Transformation in ein rotorblattbezogenes Koordinatensystem sowie der anschließenden Profilschnittberechnung liefert eine gute Datengrundlage für geometrische Analysen und den Vergleich mit Designdaten.

Durch zeitgleiche TLS-Aufnahmen und verkürzte Messzeiten konnten Bewegungseffekte reduziert werden. Im Bereich der Blattspitze bleibt Bewegung jedoch ein einschränkender Faktor.

Auf Basis der gewonnenen Daten konnten geometrische Kenngrößen wie Profiltiefe und Verdrehung abgeleitet werden. Damit stellt die Arbeit eine geeignete Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Bewertung von Geometrieparametern dar.

Für zukünftige Arbeiten ergibt sich die Möglichkeit, die Erfassung der Rotorblattbewegung stärker zu integrieren, beispielsweise durch photogrammetrische Trackingverfahren oder sensorbasierte Bewegungsmodelle. Darüber hinaus könnten verbesserte Synchronisationsstrategien zwischen den Messsystemen sowie weiterentwickelte Registrierungsverfahren die verbleibenden Unsicherheiten weiter reduzieren.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass TLS-basierte Messverfahren ein leistungsfähiges Werkzeug zur geometrischen Analyse von Rotorblättern darstellen, jedoch insbesondere bei dynamischen Strukturen weiterhin methodische Weiterentwicklungen erforderlich sind, um die erreichbare Genauigkeit weiter zu steigern.

Danksagung

Diese Arbeit wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Projekts BLADAPTION (Förderkennzeichen 03EE3086B). Vielen Dank an die Kolleg_innen der Photogrammetrie-Gruppe des IAPG & der Geodätischen Werkstatt für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen sowie dem Fraunhofer Institut für Windenergiesysteme. Weiterhin geht ein besonderer Dank an die Firmen Zoller + Fröhlich für die Bereitstellung der Laserscanner Imager 5016 sowie die technische Unterstützung während der Messkampagne und an Siemens Gamesa Renewable Energy Deutschland GmbH für die Bereitstellung der Windenergieanlage.

Literaturverzeichnis

- Adwen (2026). Datenblatt der Windenergieanlage AD180. Online verfügbar unter: <https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1124-adwen-ad-8-180> (abgerufen am 30.03.2026)
- Grosse-Schwiep, M., Piechel, J., & Luhmann, T. (2013). Measurement of rotor blade deformations of wind energy converters with laser scanners. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 97–102. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W2-97-2013>
- Helming, P., Intemann, A., Webersinke, K.-P., von Freyberg, A., Sorg, M. & Fischer, A.: Assessing the rotor blade deformation and tower-blade tip clearance of a 3.4 MW wind turbine with terrestrial laser scanning (*Wind Energy Science*, 2023).
- Mitka, B., Klapa, P., & Gniadek, J. (2019). Use of terrestrial laser scanning for measurements of wind power stations. *Geomatics and Environmental Engineering*, 13(39). <http://dx.doi.org/10.7494/geom.2019.13.1.39>
- NREL (2026). National Renewable Energy Laboratory, *OpenFAST documentation*. <https://openfast.readthedocs.io/en/main/>
- Nielsen, J. S., Miller-Branovacki, L., & Cariveau, R. (2021). Probabilistic and Risk-Informed Life Extension Assessment of Wind Turbine Structural Components. *Energies*, 14(4), 821. <https://doi.org/10.3390/en14040821>
- Rosemeier, M., Theron, J. N., Göring, M., Lieckfeldt, R., Kleinselbeck, T. (2025). Field measurements of as-built geometry deviations of an 88.4 m wind turbine rotor blade. *Wind Energy Science Conference (WESC 2025)*, Proceedings.
- Stalowska, P., Suchocki, C., & Zagubień, A. (2023). Application of terrestrial laser scanning measurements for wind turbine blade condition surveying. *Metrology and Measurement Systems*, 30(3), 403–422. <https://doi.org/10.24425/mms.2023.146419>

The Wind Power (2026). Wind energy database. Verfügbar unter <https://www.thewindpower.net> (abgerufen am 30.03.2026)

Vaaja, M. T., Virtanen, J.-P., Kurkela, M., Lehtola, V., Hyyppä, J., & Hyyppä, H. (2016). The effect of wind on tree stem parameter estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-8, 117–122. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-8-117-2016>

Hochgenaue 3D-Erfassung großer Messvolumina bei der kaltplastischen Umformung großer Bleche mittels optischer Sensorik

Christian Bräuer-Burchardt¹, Christoph Munkelt¹, Matthias Heinze¹, Ingo Gebhart¹, Peter Kühmstedt¹ & Gunther Notni^{1,2}

Zusammenfassung

Es wird ein Echtzeit-Sensornetzwerk aus zwei optischen 3D-Sensoren mit aktiver Musterprojektion im NIR-Bereich vorgestellt, welches ein Messvolumen von 4,0 x 2,0 x 0,5 m³ im industriellen Umfeld abdeckt. Dabei werden ein 3D-Absolutfehler von unter 1 mm in Messzeiten von unter einer halben Sekunde erreicht. Temperaturschwankungen, Staub- und Schmutzbelastungen und Vibrationsbelastungen, die große Herausforderungen bei der Entwicklung waren, beeinträchtigen die Robustheit und Leistungsfähigkeit des Sensornetzwerks nicht. Die Entwicklung eines robusten und einfach handhabbaren Kalibrierverfahrens für die tägliche Anwendung durch den Bediener der Blechpresse macht das entwickelte System anwendungstauglich.

Schlagwörter Sensornetzwerk · photogrammetrische Stereo-Sensorik · Kalibrierung · strukturierte NIR-Beleuchtung

1 Einführung

Um den Prozess der Qualitätskontrolle bei der kaltplastischen Umformung großer Bleche von mehreren Quadratmetern quantitativ nachvollziehbar zu gestalten, ist eine dreidimensionale Erfassung über die gesamte Breite von bis zu 3,5 m erforderlich. Dabei sind verschiedene Herausforderungen zu meistern, wie der Einsatz in rauer Industrieumgebung (Temperatur-schwankungen, Staub und Schmutz, Vibrationen), die Bereitstellung einer irritationsfreien strukturierten Beleuchtung, die Kompensation von Fremdlichteinflüssen und die Vermeidung von Abschattungen durch den Pressstempel. Weiterhin bestehen die Anforderungen an kurze Messzeiten (Echtzeitbetrieb) und die Bereitstellung einer genauen und aufwandsarmen prozessintegrierbaren Kalibrierung.

Darüber hinaus stellt die objektive Kontrolle der Blechform eine Entlastung der manuellen Arbeit der Werker dar, welche die Qualitätskontrolle konventionell mithilfe von Schablonen, manueller Prüfung und visueller Begutachtung durchführen.

Tango et al. (2011) beschreiben ein System zur vollautomatischen Umformung von Stahlplatten für Schiffsbleche, allerdings auf Basis thermischer Umformung. Zhang et al. (2025) nutzen KI-basierte Ansätze zur Detektion von Oberflächendefekten auf Metallblechen.

Bisher gibt es keine qualitativ gleichwertige und echtzeitfähige Alternative zur manuellen Qualitätskontrolle. Das Problem dabei besteht in erster Linie darin, dass das zu überwachende Messvolumen nicht durch einen einzelnen optischen Stereo-Sensor erfasst werden kann. Aus einer Blickrichtung ist nicht immer der gesamte Bereich einsehbar, da sich der Pressstempel teilweise direkt im Messvolumen befindet. Als Alternative bietet sich die Verwendung eines zweiten Stereo-Sensors an. Die Herausforderungen bezüglich der Qualitätskontrolle bestehen hierbei in der korrekten Zusammenführung der Messvolumina der beiden Sensoren.

2 Methoden

Die Presse zur kaltplastischen Umformung von Blechen beliebiger Länge und einer Breite von maximal 3,5 m befindet sich mittig in einem Portal (siehe Abb. 1). Die Bleche werden, aufgehängt an Stahlketten, unter dem Portal hindurchgeführt. Zur Umformung wird das Blech an der zu bearbeitenden Stelle unter dem Pressstempel positioniert. Für die Bearbeitung übt der Stempel einen definierten Druck auf das Blech aus. Um zu bewerten, ob die Bearbeitung an der aktuellen Position ausreicht, muss die Form des Bleches über die gesamte Breite vollständig erfasst werden.

¹ Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena, Deutschland, E-Mail: [vorname.name]@iof.fraunhofer.de

² Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau, Deutschland; E-Mail: gunther.notni@tu-ilmenau.de

Dazu muss im Idealfall der gesamte Bereich unter dem Portal als Messvolumen betrachtet werden. Da das Portal eine Gesamtbreite von etwa 7 m aufweist, müssen für dessen vollständige Abdeckung entweder zwei Stereo-Sensoren mit Ultra-Weitwinkelobjektiven mit einer Brennweite von maximal 6 mm, oder mindestens vier in Reihe angeordnete Sensoren verwendet werden. Beide Varianten haben entscheidende Nachteile. Die Verwendung von Weitwinkelobjektiven erscheint bei der notwendigen Tiefe des Messvolumens wegen nicht korrigierbarer Objektivverzeichnungen kritisch, vier Sensoren erhöhen die Kosten erheblich und verursachen Herausforderungen bei der fehlerfreien Zusammenführung aller Messvolumina der Sensoren.



Abbildung 1 Portal mit Pressstempel

Der gewählte Lösungsansatz sieht ein kleineres Messvolumen von $4,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ vor und erlaubt gegebenenfalls die Erfassung nur eines Teilbereichs des Blechs, wobei mindestens einer der beiden Ränder miterfasst werden muss, um die absolute Lage des Blechs zu bestimmen. Abbildung 2 zeigt ein Schema des Messvolumens, des Portals und möglicher Blechlagen.

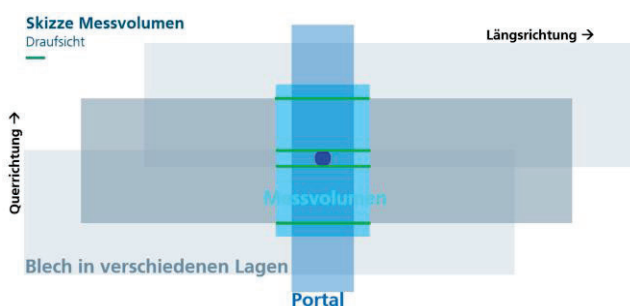


Abbildung 2 Draufsicht auf das Messvolumen (türkisblauer Bereich) unter dem Portal mit möglichen Blechlagen

Um ein Messvolumen von mindestens $4,0 \times 2,0 \times 0,5 \text{ m}^3$ abzudecken, müssen die Sensoren unter einem flachen Winkel ausgerichtet werden. Nur so lassen sich Abschattungen durch den Pressstempel vermeiden und

sicherstellen, dass jeder Punkt des Messvolumens von mindestens einem Sensor erfasst wird. Dadurch ergibt sich eine große Messtiefe entlang der optischen Achsen der Messkameras.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Anwesenheit eines Werkers während des Bearbeitungsprozesses. Um ihn durch die Projektion strukturierter Lichtmuster nicht zu irritieren, wurden Beleuchtung und Beobachtung durch die Kameras im nahen Infrarotbereich (NIR) realisiert.

2.1 Hardware und Technische Realisierung

Die beiden Stereo-Sensoren wurden unter Berücksichtigung der Anforderungen, der geometrischen Randbedingungen und der vom Anwender gewünschten Leistungsparameter ausgelegt. Zu Letzteren zählen die Gesamtmesszeit vom Beginn der Kameraaufnahmen bis zur Anzeige des 3D-Messergebnisses auf dem Monitor, die maximale Toleranz gegenüber systematischen Messfehlern sowie ein möglichst einfaches Kalibrierverfahren, das mit geringem zeitlichem Aufwand und ohne Fachkenntnisse täglich vor Inbetriebnahme der Presse durchführbar ist.

Für die Hardware-Realisierung waren neben der Auswahl der optischen Komponenten (Kameras und Projektionseinheit) die mechanische und thermische Stabilität sowie die Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Temperaturschwankungen und Vibrationen maßgebend. Diesen Anforderungen wurde bei der Konstruktion der Sensorköpfe Rechnung getragen, beispielsweise durch den Einbau passiver Kühlkörper sowie eine steife, schwingungsgedämpfte Bauweise. Der resultierende Aufbau eines Sensorkopfes ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Basislänge zwischen den beiden Kameras (jeweils 2 MPix) beträgt ca. 800 mm. Der Projektor arbeitet mit Gobo-Technik (Heist et al. 2016) und projiziert aperiodische Sinusmuster auf das Messobjekt.

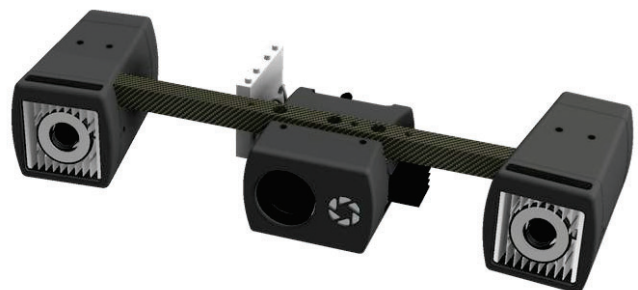


Abbildung 3 Realisierter Sensorkopf

Es wurden zwei identische Sensorköpfe (Abb. 3) gefertigt, im Labor getestet und in das Messportal integriert (siehe Abb. 4). Sie wurden in einem gegenseitigen Abstand von ca. 4 m oberhalb der seitlichen Begrenzung angebracht und unter einem Neigungswinkel von ca. 45° auf das Messvolumen ausgerichtet.



Abbildung 4 Sensoren im Portal

2.2 Geometrische Kalibrierung

Ziel bei der Kalibrierung war es, die gewonnenen 3D-Messdaten der Blechoberfläche in das Koordinatensystem des Messportals zu überführen – mit einer absoluten Genauigkeit von maximal 3 mm Registrierungsabweichung. Eine weitere Anforderung bestand darin, dass die Kalibrierung mindestens über einen gesamten Arbeitstag stabil bleibt und in kurzer Zeit von angelerntem Bedienpersonal am Tagesbeginn durchgeführt werden kann.

Die Kalibrierung erfolgt in zwei Stufen. Im ersten Schritt werden die beiden Sensoren separat im Labor kalibriert. Dabei wird die übliche Kalibrierung von Stereo-Kameraanordnungen mittels Bündelblockausgleich angewendet (Luhmann et al. 2020). Im zweiten Schritt werden die beiden Sensoren am Messportal in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Dazu dient ein Kalibrierboard (Abb. 5) – eine ebene Platte, auf der Kreise und ArUco-Marker (Garrido-Jurado et al. 2014) aufgedruckt sind. Die Registrierung erfolgt mittels Helmert-Transformation (Lin et al. 2019); für die Optimierung wurde die Software „Ceres“ (Ceres 2026) eingesetzt. Nach dieser Kalibrierung werden die beiden Sensorköpfe nicht mehr bewegt.

Für die weitere Bearbeitung ist die Transformation in das Maschinenkoordinatensystem (MKS) des Portals notwendig. Gleichzeitig erfolgt die Skalierung mittels Referenz-Markerplatten, die mittels Magneten fest im Boden fixiert sind (siehe Abb. 6 Schema und Abb. 7 Foto).

Es werden weitere Referenz-Markerplatten und optional Kugeln an den Rändern der separaten Messvolumina der einzelnen Sensoren zur Stabilisierung der Kalibrierung angebracht und in die Kalibrierung einbezogen.

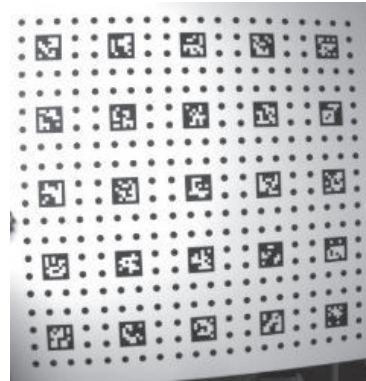


Abbildung 5 ArUco-Markerboard

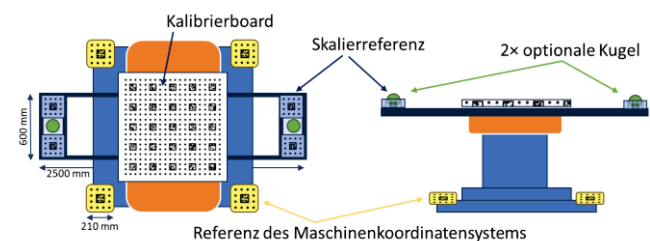


Abbildung 6 Schematische Anordnung der Kalibrier- und Referenzkörper

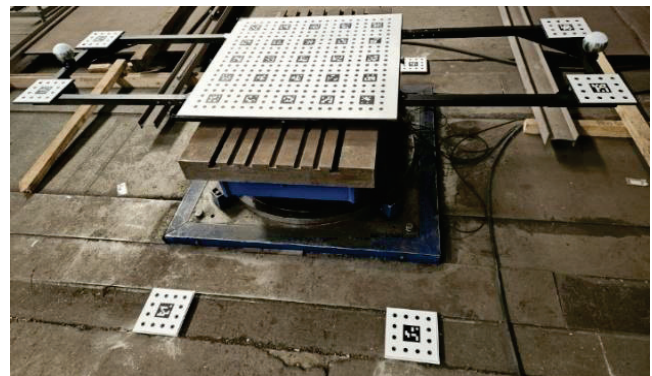


Abbildung 7 Foto der Anordnung der Kalibrierkörper: die auf dem Boden liegenden Platten sind magnetisch fixiert

Die Anforderungen an die Kalibrierung bestehen in der hohen mechanischen und thermischen Stabilität über einen ganzen Tag und der einfachen Handhabbarkeit. Letztere bedeutet, dass ein einfacher, leicht wiederholbarer Ablauf durch einen Werker innerhalb von maximal zehn Minuten ausgeführt werden kann.

Das Einmessen der vier Maschinenkoordinaten-Referenzmarken muss dabei nur einmal erfolgen. Der tägliche Kalibrierablauf umfasst folgende Schritte:

- Anbringen der vier MKS-Referenzmarkerplatten an der Befestigungsschiene mittels Magneten,
- Auflegen der Skalierreferenz,
- Auflegen des Kalibrierboards,
- Durchführung der Kalibriermessung per Knopfdruck,
- Abräumen der Kalibriermittel.

Der Vorgang dauert insgesamt zwischen fünf und zehn Minuten. Der Kalibrierablauf wird durch Abb. 8 veranschaulicht.

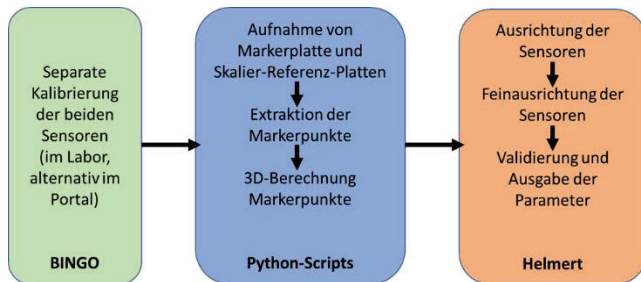


Abbildung 8 Schema des Kalibrierablaufs

Dabei wird eine einzige Aufnahme der Szene mit allen Kameras gemacht. Die Erfassung der Kreismittenpositionen auf den Markerplatten erfolgt mittels eigener Python-Softwaremodule. Mit den initialen Kalibrierdatensätzen werden die 3D-Koordinaten der Referenzpunkte berechnet, welche als Input der Helmert-Transformation dienen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Kalibrierung

Die Güte der Kalibrierung wurde durch Messungen von Ebenen-Normalen und 500 mm Kugelstäben (siehe Abb. 9) in Anlehnung an die ISO-10360-13 (ISO 2021) Norm evaluiert. Die Reproduzierbarkeit der Kalibrierungen wurde untersucht, indem mehrere Kalibrierungen hintereinander durchgeführt wurden.

Es wurden insgesamt fünf Kalibrierungen unter Verwendung der Kalibriersoftware BINGO (Bingo 2026) durchgeführt, wobei die Kalibrierungen 3, 4 und 5 am Tag nach den Kalibrierungen 1 und 2 stattfanden. Die Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierungen zwischen den jeweiligen Master-Kameras der beiden Sensoren dienen als Indikator für die Robustheit. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgelistet.

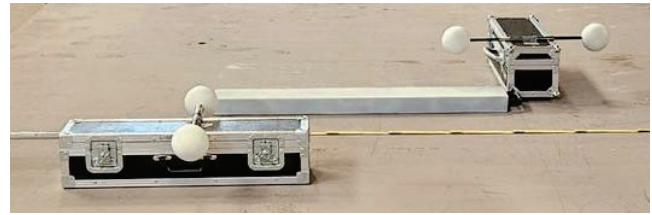


Abbildung 9 Zwei Kugelstäbe (500 mm) und 1000 mm Ebenheitsnormal im Messvolumen

Es fällt auf, dass es kaum Variationen bei den Parametern der Kalibrierung gibt, d. h. das System ist sehr stabil. Für den Skalierfaktor ergaben sich Werte zwischen 1.00018 und 1.00020 sowie beim Skalierfehler zwischen 0.2 und 0.3 mm bei einer Referenzlänge von 3 m.

Tabelle 1 Ergebnisse von fünf Kalibrierungen eines Sensors: Werte der Parameter der äußeren Orientierung

Nr	Translation in mm			Rotation in °		
	X	Y	Z	Φ	Ω	K
1	254.7	-527.3	3035.6	44.18	100.78	158.28
2	254.8	-527.2	3035.6	44.18	100.78	158.28
3	254.7	-527.3	3035.7	44.17	100.78	158.27
4	254.7	-527.3	3035.7	44.17	100.78	158.27
5	254.7	-527.2	3035.9	44.17	100.78	158.27
SD	0.045	0.055	0.084	0.005	0.0	0.005

Die Messungen der Kugelstablänge und der Ebenheit des Ebenheitsnormalen erfolgten in Anlehnung an die ISO-10360-13. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse von vier Messungen der beiden Kugelstäbe. Bei den Ebenheitsmessungen konnten keine „Durchbiegungen“ der ebenen Fläche festgestellt werden. Dies ist in erster Linie auf die geringe Fläche des Normalen im Verhältnis zur Messvolumengröße zurückzuführen, zeigt aber auch, dass keine groben Messfehler wegen unzureichender Verzeichnungs Korrektur auftreten.

Tabelle 2 Längenmessfehler ΔL der Kugelstabsmessungen

Nr	Kugelstab 1		Kugelstab 2	
	ΔL	SD	ΔL	SD
1	0.07	0.20	-0.38	0.32
2	0.12	0.23	-0.50	0.31
3	-0.51	0.39	-0.03	0.26
4	-0.35	0.45	0.48	0.32
PV	0.63		0.98	

Der maximale Längenfehler bei den Kugelstabsmessungen betrug ca. 0.5 mm und damit 0.1 % bezogen auf die Länge des Stabes.

Innerhalb der Helmert-Transformation erfolgt eine Optimierung der Kalibrierung der beiden Sensoren zueinander mit dem Effekt, dass typischerweise auftretende Klaffungen minimiert werden. Dies ist am Beispiel von Abb. 10 gut zu sehen.

Der Restfehler der Registrierung der 3D-Messdaten beider Sensoren betrug bei allen Messungen weniger als 1 mm über das gesamte Messvolumen, ebenso die Längenmessabweichung. Der Fehler der Ausrichtung auf das Maschinenkoordinatensystem war jeweils kleiner als 2 mm im gesamten Messvolumen.

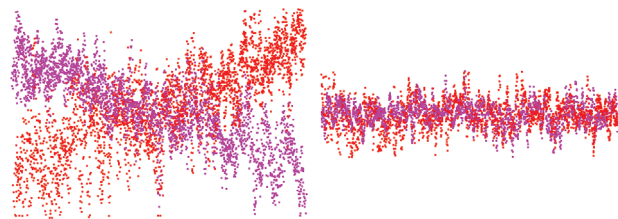


Abbildung 10 Profilschnitt durch die Messwerte des Ebenheitsnormals beider Sensoren vor (links) und nach (rechts) Optimierung

3.2 Messbeispiele

Das Ziel der Entwicklung bestand in der Vermessung der aktuellen Bearbeitungsposition am Blech und der Darstellung des Messergebnisses in Echtzeit, um den Werker in Zukunft bei der manuellen Qualitätskontrolle mittels Pappschablonen, die an das bearbeitete Blech gehalten werden, zu entlasten. Abbildung 11 zeigt das Messbeispiel einer Feuerschale mit den traditionellen Werkzeugen der Qualitätskontrolle im Vergleich mit dem 3D-Messergebnis, welches mit dem vorgestellten Sensornetzwerk innerhalb einer halben Sekunde auf dem Monitor angezeigt wird.

Abbildung 12 zeigt das Messbeispiel einer Rinne vor und nach der Bearbeitung sowie das 3D-Messergebnis in Falschfarbendarstellung sowie eine 3D-Darstellung des extrahierten Blechs.

4 Diskussion

Mit der erreichten Messgenauigkeit von unter einem Millimeter bei der maximalen Messpunktabweichung und der Längenmessabweichung und einer Messzeit von unter einer halben Sekunde ist das Sensornetzwerk für den konzipierten Fall der Vermessung großer Bleche geeignet.

Damit dürfte das Limit der mit der verwendeten Hardware erzielbaren Messgenauigkeit annähernd erreicht sein. Weitere Verbesserungen der Genauigkeit sind nur durch eine erweiterte Kameramodellierung, z. B. durch Verwendung des strahlbasierten Kameramodells zu erwarten.

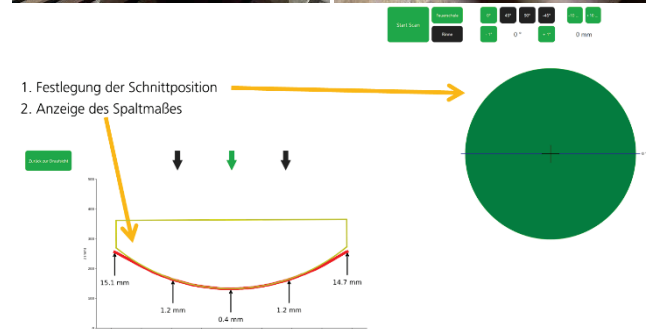


Abbildung 11 Messbeispiel Feuerschale: Formkontrolle mit Schablone (links oben), manuelle Maßkontrolle (rechts oben), Grafische Anzeige Messergebnis auf GUI (unten)

Das entwickelte Kalibrierverfahren ist anwenderfreundlich und auch für Nicht-Experten leicht durchführbar. Im Routinebetrieb beträgt der täglich zu leistende Aufwand etwa fünf Minuten.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse bei der Realisierung des Sensornetzwerks machen das System sowohl für den konzipierten Anwendungsfall bei der kaltplastischen Umformung großer Bleche als auch für andere Szenarien in der industriellen Produktion interessant. Die vom System erfassten Daten können weiter analysiert und bei der Realisierung automatisierter Prozessketten in der Produktion oder in der Qualitätskontrolle bei Soll-Ist-Vergleichen genutzt werden.

Zukünftige Arbeiten werden sich daher verstärkt mit den Möglichkeiten zur Automatisierung von Prozessen befassen, die durch die Nutzung der erfassten 3D-Daten des Sensornetzwerks unterstützt werden. Darüber hinaus wird die Erweiterung der Kameramodellierung hin zu einem strahlbasierten Ansatz untersucht, um die Erfassung von Objekten in noch größeren Messvolumina bei vergleichbaren Genauigkeitswerten zu ermöglichen.

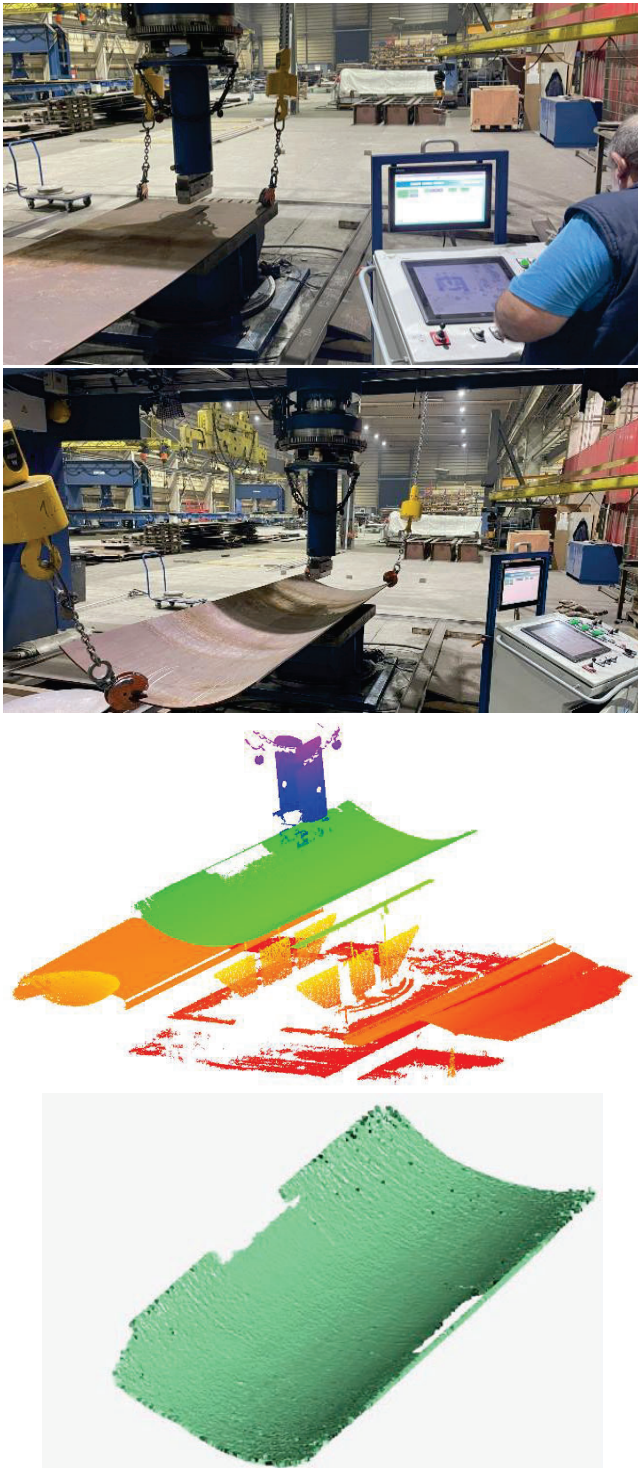


Abbildung 12 Blech vor der Bearbeitung, im Finalzustand, Falschfarbendarstellung aller Messpunkte und 3D-Ansicht der extrahierten Blechpunkte (von oben nach unten)

Danksagung

Das zugrundeliegende Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03SX575D gefördert.

Die Autoren danken den Mitarbeitern der beteiligten Partner am Vorhaben, nämlich der Ostseestahl GmbH & Co. KG Stralsund, der Universität Rostock – Lehrstuhl für Fertigungstechnik, des Fraunhofer-Instituts für Großstrukturen in der Produktionstechnik Rostock und der MSR-Service GmbH Mansfeld.

Literaturverzeichnis

- Bingo (2026). <https://bingo-atm.de> (Zugriff: 31.03.2026).
- Ceres (2026). <http://ceres-solver.org/> (Zugriff: 11.02.2026).
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. & Marin-Jimenez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* 47, 6 (June 2014), 2280-2292. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>.
- Heist, S., Lutzke, P., Schmidt, I., Dietrich, P., Kühmstedt, P., Tünnermann, A. & Notni, G. (2016). High-speed three-dimensional shape measurement using GOBO projection, *Optics and Lasers in Engineering* (87), 90-96.
- ISO (2021). ISO 10360-13. Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) — Part 13: Optical 3D CMS.
- Lin, P., Chang, G., Gao, J., Wang, Q. & Bian, H. (2019). Helmert transformation with mixed geodetic and Cartesian coordinates. *ScienceDirect, Advances in Space Research* 63, 2964-2971.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J., (2020). Close-range photogrammetry and 3D imaging. *De Gruyter*.
- Tango, Y., Ishiyama, M. & Suzuki, H. (2011). “IHIMU- α ” A Fully Automated Steel Plate Bending System for Shipbuilding. *IHI Engineering Review*, Vol. 14, No 1, 6-11.
- Zhang, H., Fu, W., Wang, X., Li, D., Zhu, D. & Su, X. (2025). An efficient model for metal surface defect detection based on attention mechanism and multi-scale feature. *J. Supercomput.* 81, 40. <https://doi.org/10.1007/s11227-024-06591-y>.

Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen von aktuellen kostengünstigen 3D-Handscannern

Malte Marsmann¹, Thomas P. Kersten¹, & Heinz-Jürgen Przybilla²,

Zusammenfassung

Kostengünstige, handgeführte 3D-Scannersysteme verschiedener Hersteller drängen zunehmend auf den Markt, insbesondere für den privaten Einsatz im 3D-Druck oder in Anwendungsfeldern wie der Digitalisierung kleiner Objekte, beispielsweise in Museen. Über die geometrische Leistungsfähigkeit und die Messstabilität dieser Systeme ist jedoch bislang wenig bekannt, da belastbare Untersuchungen in der Regel noch nicht vorliegen und meist nur die technischen Spezifikationen der Hersteller verfügbar sind. Im Labor für Photogrammetrie und Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg wurde die Einsatzfähigkeit sowie das geometrische Leistungspotenzial von drei sogenannten Low-Cost-3D-Handscannern – dem MetroX 3D Scanner und dem POP 3 Plus 3D Scanner von Revopoint sowie dem Moose 3D-Scanner von 3DMakerPro – anhand verschiedener Testkörper evaluiert. Zu diesen Testkörpern zählten unter anderem eine Granitplatte zur Untersuchung der Ebenheitsmessabweichung, eine Einsteinbüste, eine Moai-Figur, ein gedrucktes Treppenmodell und der sogenannte „Testy“. Die Testkörper wurden zur Bereitstellung von Referenzdaten mit dem hochgenauen Streifenprojektionssystem „ATOS 5“ der Firma Carl Zeiss GOM Metrology durch die Firma GDV Systems + Solution GmbH aus Bad Schwartau gescannt. In diesem Beitrag werden die erreichten geometrischen Genauigkeiten der vermaschten 3D-Modelle verschiedener Testkörper im Vergleich zu Referenzdaten für die untersuchten Systeme diskutiert. Darüber hinaus werden weitere Aspekte wie die Handhabung der Systeme, die Dauer der Einarbeitungszeit und die Kalibrierung der Messsysteme erläutert.

Schlagwörter 3D, Dreiecksvermaschung, Genauigkeit, handgeführte Systeme, Referenzkörper, Scannen, Vergleich

1 Einführung

Die Digitalisierung geometrischer Objekte mittels 3D-Scanning hat in vielen Bereichen an Bedeutung gewonnen, darunter in der industriellen Qualitätssicherung, in der Medizin und bei der Dokumentation des kulturellen Erbes. Mit der steigenden Nachfrage nach präzisen 3D-Daten hat sich der Markt für handgeführte 3D-Scanner in den letzten Jahren erheblich diversifiziert. Neben hochpreisigen Industriegeräten, die mehrere Zehntausend Euro kosten, sind zunehmend auch erschwingliche Systeme für einige Hundert Euro erhältlich. Diese richten sich an semiprofessionelle und private Anwender.

Ein zentrales Problem besteht darin, dass kostengünstige Scanner oft mit ungenauen oder unzureichend dokumentierten Genauigkeitsspezifikationen beworben werden. Dadurch wird eine objektive Bewertung ihrer Leistung sowie ein direkter Vergleich mit etablierten High-End-Systemen erschwert. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob kostengünstige Scanner eine technisch und wirtschaftlich tragfähige Alternative darstellen.

In diesem Beitrag wird die geometrische Genauigkeit ausgewählter handgeführter 3D-Scanner systematisch untersucht. Dazu werden drei kostengünstige Systeme mit zwei High-End-Geräten verglichen und anhand von fünf Referenzobjekten unter praktischen Bedingungen bewertet. In die Analyse fließen neben der geometrischen Genauigkeit auch Aspekte wie die Robustheit der Datenerfassung und die Effizienz ein.

Die Ergebnisse ermöglichen eine detailliertere Klassifizierung der aktuellen Scannerleistung und bieten Anwendern eine solide Grundlage, um das am besten geeignete System auszuwählen. Gleichzeitig machen sie die Grenzen und das Potenzial erschwinglicher Scanner deutlich und liefern Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen und Forschungsarbeiten.

2 Ähnliche Arbeiten

In den letzten Jahren wurde die Leistungsfähigkeit tragbarer 3D-Scanner in verschiedenen Anwendungskontexten untersucht. Während es für stationäre Systeme wie Laserscanner oder Photogrammetrie bereits standardisierte Genauigkeits-

¹ HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg, E-Mail: Malte.Marsmann@icloud.com, Thomas.Kersten@hcu-hamburg.de

² Ehemals Hochschule Bochum, E-Mail: hj@przybilla.biz

benchmarks gibt, sind die verfügbaren Daten zu mobilen 3D-Scannern, insbesondere im Niedrigpreissegment, nach wie vor sehr unterschiedlich.

Kersten et al. (2016a, 2016b, 2018) führten den ersten umfassenden Vergleich von sieben handgeführten 3D-Scannern verschiedener Preisklassen durch. Die Studie ergab eine große Bandbreite an erreichbaren Genauigkeiten und bot Anwendern somit eine erste Orientierungshilfe. Die meisten kostengünstigen Systeme wiesen aufgrund einer instabilen Maßstabskalibrierung systematische Abweichungen auf. Aufgrund der rasanten Fortschritte bei Hardware und Software sind diese Ergebnisse jedoch nur teilweise auf aktuelle kostengünstige Modelle übertragbar.

Lachat et al. (2017) untersuchten die geometrische Genauigkeit des handgeführten 3D-Scanners „FARO FreeStyle3D“ mithilfe von Laborexperimenten und einer Studie mit realen archäologischen Artefakten. Allegra et al. (2017) testeten handgeführte 3D-Scansysteme für den Einsatz im Bereich des Kulturerbes. Ameen et al. (2018) verglichen zwei Scanner mit unterschiedlichen Technologien zur Digitalisierung komplexer Automobilteile und bewerteten deren Genauigkeit und Effizienz.

Der Einsatz von Handscannern in medizinischen Anwendungen wurde bereits in mehreren Studien untersucht. So haben beispielsweise Rudolf et al. (2017) die Verwendung von 3D-Handscannern zur Erfassung von Körperformen für das Bekleidungsdesign untersucht und deren Eignung für ergonomisch anspruchsvolle Prozesse bestätigt. Andrews et al. (2019) setzten das handgeführte Scannen als minimalinvasive Technik zur anthropometrischen Vermessung von Neugeborenen ein. Xia et al. (2019) verglichen verschiedene Messtechniken zur Körperaufnahme, darunter die Verwendung eines stationären 3D-Scanners, eines tragbaren 3D-Scanners und eines Maßbandes. Darüber hinaus analysierten Skrzypiec et al. (2024) die Reproduzierbarkeit von Prothesenanwendungen und betonten dabei die Bedeutung standardisierter Testverfahren. Seo et al. (2025) validierten den Revopoint MINI beispielsweise für den Einsatz in medizinischen Studien an Mäusen und zeigten, dass kostengünstige Scanner die für volumetrische Analysen erforderliche Genauigkeit und Reproduzierbarkeit liefern können.

Wu et al. (2024) verwendeten einen Handscanner, um exakte 3D-Modelle von Früchten für Finite-Elemente-Simulationen in der Agrartechnik zu erstellen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bestehende Forschungsergebnisse darauf hindeuten, dass Handscanner ein breites Anwendungsspektrum haben und in einigen Fällen

eine hohe Genauigkeit erreichen können. Es fehlt jedoch eine systematische, messtechnisch fundierte Analyse, die kostengünstige und hochwertige Geräte hinsichtlich Robustheit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit direkt miteinander vergleicht. Diese Studie schließt diese Forschungslücke durch praktische geometrische Untersuchungen.

3 Untersuchte handgeführte 3D-Scanning-Systeme und Referenzobjekte

3.1 Handgeführte 3D-Scanning-Systeme

Für diese Studie wurden fünf handgeführte 3D-Scanner unterschiedlicher Preisklassen und Technologien ausgewählt (siehe Abb. 1). Als Referenz wurde das Streifenprojektionssystem ZEISS ATOS 5 verwendet, das gemäß VDI/VDE 2634 (2012) zertifiziert ist.



Abbildung 1 Handgeführte 3D-Scanner für geometrische Untersuchungen (v.l.n.r.) – Hexagon Absolute Arm mit AS1-Scanner, Hexagon MARVELSCAN, 3DMakerPro Moose, Revopoint MetroX und Revopoint Pop3 Plus (Die Darstellung der Systeme ist nicht maßstabsgetreu)

Zur Niedrigpreiskategorie gehörten der Revopoint Pop3Plus (Revopoint, 2025a), der Revopoint MetroX (Revopoint, 2025b) und der 3DMakerPro Moose (3DMakerPro, 2025). Diese Systeme kosteten zwischen 700 und 1200 Euro und basieren auf strukturierten Lichttechnologien. Die beiden High-End-Systeme waren der Hexagon MARVELSCAN (Hexagon Manufacturing Intelligence, 2025a) und der Hexagon Absolute Arm mit AS1-Scanner (Hexagon Manufacturing Intelligence, 2025b). Sie liegen im fünf- bis sechsstelligen Preisbereich und weisen eine zertifizierte Genauigkeit zwischen 0,02 und 0,05 mm auf. Die technischen Spezifikationen der Handheld-Scansysteme sind in Tabelle 1 aufgeführt.

3.2 Referenzobjekte

Für den Benchmarking-Test wurden die folgenden fünf Referenzobjekte mit unterschiedlichen Geometrien und Materialeigenschaften verwendet (siehe Abb. 2): eine ebene Granitplatte (300 mm × 300 mm) zur Analyse von Ebenheitsmessabweichung, eine 160 mm hohe Gipsbüste von Einstein für organische Formen und feine Details, ein 380 mm hoher „Testy“ vom Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin (Reulke & Misgaiski, 2012) für komplexe Geometrien, ein 100 mm × 100 mm × 100 mm großes 3D-gedrucktes Treppenmodell für Maßgenauigkeit und Kantschärfe, das aus fünf gleichmäßig angeordneten Stufen mit einer Höhe und Tiefe von jeweils 20 mm besteht, sowie eine Moai-Figur von der Osterinsel (Höhe 140 mm, maximale horizontale Abmessung ca. 60 mm × 55 mm) aus porösem Material zur Analyse der Reflexionseigenschaften. Das 3D-Treppenmodell wurde mit einem Prusa-Drucker aus Polymilchsäure gedruckt. Die 0,4 mm dicke Druckdüse ermöglicht eine reproduzierbare Produktion mit klar definierten geometrischen Kanten.

Zum Vergleich wurden alle fünf Objekte mit dem hochpräzisen Streifenprojektionssystem ATOS 5 von Carl Zeiss GOM Metrology gescannt. Das System ist für das schnelle 3D-Scannen und die Datenverarbeitung mit höherer Auflösung ausgelegt (Carl Zeiss GOM Metrology, 2024). Das ATOS 5 verwendet eine LED als Lichtquelle, hat einen Messbereich von 170 mm × 140 mm bis 1000 mm × 800 mm und einen Arbeitsabstand von 880 mm. Es kann außerdem bis zu 12 Millionen Punkte pro Scan messen. Die beiden Referenzkörper (Testy und Einsteins Büste) sowie die Granitplatte wurden bereits zur Analyse der geometrischen Genauigkeit der ersten Generation von 3D-Handscannern verwendet (Kersten et al., 2016b, 2016c, 2018), während Testy und die Einstein-Büste darüber hinaus zur Analyse der geometrischen Genauigkeit kostengünstiger Messsysteme (Kersten et al., 2016a) sowie von Mobiltelefonen (Kersten et al., 2024) dienen.



Abbildung 2 Übersicht über die verwendeten Referenzobjekte (von links nach rechts): Granitplatte, Einstein-Büste, Testy-Modell, Treppenmodell und Moai-Figur

4 Datenerfassung und -verarbeitung

Alle Scanner wurden gemäß den Herstellerangaben kalibriert. Während der Revopoint Pop 3 Plus und der MetroX eine Kalibrierung durch den Benutzer mit Referenzplatten erforderten, basierte der 3DMakerPro Moose auf werkseitig eingestellten Kalibrierungsparametern. Die High-End-Systeme verwendeten standardisierte Kalibrierungsverfahren gemäß den VDI/VDE-Normen. Der ZEISS ATOS 5 mit seiner fortschrittlichen Kamertechnologie, seiner starken Blaulichtquelle und seiner leistungsstarken Software diente als Referenzsystem und bildete die Grundlage für alle 3D-Vergleiche. Das Scannen der Referenzobjekte mit dem ATOS 5 wurde im Januar 2024 und 2025 (nur Treppenmodell) von der GDV Systems + Solutions GmbH in Bad Schwartau im Geodätischen Labor der HafenCity Universität Hamburg (HCU) durchgeführt. Ziel war es, eine vollständige, hochauflösende Digitalisierung der Testobjekte zu erreichen, um die Eigenschaften der jeweiligen Handscanner hinsichtlich Auflösung, Detailerkennung und geometrischer Genauigkeit zu bewerten.

Tabelle 1 Technische Spezifikationen (der Hersteller) für die untersuchten handgeführten 3D-Scanner

Hersteller	System	Ge [mm]	RW [m]	G [g]	Messverfahren	Preis (ca.) [€]
Hexagon	Abs. Arm+Scan.	±0.006–0,04	1.5–4.5	10000	Laserlinien/taktil	100,000–150,000
Hexagon	MARVELSCAN	±0.02–0,03	0.2–0.5	1300	Blaulicht SPS	40,000–60,000
Revopoint	POP 3 Plus	±0.08	0.15–0.4	190	IR SPS	700
Revopoint	MetroX	±0.03	0.2–0.4	385	Blaulicht SPS	1,200
3DMarkerPro	Moose	±0.03	0.02–1.5	280	Blaulicht SPS	700

Ge ... Genauigkeit, RW ... Reichweite, G ... Gewicht, SPS ... Streifenprojektionssystem

Die Objekte wurden im Februar und März 2025 mit dem Revopoint POP 3 Plus und MetroX gescannt. Vor der Datenerfassung wurde eine benutzergeführte Kalibrierung mit der mitgelieferten Kalibrierplatte in der Software „Revo Scan 5“ durchgeführt. Da jedoch keine überprüfbaren Kalibrierungsdaten ausgegeben wurden, war eine vollständige Rückverfolgbarkeit gemäß den messtechnischen Standards nicht möglich. Um die Detailgenauigkeit zu maximieren, wurde der Drehtischmodus verwendet. Dabei wurden minimale Drehwinkel zwischen den einzelnen Scans konfiguriert, um eine hohe Abdeckung und ausreichende Überlappung der Scandaten zu gewährleisten. Zur Unterstützung der visuellen Verfolgung wurden Zielmarken in unmittelbarer Nähe der Testobjekte positioniert. Bei größeren Objekten wie dem „Testy“ wurden zusätzliche Marker auf dem Objekt selbst angebracht. Während des Scanvorgangs kam es wiederholt zu Verbindungsabbrüchen zwischen dem Drehteller und der Steuerungssoftware, was den Messvorgang erheblich verzögerte. Außerdem stellte sich heraus, dass die verfügbaren Rechenressourcen nicht effizient genutzt wurden. Obwohl die GPU-Beschleunigung in der Software aktiviert war, wurden rechenintensive Aufgaben weiterhin ausschließlich von der CPU verarbeitet. Dies hatte negative Auswirkungen auf die Reaktionsfähigkeit des Systems und die Verarbeitungsgeschwindigkeit.



Abbildung 3 Scannen des Treppenmodells auf dem Drehteller mit MetroX (links) und Scannen des Testy auf einer schwarzen Kunststoffmatte mit Zielmarken (Mitte und rechts)

Die Testobjekte wurden im März 2025 mit dem 3DMarkerPro Moose gescannt. Das System wurde durch Einfügen der mitgelieferten Kalibrierungsdatei in die Software kalibriert, weshalb kein benutzergesteuertes oder nachvollziehbares Kalibrierungsverfahren durchgeführt wurde. Zum Scannen wurde der Handheld-EasyScan-Modus verwendet, da der TableScan-Modus unpraktisch war. Dies zeigte sich insbesondere bei größeren Objekten, bei denen die begrenzte Anzahl zulässiger Scans und die erhöhte Fehleranfälligkeit

bei der Registrierung den Erfassungsprozess einschränkten. Die markerlose Objektverfolgung wurde entweder mit textur- oder geometriebasierten Methoden durchgeführt. Aufgrund der weitgehend unstrukturierten Beschaffenheit der Testobjekte kam die geometriebasierte Variante zum Einsatz. Die Scans wurden im hochauflösenden „Fine-Mode“ durchgeführt. Um alle Oberflächen der Objekte vollständig zu erfassen, waren mehrere einzelne Scans erforderlich.

Die Datenerfassung mit dem MARVELSCAN und dem Absolute Arm wurde am 24. Februar 2025 unter Aufsicht eines technischen Mitarbeiters von Hexagon durchgeführt (siehe Abb. 5). Vor Beginn der MARVELSCAN-Messung wurde eine benutzergeführte Kalibrierung mit der mitgelieferten Kalibrierungsplatte durchgeführt (siehe Abb. 4). Im Gegensatz dazu war der Absolute Arm mit dem AS1-Scanner werkseitig kalibriert und eine Neukalibrierung vor Ort war gemäß den Spezifikationen nicht erforderlich. Das integrierte Photogrammetriemodul des MARVELSCAN wurde bei dieser Untersuchung nicht verwendet. Die Selbstlokalisierung des Scanners basierte auf einem markergestützten Referenzfeld, das auf der Messbasis installiert war. Dadurch war es nicht erforderlich, zusätzliche Marker direkt auf dem Testobjekt anzubringen. Die Messung wurde manuell durchgeführt und zeichnete sich durch kurze Scanzeiten sowie sofortiges visuelles Feedback über die Benutzeroberfläche aus. Dadurch war eine effiziente Datenerfassung möglich. Bei komplexen Geometrien wurde der Scan-Modus während der Aufzeichnung angepasst, um möglichst vollständige und qualitativ hochwertige Daten zu erhalten.

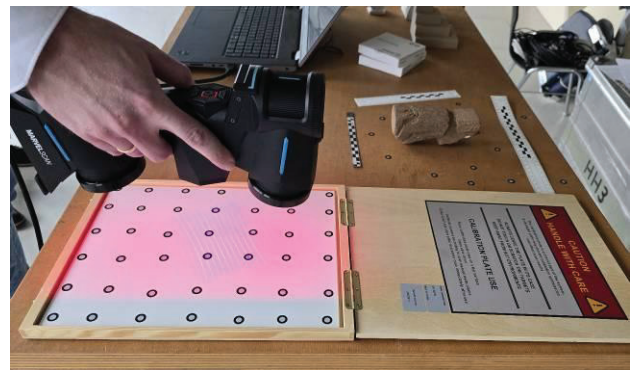


Abbildung 4 Kalibrierung des MARVELSCAN mit einer präzisen Kalibrierplatte

Im Rahmen der Datenerfassung wurden taktile Einzelpunktmessungen mit dem Sondermodul durchgeführt, während die gesamte Oberfläche mit dem Hexagon Absolute Arm 7-Axis mit AS1-Scanner (siehe Abb. 5 rechts) gescannt wurde. Diese beiden Messmethoden konnten direkt im System umgeschaltet werden, ohne dass eine Neuausrichtung

oder Neukalibrierung erforderlich war. Die räumliche Lokalisierung des Messkopfes erfolgte über den Absolut-Drehgeber in allen Gelenken des Arms. Dadurch war es möglich, Messungen ohne externe Referenzmarken durchzuführen. Ein OLED-Display am Gerät sowie visuelle und akustische Rückmeldesignale unterstützten den Benutzer während des Messvorgangs. Das geführte Design des Messarms beeinträchtigte die Benutzerfreundlichkeit nicht und ermöglichte eine zuverlässige Datenerfassung ohne nennenswerte Unterbrechungen.

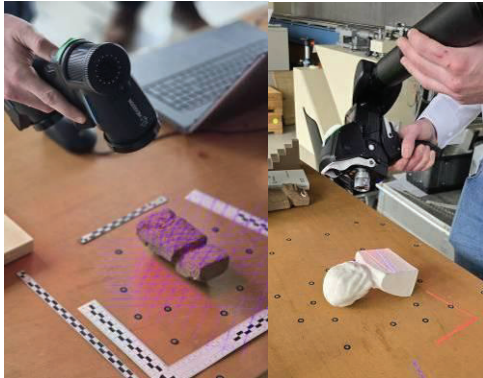


Abbildung 5 Scannen der Moai-Figur mit MARVEL-SCAN (links) und Scannen des Einstein-Büste mit dem Absolute Arm und dem ASI-Scanner (rechts)

Die anschließende Datenverarbeitung erfolgte mit der entsprechenden Software für den Revo Scan 5 (Revopoint POP 3 Plus) bzw. den Revo Scan 5 MetroX (MetroX-Scanner). Zunächst wurden aus den Teil-Scans einzelne Punktwolken mit einer definierten Auflösung von 0,1 mm für den POP 3 Plus bzw. 0,05 mm für den MetroX generiert. Die Moose-Scandaten wurden in der Scan-Software JMStudio (vorgegebener Workflow des Herstellers) verarbeitet, die MARVELSCAN-Scans in PolyWorks und die Daten des Absolute Arm 7-Axis mit ASI-Scanner in SpatialAnalyzer. Vor dem Zusammenführen wurden die Punktwolken mithilfe integrierter Isolations- und Überlagerungsalgorithmen bereinigt, um nicht verbundene oder redundante Datenbereiche zu entfernen. Anschließend wurden die bereinigten Teil-Scans zu einer konsistenten Gesamtpunktwolke zusammengeführt und einer weiteren strukturellen Optimierung unterzogen. Auf Basis dieser Punktwolke wurde ein trianguliertes Oberflächenmodell generiert und mithilfe von Isolationsmethoden sowie softwaregestütztem Füllen lokaler Datenlücken weiter verfeinert. Die endgültige Geometrie wurde im STL-Format für die anschließende geometrische Analyse exportiert. Diese basierte auf Mesh-zu-Mesh-Vergleichen zwischen den gescannten Daten und den Referenzmodellen und wurde mit der Software Geomagic Wrap durchgeführt.

Sie umfasste Best-Fit-Ausrichtung, farbcodierte Abweichungskarten und statistische Auswertungen.

5 Ergebnisse für die Referenzobjekte

5.1 Granitplatte

Bei der Berechnung mit der GOM Inspect-Software zeigten sich bei der Granit-Messplatte erhebliche Unterschiede zwischen den Scanner-Kategorien. High-End-Systeme erzielten Abweichungen (durchschnittlicher Abstand) von weniger als 0,05 mm und überzeugten durch eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit. Im Gegensatz dazu wiesen kostengünstige Scanner größere Abweichungen und erhebliche systematische Effekte auf, wie die farbcodierte Visualisierung in Abb. 6 zeigt. Der MetroX erzielte akzeptable Abweichungen von 0,29 mm, während der Pop 3 Plus mit einem durchschnittlichen Abstand von 1,7 mm das schlechteste Ergebnis erzielte. Der Moose war hinsichtlich des durchschnittlichen Abstands etwas genauer als der Pop 3 Plus, bei längeren Scans jedoch weniger stabil.

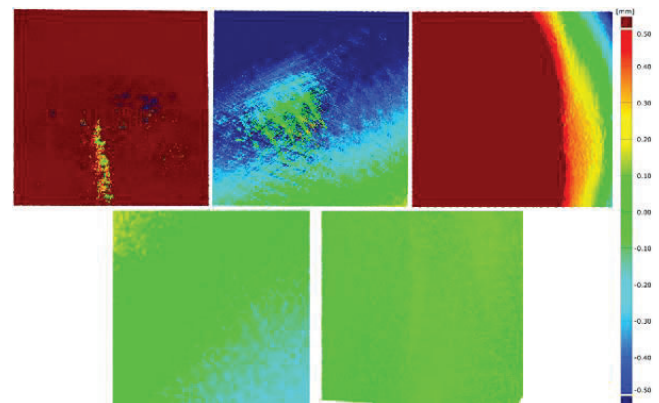


Abbildung 6 Oberflächenabweichungen [mm] der 3D-Vermaschung der Granitplatte (GOM Inspect: Testdaten vs. Ebene) v. l. n. r.: oben – Revopoint Pop 3 Plus, Revopoint MetroX, 3DMakerPro Moose; unten – Hexagon MARVELSCAN und Hexagon Absolute Arm [Spanne der farbcodierten Maßstabsleiste $\pm 0,5$ mm]

Wie Tabelle 2 zeigt, gibt es erhebliche Unterschiede bei den charakteristischen Abweichungen zwischen den einzelnen Systemen. Die durchschnittliche Abweichung reicht von 0,04 mm bis 1,68 mm und auch die Standardabweichung schwankt erheblich. Hochpreisige Systeme wie der „Absolute Arm“ und der „MARVELSCAN“ von Hexagon zeichnen sich durch geringe durchschnittliche Abweichungen und eine konsistente Farbcodierung der Oberflächenabweichungen aus (siehe Abb. 6). Im Gegensatz dazu weisen

kostengünstigere Geräte wie der Pop 3 Plus, der MetroX und der Moose ausgeprägte Oberflächenverzerrungen und eine erhöhte Streuung auf. Darüber hinaus wurden erhebliche Unterschiede bei den maximalen Abständen zwischen kostengünstigen und hochwertigen Scansystemen festgestellt. Dies wurde durch die Messung von fünf ausgewählten Punkten zur angepassten Ebene bestätigt (siehe Tabelle 2). Bemerkenswert ist, dass die beiden Revopoint-Scanner im Vergleich zu den anderen drei Scannern eine hohe Anzahl von Dreiecken und eine große Dateigröße aufweisen. Gleiches gilt für die folgenden Testobjekte. Das Scannen wurde jedoch bewusst mit der höchsten Auflösung durchgeführt, um für diese beiden Systeme die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 2 Ebenheitsmessabweichung an der Granitplatte - Abweichungen zur ausgeglichenen Ebene für die verschiedenen handgeführten 3D-Scansysteme

Systeme [mm]	P3	MX	Mo	MS	AS1
# Dreiecke [Tsd.]	39850	7396	847	700	332
File [MB]	1951	1228	142	113	55
Ø Abweich.	1.68	-0.40	0.89	-0.04	0.05
Std. abw.	0.96	0.29	0.60	0.08	0.03
Max Abw. +	3.85	1.41	1.89	0.25	0.13
Max Abw. -	-3.85	-1.41	-1.89	-0.25	-0.13
Abw. @P1	1.54	-0.26	1.69	-0.07	0.07
Abw. @P2	2.08	-1.16	1.70	0.06	0.06
Abw. @P3	2.51	-0.63	-0.24	-0.04	0.10
Abw. @P4	2.62	0.05	0.11	-0.21	0.06
Abw.@P5	2.72	-0.06	0.99	-0.06	0.04

P3...Pop 3 Plus, MX...MetroX, Mo...Moose, MS...MARVELSCAN, AS1... Absolute Arm & AS1

5.2 Einstein-Büste

Zur Analyse der geometrischen Genauigkeit der untersuchten 3D-Scansysteme wird die Büste von Albert Einstein verwendet. Aufgrund ihrer Kombination aus geringer Textur und geometrischer Komplexität, welche die Detailtreue hervorhebt, eignet sich das Modell besonders gut zur Bewertung der Qualität der Datenerfassung und -rekonstruktion.

Alle getesteten Handscanner waren in der Lage, das gesamte Testobjekt zu erfassen. Die gemessenen Oberflächenabweichungen lagen bei allen Modellen innerhalb einer Toleranz von $\pm 0,5$ mm. Eine Ausnahme bildeten die Revopoint-Scanner, die eine maximale Abweichung von $\pm 7,6$ mm aufwiesen. Trotz dieser hohen Erfassungsleistung gab es deutliche Unterschiede in der Qualität der rekonstruierten Geometrien. Diese sind sowohl visuell (siehe Abb. 7) als auch statistisch (siehe Tabelle 3) erkennbar. Ein Vergleich

der Scansysteme zeigt deutliche Qualitätsunterschiede (siehe Abb. 7).

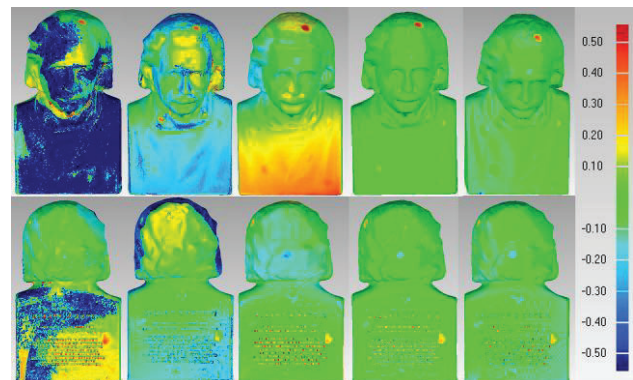


Abbildung 7 Oberflächenabweichungen [mm] der 3D-Modelle der Einstein-Büste (in Geomagic Wrap: Testdaten vs. Referenzobjekt). Oben: Vorderseite, unten: Rückseite, v. l. n. r. – Revopoint Pop 3 Plus, Revopoint MetroX, 3D-MarkerPro Moose, Hexagon MARVELSCAN und Hexagon Absolute Arm.

Tabelle 3 Abweichungen zwischen dem 3D-Modell der Einstein-Büste und dem ATOS 5-Referenzmodell für die handgeführten Scansysteme im Vergleich

Systeme [mm]	P3	MX	Mo	MS	AS1
# Dreiecke [Tsd.]	26382	55689	869	1688	545
File [MB]	1288	2719	42	82	26
Ø Abweich.	-0.58	-0.15	0.03	-0.00	-0.05
Ø Abweich. +	0.30	0.19	0.13	0.04	0.04
Ø Abweich. -	-0.93	-0.21	-	-0.03	-0.06
Std. abweich.	1.26	0.47	0.13	0.13	0.06
Max Abw. +	7.60	7.60	0.77	0.71	2.80
Max Abw. -	-7.60	-7.60	-	-0.35	-1.88
Spanne	15.20	15.20	1.19	1.06	4.68

P3...Pop 3 Plus, MX...MetroX, Mo...Moose, MS...MARVELSCAN, AS1... Absolute Arm & AS1

Insbesondere die kostengünstigen Scanner weisen ein inkonsistentes Abweichungsmuster auf. Neben großflächigen Verzerrungen sind in den geometrisch komplexen Bereichen um die Ohren herum insbesondere systematische Abweichungen von der Referenzgeometrie erkennbar. Im Gegensatz dazu liefern die höherpreisigen Systeme von Hexagon eine homogene und visuell konsistente Rekonstruktion der Objektgeometrie. Die resultierenden Oberflächen zeichnen sich durch geringe Abweichungsamplituden und eine hohe Oberflächenkohärenz aus. Dies deutet auf eine zuverlässige Erfassungsleistung hin. Bemerkenswert ist jedoch auch, dass der 3DMakerPro Moose die statistisch genauesten Parameter der kostengünstigen Scanner erzielt, die denen der High-End-Scanner sehr nahekommen. Dieses System hat einen

sehr niedrigen Mittelwert und eine minimale Standardabweichung, was auf eine hohe Genauigkeit hindeutet. Dennoch zeigt die visuelle Analyse lokal begrenzte systematische Effekte im vorderen Bereich.

5.3 Testy

In der geometrischen Analyse kommt das Testy-Modell zum Einsatz, um die Scan-Genauigkeit und Tiefenauflösung von 3D-Scansystemen zu bewerten. Aufgrund seiner komplexen Geometrie und weitgehend strukturfreien Oberfläche eignet es sich besonders gut zur Identifizierung von Abweichungen für die handgeführten Scanner. So deckte das Testy-Modell die Grenzen kostengünstiger Geräte auf. Im Gegensatz dazu erfassten High-End-Systeme die Geometrie vollständig und konsistent.

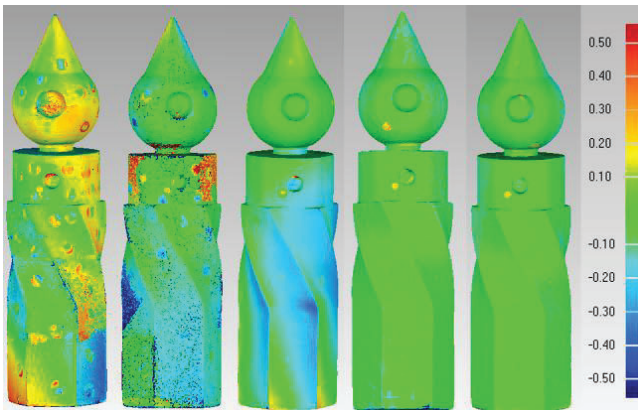


Abbildung 8 Oberflächenabweichungen [mm] der 3D-Modelle vom Testy (Geomagic Wrap: Testdaten vs. Referenzobjekt). v. l. n. r. – Revopoint Pop 3 Plus, Revopoint MetroX, 3DMakerPro Moose, Hexagon MARVELSCAN und Hexagon Absolute Arm.

Die Vergleiche der Oberflächen, die mit den verschiedenen 3D-Systemen gescannt wurden, zeigen deutliche Unterschiede in der Qualität der Oberflächendarstellung sowie in der geometrischen Genauigkeit. Selbst eine visuelle Analyse der farbcodierten Darstellungen der Abweichungen macht erhebliche Unterschiede im Ausmaß und in der Verteilung der Oberflächenabweichungen deutlich (siehe Abb. 8). In den Daten der Systeme Pop 3 Plus und MetroX sind insbesondere an Übergängen zwischen Teilflächen Artefakte zu erkennen. Dies kann auf Schwächen bei der Oberflächenrekonstruktion oder eine unzureichende Stabilität bei der Registrierung der Punktwolken hindeuten. Beim Vergleich der Systeme „Pop 3 Plus“ und „MetroX“ bleiben außerdem einzelne Referenzmarker auf der Oberfläche des Objekts sichtbar, während dies beim System „3DMakerPro Moose“ in

viel geringerem Maße der Fall ist. Dies deutet darauf hin, dass die Glättungs- oder Filterprozesse während der Nachbearbeitung begrenzt sind.

Tabelle 4 Abweichungen zwischen dem 3D-Modell vom Testy und dem ATOS 5-Referenzmodell für die 3D-Handscanner

Systeme [mm]	P3	MX	Mo	MS	AS1
# Dreiecke [Tsd.]	23949	43492	1322	1326	517
File [MB]	1169	2124	65	61	25
Ø Abweich.	-0.05	-0.08	-0.03	-0.04	-0.03
Ø Abweich. +	0.24	0.73	0.12	0.05	0.02
Ø Abweich. -	-0.44	-0.29	-0.11	-0.05	-0.04
Std. abweich.	1.06	1.57	0.19	0.12	0.05
Max Abw. +	15.3	15.3	12.8	0.68	9.26
Max Abw. -	-15.3	-15.3	-0.8	-15.3	-0.51
Spanne	30.6	30.6	13.6	15.9	9.77
P3...Pop 3 Plus, MX...MetroX, Mo...Moose, MS...MARVELSCAN, AS1... Absolute Arm & AS1					

Die visuelle Analyse wird durch die in Tabelle 4 dargestellten quantitativen Vergleichswerte untermauert. Insbesondere die Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Oberflächenabweichungen bestätigen die früheren qualitativen Beobachtungen. Die Systeme Pop 3 Plus und MetroX von Revopoint weisen deutlich höhere mittlere Abweichungen und Streuungen auf, wie in der farbcodierten Visualisierung (siehe Abb. 8) zu sehen ist. Umgekehrt nähern sich die Ergebnisse des 3DMakerPro Moose den Werten der höherklassigen Systeme wieder an, obwohl im unteren Teil des Tests (blauer Bereich) einige systematische Effekte sichtbar sind. Die Scanner MARVELSCAN und AS1 zeigen eine hohe Übereinstimmung mit dem Referenzmodell und liefern stabile sowie präzise Messergebnisse. Aufgrund der hohen Komplexität des Objekts gibt es jedoch auch bei den beiden High-End-Scannern etwas höhere maximale Abweichungen (siehe Tabelle 4).

5.4 Treppenmodell

Um die Auflösung, Maßgenauigkeit und Formtreue der 3D-Scansysteme zu analysieren, wurde das Treppenmodell verwendet. Aufgrund seiner regelmäßigen Geometrie, der ausgeprägten Kantenübergänge und der weitgehend strukturfreien Oberfläche ist das genaue Scannen der verfügbaren geometrischen Informationen eine Herausforderung. Das Treppenmodell bestätigte die überlegene Maßgenauigkeit und Kantenschärfe von High-End-Systemen: Diese reproduzierten die Stufen mit Abweichungen von weniger als 0,05 mm. Im Gegensatz dazu neigten kostengünstige Scanner

dazu, Kanten zu verwischen. Der Moose-Scanner erzielte die besten Ergebnisse in seiner Kategorie (siehe Tabelle 5), während der Pop 3 Plus eine deutliche Abrundung aufwies und auch signifikante systematische Effekte zeigte. Die durchweg negativen Abweichungen der Scans des Treppenmodells mit dem Revopoint Pop 3 Plus und dem MetroX deuten auf eine systematische Unterdimensionierung der Geometrie hin (siehe Abb. 9). Dieses Verhalten lässt auf einen Maßstabfehler im Rekonstruktionsprozess schließen, bei dem die erfassten Abstände durchweg kleiner sind als die tatsächlichen Abmessungen des Bauteils.

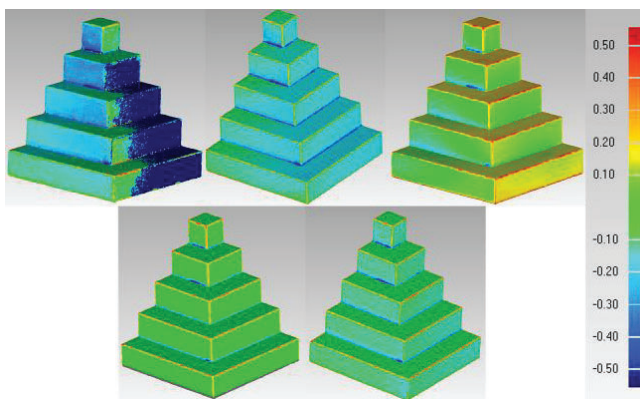


Abbildung 9 Oberflächenabweichungen [mm] der 3D-Modelle des Treppenmodells (Geomagic Wrap: Testdaten vs. Referenzobjekt). Oben v. l. n. r. – Revopoint Pop 3 Plus, Revopoint MetroX und 3DMakerPro Moose, unten Hexagon MARVELSCAN (links) und Hexagon Absolute Arm (rechts).

Tabelle 5 Abweichungen zwischen 3D-Modell vom Treppenmodell und dem ATOS 5-Referenzmodell für fünf Handscanner

Systeme [mm]	P3	MX	Mo	MS	AS1
#Dreiecke [Tsd]	17038	39515	857	492	141
File [MB]	831	1929	42	24	9
Ø Abweichung	-0.41	-0.13	0.09	0.02	-0.05
Ø Abweich. +	0.15	0.13	0.12	0.05	0.07
Ø Abweich. -	-0.47	-0.15	-0.06	-0.02	-0.09
Std. abweich.	0.66	0.10	0.10	0.08	0.10
Max Abw. +	6.99	0.96	0.81	0.86	3.50
Max Abw. -	-7.09	-7.08	-0.55	-0.65	-0.75
Spanne	14.08	8.04	1.36	1.51	4.25
P3...Pop 3 Plus, MX...MetroX, Mo...Moose, MS...MARVELSCAN, AS1... Absolute Arm & AS1					

Ein visueller Vergleich der Treppenmodelle zeigt, dass MARVELSCAN die Treppengeometrie insgesamt am konsistentesten darstellt. Die Oberflächen wirken gleichmäßig erfasst, die Kanten sind klar konturiert und es gibt keine

signifikanten lokalen Abweichungen. Dies deutet auf eine konsistente und stabile Oberflächenrekonstruktion hin (siehe Abb. 9).

Der Hexagon Absolute Arm mit dem AS1 zeigt vor allem auf vertikalen Strukturflächen ein erkennbares Muster der Oberflächenabweichung. Im Gegensatz dazu sind auf horizontalen Flächen keine vergleichbaren Abweichungsmuster sichtbar. Abgesehen von dieser Richtungsneigung zeigt die Rekonstruktion eine homogene Oberflächenstruktur mit konsistenter geometrischer Wiedergabe.

Allerdings haben alle Scanner Probleme damit, die scharfen Kanten der Treppe im rekonstruierten Modell im Vergleich zum Referenzmodell von ATOS 5 korrekt wiederzugeben.

5.5 Moai-Figur

Die Moai-Figur wird verwendet, um die Qualität des geometrischen Scannens unter schwierigen Bedingungen hinsichtlich der verwendeten Materialien und Reflexionen zu untersuchen. Aufgrund ihrer porösen Oberfläche, ihrer feinen Mikrostruktur sowie ihrer kontrastreichen, unterschiedlich reflektierenden Oberflächen stellt das Objekt hohe Anforderungen an die Stabilität und die Genauigkeit der Aufnahmen bei der optischen Datenerfassung. Zu beachten ist außerdem, dass das Testobjekt während der Referenzaufnahme mit ATOS 5 mit Markierungen versehen wurde, die bei den nachfolgenden Messungen mit den Vergleichssystemen nicht vorhanden waren. Daher gibt es lokale Abweichungen in den relevanten Bereichen (rote Punkte in Abb. 10), die nicht auf die Aufnahmeeigenschaften der jeweiligen Scanner zurückzuführen sind und daher bei der Bewertung nicht berücksichtigt werden.

Da für dieses Modell keine Daten mit dem Hexagon Absolute Arm erfasst wurden, kann es nicht in die folgende Bewertung einbezogen werden. Unter den anspruchsvollen Bedingungen mit den verwendeten Materialien und deren Reflexionseigenschaften zeigte der MARVELSCAN eine stabile Performance, wohingegen die kostengünstigen Scanner vermehrt Probleme aufwiesen. Der Moose-Scanner lieferte nach der Nachbearbeitung gelegentlich akzeptable Modelle, während der Pop 3 Plus und der MetroX unter Rauschen, Tracking-Verlusten, systematischen Effekten und unvollständigen Oberflächen litten.

Ein Vergleich der 3D-Oberflächendaten mit dem Referenzdatensatz von ATOS 5 zeigt deutliche Unterschiede in der Erfassungsqualität der Scansysteme. Insbesondere die Revopoint-Geräte (Pop 3 Plus und MetroX) weisen größere und unregelmäßigere Abweichungen auf. Dies ist sowohl aus der Farbverteilung der Abweichungsdarstellungen

(siehe Abb. 10) als auch aus den statistischen Parametern (siehe Tabelle 6) ersichtlich. Im Gegensatz dazu zeigen der 3DMakerPro Moose und der Hexagon MARVELSCAN eine konsistentere und gleichmäßigere Abweichungsverteilung. Dies deutet auf einen stabileren Oberflächenrekonstruktionsprozess hin.

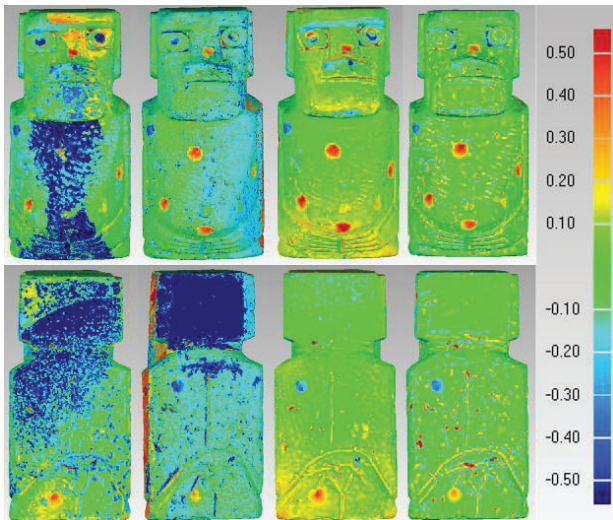


Abbildung 10 Oberflächenabweichungen [mm] der 3D-Modelle des Moai (Geomagic Wrap: Testdaten vs. Referenzobjekt). Oben Vorderseite, unten Rückseite, v. l. n. r. – Revopoint Pop 3 Plus, Revopoint MetroX, 3DMakerPro Moose und Hexagon MARVELSCAN.

Tabelle 6 Abweichungen zwischen 3D-Modell vom Moai und dem ATOS 5-Referenzmodell für vier Handscanner

Systeme [mm]	P3	MX	Mo	MS
#Dreiecke [Tsd]	5655	19756	355	305
File [MB]	275	965	17	15
Ø Abweichung	-0.24	-0.24	0.05	0.01
Ø Abweich. +	0.28	0.62	0.08	0.07
Ø Abweich. -	-0.57	-0.41	-0.05	-0.05
Std. abweich.	1.19	1.07	0.10	0.10
Max Abw. +	7.00	7.00	1.50	4.86
Max Abw. -	-7.00	-7.00	-1.81	-5.95
Spanne	14.00	14.00	3.31	10.81

P3...Pop 3 Plus, MX...MetroX, Mo...Moose,
MS...MARVELSCAN, AS1... Absolute Arm & AS1

Die Augenpartie der Moai-Statue stellt bei der Modellierung eine besondere Herausforderung dar, da die Kombination aus scharf definierten Schwarz-Weiß-Strukturen und komplexen lokalen Geometrien hohe Anforderungen an die optische Sensortechnologie und Datenverarbeitung stellt. Die mit dem Pop 3 Plus und dem MetroX erfassten Scans weisen im Bereich der Pupillen erhebliche Abweichungen

auf. Während der Moose-Scanner die zentralen Strukturen konsistenter erfasst, hat er Schwierigkeiten mit dem Übergang zur Pupille. Im Gegensatz dazu erfasst der MARVELSCAN diesen Bereich durchweg stabil und genau.

6 Diskussion und Bewertung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit zeigen, dass sich die Präzision, Robustheit und Detailtreue von Handscannern je nach Preis und Technologie erheblich unterscheiden. High-End-Systeme liefern durchweg hochpräzise Ergebnisse und eignen sich daher für industrielle Anwendungen, die eine Genauigkeit im Submillimeterbereich erfordern. Aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten und komplexen Bedienung sind sie jedoch auf den professionellen Einsatz beschränkt.

Unter den getesteten kostengünstigen Geräten schnitt der Moose-Scanner gut ab. In einigen Tests erreichte er eine ähnliche Genauigkeit wie High-End-Scanner, obwohl die Abweichungen größer waren. Er eignet sich daher möglicherweise für Anwendungen, die eine moderate Genauigkeit erfordern. Im Gegensatz dazu wiesen der Pop 3 Plus und der MetroX erhebliche Probleme hinsichtlich Stabilität und Detailwiedergabe auf. Dadurch ist ihre Anwendung auf einfache Geometrien beschränkt. Darüber hinaus erzeugen die beiden Revopoint-Scanner Punktwolken und Dreiecksnetze, die bis zu 280-mal größer sind als die der beiden High-End-Scanner sowie des Moose-Scanners, welches auf die hohe Auflösung zurückzuführen ist. Die große Datenmenge und Dateigröße verursachen Probleme der Computerleistung bei der Verarbeitung der Daten. Das Scannen wurde jedoch bewusst mit der höchsten Auflösung durchgeführt, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen. Dennoch ist es sinnvoll, die Datenmenge angemessen zu reduzieren, um sie handhabbar zu machen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ermöglichen erschwingliche Scanner einen breiteren Zugang zu 3D-Scantechnologien – insbesondere für neue Nutzergruppen. Allerdings können die geringere Robustheit und der erhöhte Nachbearbeitungsaufwand den offensichtlichen Kostenvorteil wieder zunichtemachen. Insgesamt ergänzen kostengünstige Scanner High-End-Geräte, können diese aber nicht ersetzen.

Trotz methodischer Einschränkungen liefern die vorliegenden Ergebnisse wichtige Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit von handgeführten 3D-Scannern in der Praxis. Sie bilden somit die Grundlage für weitere Forschungen sowie eine gründliche Untersuchung der Bewertung und Auswahl solcher Systeme in einem anwendungsorientierten Kontext.

7 Fazit & Ausblick

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit kostengünstiger, tragbarer 3D-Scanner präsentiert. Fünf dieser Scanner wurden hinsichtlich ihrer geometrischen Genauigkeit getestet und die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Datenerfassung, Datenverarbeitung, der geometrischen Ergebnisse sowie des Preises für das Gesamtsystem bewertet. Die Analyse umfasste drei kostengünstige Systeme – den Revopoint Pop 3 Plus, den Revopoint MetroX und den 3DMakerPro Moose – sowie zwei professionelle, hochpreisige Systeme: den Hexagon MARVELSCAN und den Hexagon Absolute Arm 7-Axis in Kombination mit dem Absolute Scanner 1.

Zur Bewertung der erfassten Daten wurden Referenzobjekte verwendet, die mit dem ZEISS Atos 5 erzeugt wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die Leistung von tragbaren 3D-Scannern sehr unterschiedlich sein kann und die Wahl des Systems stark von der Anwendung sowie der Erfahrung des Bedieners abhängt. High-End-Scanner lieferten durchweg hochpräzise und detaillierte Ergebnisse, während kostengünstige Geräte gemischte Ergebnisse erzielten. Die höherpreisigen Systeme von Hexagon zeichnen sich durch hohe Maßgenauigkeit und Präzision aus. Insbesondere sind sie robust in Bezug auf unterschiedliche Materialeigenschaften und ermöglichen die Erstellung widerstandsfähiger Modelle, unabhängig von der Beschaffenheit des zu scannenden Objekts. Umfassende Genauigkeitstests ergaben ein heterogenes Ergebnis hinsichtlich des Genauigkeitspotenzials kostengünstiger Handscanner. Im direkten Vergleich erwies sich der Moose-Scanner von 3DMakerPro als das genaueste kostengünstige System.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten hochpreisigen und kostengünstigen mobilen 3D-Scannern. Insgesamt lassen sich die hochpreisigen Systeme als geometrisch präziser, robuster und zeiteffizienter einstufen. Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit bedeutet der hohe Anschaffungspreis jedoch, dass die für die jeweilige Anwendung entscheidenden Aspekte anders gewichtet werden müssen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die untersuchten kostengünstigen Scanner in einigen Bereichen eine hohe Genauigkeit erreichten und unter bestimmten Bedingungen fast das Niveau der hochpreisigen Systeme erreichten. Die Analyse ergab jedoch auch Einschränkungen hinsichtlich der Effizienz, Robustheit und Rückverfolgbarkeit der Systeme. Aus diesem Grund werden diese Systeme vor allem für den semiprofessionellen Einsatz empfohlen, bei dem der Fokus auf Design-, Konzept- oder Dokumentationsanforderungen

liegt. Mögliche Anwendungsbereiche sind die digitale Erfassung in Designprozessen, die Visualisierung von Prototypen, der 3D-Druck nicht kritischer Bauteile und die archäologische Dokumentation mit moderaten Toleranzanforderungen.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten eine größere Auswahl an Geräten umfassen, standardisierte Testverfahren festlegen und die langfristige Stabilität untersuchen. Letztendlich könnten Leistungsverbesserungen bei erschwinglichen Scannern den Abstand zu High-End-Systemen für bestimmte Anwendungen verringern.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei Ingo Jahn und Claudia Rajczak von der GDV Systems + Solutions GmbH in Bad Schwartau, die die Referenzobjekte mit einem Zeiss ATOS 5 Streifenprojektionssystem gescannt haben. Unser herzlicher Dank gilt auch der Hexagon Manufacturing Intelligence Germany GmbH, insbesondere Herrn Mats Witte, für die Bereitstellung der Scansysteme und die fachkundige technische Unterstützung bei der Erfassung der Testobjekte.

Literaturverzeichnis

- 3Dmakerpro (2025). Moose 3D scanner. <https://eu.store.3dmakerpro.com/products/moose>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.
- Andrews, E. T., Ashton, J. J., Pearson, F., Beattie, R. M., & Johnson, M. J. (2019). Handheld 3D scanning as a minimally invasive measuring technique for neonatal anthropometry. *Clinical nutrition ESPEN*, 33, 279-282, <https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2019.06.012>.
- Allegra, D., Gallo, G., Inzerillo, L., Lombardo, M., Milotta, F. L., Santagati, C. & Stanco, F. (2017). Hand held 3D scanning for cultural heritage: experimenting low cost structure sensor scan. *Handbook of research on emerging technologies for architectural and archaeological heritage*, IGI Global Scientific Publishing, 1, 475-499, <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0675-1.ch016>.
- Ameen, W., Al-Ahmari, A. M. & Mian, S. H. (2018). Evaluation of handheld scanners for automotive applications. *Applied Sciences*, 8(2), 217. <https://doi.org/10.3390/app8020217>.
- Hexagon Manufacturing Intelligence (2025a) MARVELSCAN. <https://hexagon.com/products/marvelscan>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.
- Hexagon Manufacturing Intelligence (2025b). Absolute Arm 7-Axis. <https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.

- Kersten, T. P., Omelanowsky, D. & Lindstaedt, M. (2016a). Investigations of Low-Cost Systems for 3D Reconstruction of Small Objects. Lecture Notes in Computer Science, 10058, Springer, Cham, 521-532. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48496-9_41.
- Kersten, T. P., Przybilla, H.-J. & Lindstaedt, M. (2016b). Investigations of the Geometrical Accuracy of Handheld 3D Scanning Systems. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, 5-6, 271-283. https://www.dgpf.de/pfg/2016/pfg2016_56_kersten.pdf.
- Kersten, T. P., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F. & Misgaiski-Hass, M. (2016c). Comparative geometrical investigations of hand-held scanning systems. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 41, 507-514. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-507-2016>.
- Kersten, T. P., Lindstaedt, M. & Starosta, D. (2018). Comparative geometrical accuracy investigations of handheld 3D scanning systems—an update. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 42, 487-494. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-487-2018>.
- Kersten, T. P., Sönksen, L. & Przybilla, H.-J. (2024). Geometric Accuracy Investigations of Mobile Phone Devices in the Laboratory Using High-Precision Reference Bodies. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., 48, 211-218. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-211-2024>.
- Lachat, E., Landes, T. & Grussenmeyer, P. (2017). Performance investigation of a handheld 3D scanner to define good practices for small artefact 3D modeling. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W5, 427-434, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-427-2017>.
- Reulke, R. & Misgaiski, M. (2012). Test body “Testy” for Laser Scanning and Optical Systems. PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 2012(6), zum Titelbild.
- Revopoint (2025a). POP 3 Plus 3D Scanner - Every Detail Optimized. <https://www.revopoint3d.com/pages/portable-3d-scanner-pop3plus>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.
- Revopoint, (2025b). Revopoint MetroX Laser Scanner: Blue Laser Line & Full-field Structured Light 3D Scanner. <https://www.revopoint3d.com/products/3d-laser-scanner-metrox>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.
- Rudolf, A., Bogović, S., Rogina Car, B., Cupar, A., Stjepanović, Z. & Jevšnik, S. (2017). Textile forms’ computer simulation techniques. Computer Simulation, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/67738>.
- Seo, D., Ito, R., Ishikawa, K., Miura, T., Yamamoto, Y., Onodera, Y., Nishioka, S., Ito, Y. M., Fuyama, K. & Maeda, T. (2025). 3D scanner’s potential as a novel tool for lymphedema measurement in mouse hindlimb models. Scientific Reports, 15, 3747. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85637-4>.
- Skrzypiec, D., Czerwinska, A., Sierant, R., Król, A., Skura, D., Kurzynowski, T. & Swieszkowski, P. (2024). Accuracy, repeatability and reproducibility of a structured light handheld 3D scanner in the field of prosthetics. Sensors, 24(5), 2350. <https://doi.org/10.3390/s24072350>.
- VDI/VDE 2634(2012). Optical 3D-measuring systems - Optical systems based on area scanning. VDI/VDE 2634 Part 2:2012-08.
- Wu, M., Zhang, X., Zhang, R., Zhang, L. & Sun, Y. (2024). Blood orange clamping damage mechanism based on finite element method. Journal of Food Measurement and Characterization, 18(5), 3531-3543. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02981-1>.
- Xia, S., Guo, S., Li, J. & Istook, C. (2019) Comparison of different body measurement techniques: 3D stationary scanner, 3D handheld scanner, and tape measurement. The Journal of the Textile Institute, 110(8), 1103-1113, <https://doi.org/10.1080/00405000.2018.1541437>.
- ZEISS Industrial Quality Solutions (2023) Optical 3D Scanning. ATOS 5 - Versatile scanner for industrial demands. <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning/atos/atos-5.html>, letzter Zugriff 17. Januar 2026.

Die Digitale Dokumentation von S.M. U-16. Ein Modellfall für digitalgestütztes Forschen, Sammeln und Ausstellen maritimer Großobjekte

Amandine Colson¹, Frederic Theis¹, Dennis Hoffmann¹, Luca Junge¹, Antje Schmidt¹ & Sebastian Vehlken¹

Zusammenfassung

Die Bergung Seiner Majestät Unterseeboot U-16 aus dem Ersten Weltkrieg vor Cuxhaven sorgte im Herbst 2025 bundesweit für Aufmerksamkeit. Insbesondere aus archäologisch-wissenschaftlichen Kreisen wurde deutliche Kritik am Ablauf der Bergung geäußert. Das Deutsche Schiffahrtsmuseum (DSM) verfolgte diese Debatte aufmerksam. Nachdem das Wrack in Cuxhaven der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht worden war, erstellte das Digitalisierungsteam des DSM ein präzises digitales 3D-Modell des gesamten U-Bootes sowie mehrerer geborgener Einzelfunde. Zum Einsatz kamen terrestrische Laserscans und fotografische Luftaufnahmen. Die Arbeiten erfolgten im Rahmen einer Kooperation mit verschiedenen Akteuren aus Schiffahrtsbehörden und dem Denkmalschutz. Der Beitrag konzentriert sich auf die durchgeführte 3D-Erfassung und beleuchtet die Bedeutung digitaler Archivierungsstrategien für großformatige Objekte in Schiffahrtsmuseen.

Schlagwörter U-Boot · Nautische Archäologie · 3D Dokumentation · Kulturerbe · Digitaler Zwilling · Schiffahrtsmuseen

1 Ein außergewöhnlicher archäologischer Fund

1.1 Geschichte von S.M. U-16 und dessen wissenschaftliche Relevanz

Die Geschichte der Unterseeboote in Deutschland begann mit Wilhelm Bauer im Jahr 1850 (Rössler 1996, S. 16). Erst am 4. August 1906 wurde jedoch mit U 1, das heute im Deutschen Museum in München ausgestellt ist, das erste militärische Tauchboot der Kaiserlichen Marine in der Oberelbe zu Wasser gelassen (Rössler, 1996, S. 33). Die U-Boot-Waffe spielte im Ersten Weltkrieg eine strategisch bedeutende Rolle. Insgesamt stellte die Kaiserliche Marine 374 Boote in Dienst. Deutsche U-Boote beschädigten oder versenkten mehr als 6 000 Handelsschiffe sowie über 100 Kriegsschiffe (Herzog, 1990, S. 15).

Das ursprünglich etwa 58 m lange und maximal 6 m breite eiserne Zweihüllen-U-Boot Seiner Majestät Unterseeboot 16 wurde 1911 von der Germaniawerft in Kiel für die Kaiserliche Marine des Deutschen Reiches in Dienst gestellt (Herzog, 1990, S. 43). Während des Ersten Weltkriegs war es nur 1915 an Kriegshandlungen beteiligt und diente später als Ausbildungsboot in Kiel. Am 8. Februar 1919 sank das Boot nach Kriegsende während

seiner Überführungsfahrt nach Harwich (England) nördlich der zur Freien und Hansestadt Hamburg gehörenden Nordseeinsel Scharhörn in der Außenelbe. Da das zu Kriegsende nicht mehr fahrtüchtige Boot ohne Mannschaft von einem Schlepper gezogen wurde, kam bei seinem Untergang niemand zu Schaden



Abbildung 1 Mittel und Hecksektion S.M. U-16, Cuxhaven (Foto: Frederic Theis/DSM)

Am 1. und 3. September 2025 wurde das Wrack gehoben, da es drohte, sich in die Fahrrinne der Außenelbe zu abzurutschen und die Schifffahrt zu gefährden (Duden, 2025). Während der Bergung zerbrach das bis dahin im Gesamtverbund erhaltene U-Boot in zwei große Fragmente. Die Bruchstelle verlief unmittelbar vor dem Turm und trennte die Mittel- und Hecksektion von der Bugsektion. In

¹ Deutsches Schiffahrtsmuseum (DSM) – Leibniz Institut für Maritime Geschichte, Hans-Scharoun-Platz 1; 27568 Bremerhaven. E-Mail: a.colson@dsm.museum

der Folge begann für die zuständigen Denkmalschutzbehörden in Hamburg und Niedersachsen ein umfangreicher Abstimmungsprozess zur Klärung des Denkmalstatus sowie die Planung des weiteren Umgangs mit dem Fund (Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, 2025). Der Umstand, dass das U-Boot nicht unversehrt erhalten bleiben würde – ein entscheidender Anlass für die digitale 3D-Erfassung des Objekts in seinem damaligen Zustand in Cuxhaven (Abb. 1).

Obwohl zahlreiche zeitgenössische Quellen über deutsche U-Boote dieser Epoche berichten, sind die zugehörigen Archive weitgehend verloren gegangen. Originale Konstruktionspläne haben sich kaum erhalten. Im Zuge des Versailler Vertrags war es Deutschland darüber hinaus nach dem Krieg strikt untersagt, entsprechende Waffen zu bauen, wodurch ein Großteil des spezifischen Fachwissens verloren ging (Rössler, 1996, S. 130–131).

1.2 Ziel der 3D-Erfassung

Ziel der 3D-Erfassung war es, möglichst viele Elemente des U-Bootes digital zu dokumentieren: sowohl die beiden großen erhaltenen Rumpfabschnitte als auch die zahlreichen Einzelteile, die im Zuge der Notbergung geborgen worden waren. Diese digitale Datengrundlage ermöglicht Expertinnen und Experten aus Geschichtswissenschaft und Archäologie eine fundierte Interpretation und Analyse.

Bis zum Jahr 2025 war lediglich die U 1 eingehend wissenschaftlich untersucht worden, da alle anderen Tauchboote dieser Epoche entweder nicht mehr existieren oder weiterhin auf dem Meeresboden liegen. Jedes Detail, das im Rahmen der Bergung und Dokumentation festgehalten werden konnte, stellte daher eine wertvolle Information dar, die bislang wissenschaftlich nicht zugänglich war.

Der Bereich „Digitalität und Materialität“ des Deutschen Schiffahrtsmuseums – Leibniz-Institut für Maritime Geschichte verfügt über langjährige Erfahrung in der Digitalisierung maritimen Kulturerbes. Begünstigt durch die geografische Nähe zwischen dem Museumsstandort Bremerhaven und dem Bearbeitungsort Cuxhaven sowie durch die komplexe denkmalrechtliche Situation, bot sich die Möglichkeit, ein großformatiges maritimes Objekt unter außergewöhnlichen Rahmenbedingungen wissenschaftlich zu dokumentieren. Als Kompetenzzentrum für die Digitalisierung maritimen Kulturerbes bietet das Museum eine Plattform für den interdisziplinären Austausch zwischen Fachwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern.

Die besonderen Bedingungen der Bergung und des Bearbeitungsortes erforderten eine flexible und, zugleich

präzise Methodik der digitalen Dokumentation. Die eingesetzten Verfahren zur 3D-Erfassung wurden gezielt auf die Dimensionen, den Erhaltungszustand und die Materialität der Objektfragmente abgestimmt. Im folgenden Abschnitt werden die verwendeten Erfassungsmethoden und Arbeitsabläufe näher erläutert. Darüber hinaus mussten die Arbeitsabläufe unter den besonderen Bedingungen eines Pontons mit parallel eingesetzten Großmaschinen geplant und durchgeführt werden, wobei Sicherheitsmaßnahmen sowie die Koordination zwischen wissenschaftlichen und technischen Beteiligten eine zentrale Rolle spielten.

2 3D-Erfassung

2.1 Aufnahmen in Cuxhaven

Die Vorbereitung und Planung der 3D-Erfassung erfolgte in Anlehnung an aktuelle fachwissenschaftliche Empfehlungen und Standards (EUreka3D, 2024). Berücksichtigt wurden dabei sowohl die Auswahl und der Einsatz der erforderlichen technischen Ausrüstung als auch die strukturierte Datenerhebung, die Erfassung von Meta- und Paradata sowie die langfristige Archivierung der digitalen Ergebnisse. Sämtliche erzeugten 3D-Daten, darunter Punktwolken und abgeleitete 3D-Modelle, wurden archiviert und dokumentiert.

Die äußerliche 3D-Erfassung der Bug- und Hecksektionen sowie aller weiteren abgelösten Bauteile erfolgte am 9. und 10. September 2025. Am 10. Oktober 2025 wurden ergänzend die Innenbereiche dokumentiert, nachdem der Turm segmentiert worden war und entsprechende Einblicke ermöglicht wurden (Abb. 2).

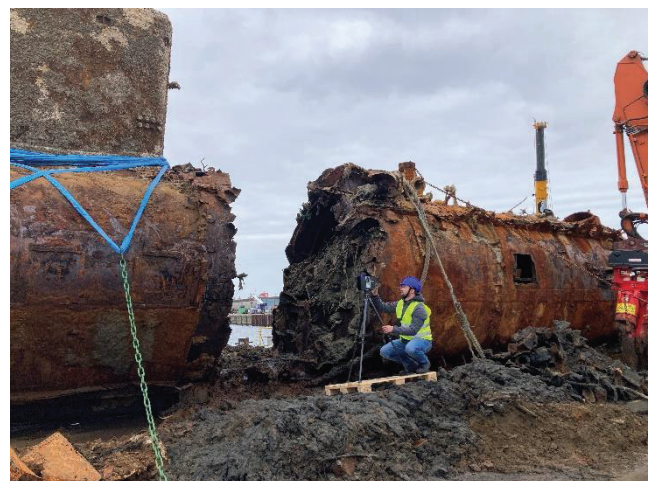


Abbildung 2: Dennis Hoffmann am Wrack von S.M. U-16 nach der Segmentierung (Foto: Amandine Colson /DSM)

Für die Datenerhebung kamen zwei Laserscanner sowie eine Drohne zum Einsatz: FARO Focus Premium, FARO Freestyle 2 und eine DJI Mini 4 Pro. Der FARO Focus Premium wurde mit folgenden Einstellungen betrieben: Auflösung $\frac{1}{4}$, Qualität $4\times$, Belichtungsmessung horizontal gewichtet. Für die Erfassung der Hecksektion waren etwa 20 Scannerpositionen notwendig, wobei ein einzelner Scan jeweils rund acht Minuten in Anspruch nahm. Für weitere großformatige Bauteile wurden durchschnittlich etwa zehn Scans mit vergleichbarer Scan-Dauer durchgeführt.

2.2 Registrierung und Datenbearbeitung

Die erhobenen Daten wurden zunächst auf einem gesicherten Netzwerkeserver gespeichert. Die Verarbeitung sämtlicher terrestrischer Laserscandaten erfolgte mit der Software FARO SCENE. Die Registrierung der Einzelscans konnte dank des Einsatzes weißer Referenz-Markerkugeln weitgehend automatisiert durchgeführt werden und erforderte nur einen geringen manuellen Nachbearbeitungsaufwand.

Ab diesem Verarbeitungsschritt wurde die weitere Bearbeitung nicht mehr mit FARO SCENE durchgeführt, da die Software keine integrierte Verarbeitung und Kombination von terrestrischen Laserscandaten und photogrammetrischen Bilddatensätzen ermöglicht. Für die anschließende Zusammenführung und Auswertung der unterschiedlichen Datentypen wurde daher auf RealityScan 2.0 (ehemals RealityCapture) zurückgegriffen, eine von Epic Games bereitgestellte Softwarelösung zur 3D-Rekonstruktion, die sowohl den Import als auch die gemeinsame Verarbeitung von Laserscan-Punktwolken und photogrammetrischen Aufnahmen unterstützt.

Die bereits registrierten Laserscans wurden von RealityScan importiert und anschließend gemeinsam mit den aus den Drohnenaufnahmen extrahierten Fotografien verarbeitet. Auf dieser Grundlage wurde das Alignment zwischen photogrammetrischen Bilddaten und Laserscandaten durchgeführt.

Für die mit dem Handscanner aufgenommenen Bereiche wurden photogrammetrische Datensätze und Laserscandaten ebenfalls innerhalb von RealityScan zusammengeführt. In diesem Arbeitsschritt traten jedoch vereinzelt Unregelmäßigkeiten im resultierenden Polygonnetz auf, darunter Öffnungen im Mesh sowie fehlerhaft zusammengeführte Teilbereiche. Die Ursachen

hierfür liegen vermutlich in den unterschiedlichen Detaillierungsgraden und Punktdichten der kombinierten Datensätze.

Der Datensatz der Bugsektion umfasste 1.794 Fotografien, 32 Einzelscans (11 mit den FARO Focus und 21 mit FARO Freestyle) (Abb. 3). Dazu kommen zehn terrestrische und ein handgeführter Scan sowie 2.054 Fotos von den zerlegten Einzelteilen auf dem Schrottplatz.

Für die Hecksektion waren es 1.898 Fotografien, 26 Einzelscans (14 mit den FARO Focus und 12 mit FARO Freestyle) (Abb.4). Dazu kommen elf terrestrische und vier handgeführte Scans sowie 1.018 Fotos vom segmentierten Heckteil auf dem Schrottplatz.

3 Ergebnisse

Die im Rahmen des Projekts erzeugten digitalen Datensätze eröffnen vielfältige Nutzungsmöglichkeiten sowohl für die wissenschaftliche Forschung, als auch für die Vermittlung maritimen Kulturerbes. Die detaillierten 3D-Modelle erlauben eine Analyse von Konstruktionsmerkmalen, Erhaltungszuständen und Strukturzusammenhängen S.M. U-16, die bislang mangels vergleichbarer Befunde nicht möglich war. Zugleich stellen sie eine nachhaltige Form der Dokumentation für ein Objekt dar, das zeitlich begrenzt zugänglich war und in seiner ursprünglichen Form nicht dauerhaft bewahrt werden kann.



Abbildung 3 Screenshot 3D-Modell Bugsektion S.M. U-16 (Bild: Hoffmann/Junge)

Darüber hinaus verdeutlicht das Projekt das Potenzial neuer dreidimensionaler Darstellungsformen für großformatige maritime Objekte - insbesondere dann, wenn diese nicht mehr im Original erhalten sind oder konservatorischen Einschränkungen unterliegen. Neben klassischen polygonbasierten 3D-Modellen kommen zunehmend neuartige Verfahren zum Einsatz, etwa Darstellungen auf Basis halbtransparenter, eingefärbter Punkte bzw. Kreise, sogenannter Gaussian Splats (3DGS).

Durch die Überlagerung hunderttausender solcher Elemente lassen sich visuell sehr realitätsnahe Szenen erzeugen. Diese Technik eignet sich derzeit vor allem für statische Visualisierungen, während dynamische und animierte Anwendungen noch Gegenstand aktueller Entwicklungen sind.

Ein wesentlicher Vorteil 3DGS-basierter Visualisierungen liegt in ihrer besseren Performance auf mobilen Endgeräten, insbesondere im Vergleich zu polygonalen 3D-Modellen vergleichbarer Detailtiefe. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten für die niedrigschwellige Präsentation komplexer Objekte außerhalb klassischer Ausstellungs-kontexte.

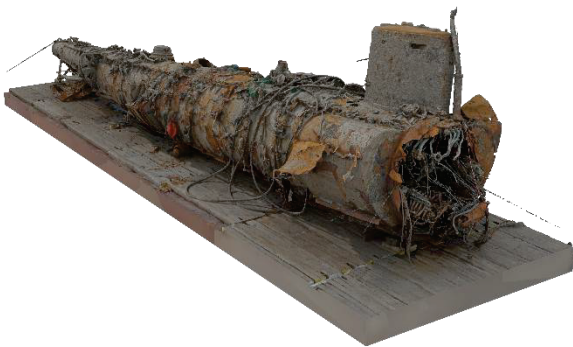


Abbildung 4 Screenshot 3D-Modell Mittel- und Hecksektion S.M. U-16 (Bild: Hoffmann/Junge)

Ergänzend zu den statischen 3D-Modellen wurden aus den digitalen Datensätzen auch videobasierte Visualisierungen erzeugt. Für die Bugsektion entstanden dabei zwölf Videos mit einer Gesamtdatenmenge von 9,71 GB und einer Laufzeit von insgesamt etwa zehn Minuten. Für die Hecksektion wurden 19 Videos mit einem Gesamtvolumen von 18,6 GB und einer Gesamtlaufzeit von rund 18 Minuten generiert. Diese Bewegtbildformate eignen sich insbesondere für die Vermittlung räumlicher Zusammenhänge sowie für den Einsatz in Ausstellungs- und Online-Kontexten.

Perspektivisch wird zudem an der Integration der Datensätze in eine Virtual-Reality-Anwendung gearbeitet. VR-Umgebungen ermöglichen es, Größenverhältnisse, räumliche Zusammenhänge und konstruktive Details anschaulich zu vermitteln. Durch den Einsatz aktueller Stand-alone-Systeme, etwa der Meta Quest 3, lassen sich detaillierte Objektansichten sowie Interaktionen mit einzelnen Bauteilen realisieren, ohne auf aufwendige externe Hardware angewiesen zu sein.

4 Diskussion

Die 3D-Erfassung des Wracks erlaubt eine Reihe technischer Einzelbeobachtungen. Erkennbar ist insbesondere der bei der Bergung weitgehend erhaltene spindelförmige Druckkörper als innere Hülle des Boots, während die äußere, hydrodynamisch geformte Hülle nur im Bereich des Turms überdauert hatte und dort einen Eindruck vom ursprünglichen Querschnitt vermittelte. Zudem lassen die Scans Elemente der in der Außenhülle verbauten Tauchtechnik wie Tauchzellen, Druckluftbehälter und Treibstofftanks erkennen. Details wie die ebenfalls sichtbaren Druckmessgeräte (Manometer) verraten sowohl die komplexe Steuerung dieser Tauchtechnik als auch die hohe Auflösung der eingesetzten Vermessungstechnik. Darüber hinaus dokumentieren die 3D-Scans zahlreiche weitere Bauteile, darunter das Periskop mit Sehrohrgriff unmittelbar vor dem Turm, das Steuerrad in der nach dem Zerschlagen offenliegenden Zentrale, die erhaltene Backbordschraube mit drei Flügeln, Batteriezellen für die beiden Elektromotoren sowie das Steuerruder und die vorderen wie hinteren Tiefenruder, die für die vertikale Steuerung unter Wasser genutzt wurden. Überreste der Abgasanlage auf dem Oberdeck hinter dem Turm belegen den hybriden Antrieb mittels jeweils zweier Petroleum- und Elektromotoren für Über- und Unterwasserfahrt. Sichtbar sind zudem die vorderen und achteren Decksluken sowie Luken zum Laden von Torpedos, die Mündungen der Torpedoröhre – letztere achtern mit geschlossenen Klappen – sowie die vordere Ankerkette (Theis et al., 2026).

Dieses Projekt diente auch als Fallstudie, um unsere Überlegungen zum Thema „Heritage Digital Twin“ (vgl. z.B. (Niccolucci et al., 2023) und deren zukünftig verstärkte Umsetzbarkeit. Das Konzept des digitalen Zwillings hat in der Fachwelt höchste Relevanz und seine Anwendbarkeit für den musealen Kontext großes Potenzial, wobei aber die entsprechenden Standards noch ausgehandelt und etabliert werden müssen (Kantaros et al., 2026). Wir müssen kritisch prüfen, inwiefern solche digitalen Inhalte zur Erhaltung des kulturellen Erbes beitragen und welche Kriterien dafür erfüllt sein müssen.

5 Fazit & Ausblick

Die kurzfristige Verfügbarkeit und der schnelle Einsatz der 3D-Expertise des Deutschen Schifffahrtsmuseums (DSM) erwiesen sich als entscheidender Faktor für die erfolgreiche digitale Dokumentation S.M. U-16. Insbesondere unter den zeitlichen, logistischen und sicherheitsrelevanten Rahmenbedingungen der Bergung konnte so eine

nachhaltige digitale Sicherung des Objektes gewährleistet werden.

Die entstandene digitale Dokumentation bildet eine belastbare Grundlage für weiterführende wissenschaftliche Analysen sowie für zukünftige Kooperationen. Zugleich unterstreicht das Projekt die Rolle des DSM als wichtigen Akteur auf regionaler wie überregionaler Ebene im Bereich der Digitalisierung und Erforschung maritimen Kulturerbes.

Für das beteiligte Team stellte das Projekt ein in vielerlei Hinsicht einzigartiges Lernfeld dar. Die Arbeiten machten deutlich, welche praktischen und organisatorischen Herausforderungen bei kurzfristigen Dokumentationsmaßnahmen auftreten können. Hierzu zählen insbesondere Fragen der Zuständigkeiten, notwendige Genehmigungsverfahren sowie die Abstimmung zwischen wissenschaftlichen, technischen und behördlichen Akteuren. Diese Erfahrungen liefern wertvolle Erkenntnisse für künftige Einsätze unter vergleichbaren Rahmenbedingungen.

Auch auf technischer Ebene wurden zentrale Herausforderungen sichtbar. Die Kombination von Datensätzen aus Handscanner-Erfassungen und photogrammetrischen Verfahren führte in Teilen zu Inkompatibilitäten.

Um die im Zuge der Bergung und Dokumentation erhobenen Daten aller beteiligten Akteurinnen und Akteure zusammenzuführen, ist für das Jahr 2026 ein Workshop geplant. Insbesondere die durch das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege sowie durch Mitarbeitende verschiedener Unternehmen und Behörden während der Bergungsmaßnahmen erhobenen Bild- und Videodaten sollen dabei integriert werden. Ziel ist es, diese bislang dezentral vorliegenden Informationen zu bündeln und in einer umfassenden Gesamtdokumentation S.M. U-16 zusammenzuführen.

Die langfristige Archivierung und Zugänglichkeit der zusammengeführten digitalen Daten soll dabei sowohl am Deutschen Schifffahrtsmuseum als auch beim Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege erfolgen und damit eine nachhaltige Nutzung für Forschung, Denkmalpflege und Wissensvermittlung gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- Duden, S. (Regisseur). (2025, November 10). Geborgenes U-Boot: Teile von U16 kommen in Museen [Sendung]. In: NDR Nachrichten.
<https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/oldenburg-ostfriesland/geborgenes-u-boot-teile-von-u16-kommen-in-museen-scharhoern,u16-100.html>
- EUreka3D. (2024). 3D Digitisation Guidelines: Steps to Success—A guide based on the EU VIGIE2020/654 Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage.
<https://eureka3d.eu/wp-content/uploads/2024/06/3D-digitisation-guidelines-EUreka3D.pdf>
- Herzog, B. (1990). Deutsche U-Boote 1906-1966. Manfred Pawlak Verlagsgesellschaft.
- Kantaros, A., Ganetsos, T., Nakou, S., & Laskaris, N. (2026). Heritage 4.0: How Applied 3D Technologies and Digital Twins Are Redefining Cultural Preservation Beyond Replication. *Heritage*, 9(3), 123.
<https://doi.org/10.3390/heritage9030123>
- Niccolucci, F., Markhoff, B., Theodoridou, M., Felicetti, A., & Hermon, S. (2023). The Heritage Digital Twin: A bicycle made for two. The integration of digital methodologies into cultural heritage research. *Open Res Europe*, 64(3).
<https://doi.org/10.12688/openreseurope.15496.1>
- Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege. (2025). Kaiserliches U-Boot U-16: Neue Heimat für geborgene Wrackteile [Pressemitteilung]
<https://denkmalpflege.niedersachsen.de/aktuelles/nachrichten/kaiserliches-u-boot-u-16-neue-heimat-fur-geborgene-wrackteile-246317.html>
- Rössler, E. (1996). Geschichte des deutschen U-Bootbaus - Band 1. Bernhard & Graefe Verlag.
- Theis, F., Colson, A., Hoffmann, D., Junge, L., Schmidt, A., & Vehlken, S. (2026). U-16 Digital - Die 3D Modellierung eines U-Bootes der Kaiserlichen Marine. *Deutsches Schifffahrtsarchiv*, 1, 13–18.

Meydenbauers Messbilder und Punktwolken – ein nützliches Duo für die bauhistorische Forschung

Jost-Michael Broser¹

Zusammenfassung

Die Original-Glasplatten der Preußischen Messbild-Anstalt Berlin unter der Leitung von Albrecht Meydenbauer sind heute größtenteils noch vorhanden, doch der Verlust der zugehörigen schriftlichen Aufzeichnungen steht einer maßgenauen zeichnerischen Rekonstruktion der aufgenommenen Bauwerke in der Regel entgegen. Hier wird gezeigt, unter welchen Bedingungen dies dennoch gelingen kann. Als Beispiel dient die romanische Kirche St. Pantaleon in Köln. Das im Barock überformte Äußere bekam durch weitgehende Baumaßnahmen 1890-92, ganz im Sinne des Zeitgeistes, wieder das romanische Erscheinungsbild. Vor diesen Baumaßnahmen dokumentierte die Messbildstelle 1889 den Baubestand von außen mit 19 Messbildern, von denen 16 heute noch vorhanden sind. Als Fortführung des Vortrags von 2022 wird die Vorgehensweise von der Bildorientierung bis zur nahezu vollständigen zeichnerischen Rekonstruktion im Sinne Meydenbauers erläutert, wobei eine 2018 erfolgte Dokumentation der Kirche mit Laserscanning und SfM die Grundlage bildet.

Schlagwörter Photogrammetrie · Meydenbauer · Messbildstelle

1 Einführung

Etwa 20.500 Messbild-Negative auf Glasplatten unterschiedlicher Formate befinden sich heute im Messbildarchiv des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und des Archäologischen Landesmuseums. Die zugehörigen schriftlichen Aufzeichnungen zu jedem Messbild über die eingesetzte Kamera, die genaue Brennweite des Objektivs, eine eventuell vorhandene Objektivverschiebung und die geodätisch eingemessene Lage des Kamerastandpunktes sind dagegen in den Wirren des 2. Weltkriegs verloren gegangen. Der Begründer dieses Messbildverfahrens, Albrecht Meydenbauer, sah die Kenntnis dieser Informationen als zwingend notwendig an für eine maßgenaue zeichnerische Auswertung (Meydenbauer 1912: S. 119-145).

Am Beispiel von St. Pantaleon in Köln wird gezeigt, dass sich unter bestimmten Voraussetzungen trotz dieser fehlenden Kenntnisse aus den Messbildern maßgenaue Zeichnungen erstellen lassen. In den 1890iger Jahren erfuhr die Kirche einen umfassenden Umbau besonders am Westwerk. Die vorliegenden Messbilder sind unmittelbar davor entstanden und zeigen somit eine frühere Bauphase,

welche aber in den östlichen Bereichen mit dem heutigen Baubestand weitgehend übereinstimmt.

2 Methoden

Als Grundlage für eine geplante Sanierung erfolgte 2018 eine nahezu vollständige Vermessung der Kirche mit 3D-Laserscanning. Für die Vermessung der Außenhülle, welche aufgrund der Gebäudehöhe in den oberen Bereichen mit dem Laserscanner nicht genau genug erfasst werden konnte, erfolgte zusätzlich eine Drohnenbefliegung für eine photogrammetrische Auswertung. Das somit vorliegende präzise virtuelle Abbild der vermessenen Bereiche im Maßstab 1 zu 1 bildet die vermessungstechnische Voraussetzung, welche eine Auswertung der historischen Messbilder ermöglichen kann.

2.1 Beschreibung des Messbildverfahrens

In seiner letzten wissenschaftlichen Veröffentlichung „Handbuch der Messbildkunst“ zeigt Meydenbauer ausführlich die Funktionsweise des Messbild-Verfahrens. Nach einer Einleitung und der Darstellung der geschichtlichen Entwicklung folgt das Kapitel „Geometrische Grundlagen“ (Meydenbauer 1912, S. 25-43).

¹ Technische Hochschule Köln, Fakultät für Architektur, Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln, E-Mail: jost.broser@th-koeln.de.de

Ein einfaches Prinzip der ebenen Geometrie bildet die Basis des gesamten Verfahrens, nämlich die Dreiecksmessung. Von einer Linie zwischen zwei in der Lage bekannten Punkten A und B, womit auch deren Abstand bekannt ist, kann theoretisch jeder Punkt C in der Ebene bestimmt werden, sofern er nicht auf der durch die beiden bekannten Punkte verlaufenden Geraden liegt. Hierzu muss der Winkel in Punkt A zwischen der Strecke AB und der Linie AC sowie der Winkel in Punkt B zwischen der Strecke AB und der Linie BC gemessen werden. Im Schnittpunkt der beiden Linien liegt dann der Punkt C (Abbildung 1). In der Praxis darf der Winkel in Punkt C zwischen diesen beiden Linien nicht zu klein sein, da sonst sogenannte schleifende Schnitte entstehen, unter denen die Genauigkeit leidet. Der vermessungstechnische Begriff hierfür ist das Vorwärts-Einschneiden. Dasselbe Prinzip wird zu Meydenbauers Zeiten bei dem in der Landvermessung weit verbreiteten Messtisch-Verfahren eingesetzt. Stehen nun auf den Punkten A und B Messbild-Kameras, welche auf ein architektonisches Objekt, oder auch eine Landschaft, ausgerichtet sind, kann die Lage jedes Punktes in der Ebene, der auf beiden Aufnahmen sichtbar ist, im Nachhinein zeichnerisch ermittelt werden, ohne die Notwendigkeit weiterer Winkelmessungen. Meydenbauer beschreibt schon in diesem Kapitel die technischen Voraussetzungen, welche eine Messbild-Kamera erfüllen muss und auch die Höhenmessung über den Strahlensatz, worauf hier später noch eingegangen wird. Im siebten Kapitel „Auftragen der Zeichnungen“ (Meydenbauer 1912, S. 176-231) erfolgt die Darstellung von zwei Verfahren für die zeichnerische Auswertung von Messbildern. Das „Flüchtige Auftragen aus einem Bilde“ setzt eine Übereck-Aufnahme mit zwei Seiten eines Gebäudes voraus, deren Winkel zueinander im Grundriss bekannt sein muss, ebenso die Lage des Aufnahmestandpunktes sowie eine Referenzstrecke an den aufgenommenen Gebäudeteilen zur Maßstabsbestimmung und senkrechte Gebäudekanten (Meydenbauer 1912, S. 197-212). Zeichnerisch können hier natürlich nur die Gebäudeteile dargestellt werden, die auf der Aufnahme abgebildet sind. Meydenbauer untersucht hier auch die Bedingungen, unter denen sich Nicht-Messbilder, also Aufnahmen mit gebräuchlichen Kameras, für eine zeichnerische Auswertung eignen. Das zweite Verfahren „Genaueres Auftragen aus zwei und mehr Meßbildern“ (Meydenbauer 1912, S. 212-223) ermöglicht die genaue

Darstellung komplexer Gebäudestrukturen und wird hier im Folgenden behandelt. In diesem siebten Kapitel beschreibt er sehr ausführlich die Vorgehensweise beim Zeichnen auf dem Reißbrett. Da hier für diese Untersuchung ein CAD-Programm auf einem Computer benutzt wurde, unterscheidet sich zwar die Vorgehensweise, die Auswerteprozessoren bleiben aber dieselben.

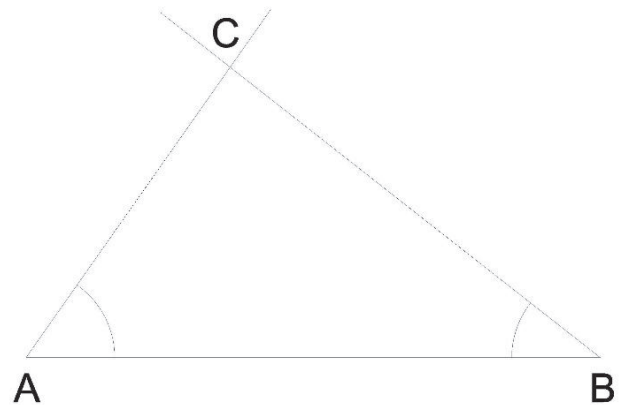


Abbildung 1 Dreiecksmessung

Die Voraussetzung für die zeichnerische Auswertung bilden vermessungstechnische Arbeiten mit Theodolit und Maßband am Aufnahmeobjekt. Dies wird beschrieben im fünften Kapitel „Vorarbeiten am Ort“ (Meydenbauer 1912, S. 119-147). Die genaue Bestimmung der Kamerastandpunkte erfolgte über einen Polygonzug mit sorgfältiger schriftlicher und zeichnerischer Dokumentation. Sollte die Lage von Standpunkten nicht bekannt sein, beschreibt Meydenbauer Möglichkeiten, diese nachträglich zu bestimmen. Hierauf wird später noch genauer eingegangen. Eine weitere Voraussetzung ist die Kenntnis der für jede einzelne Aufnahme benutzten Messbild-Kamera mit der Größe der Aufnahme-Platte, dem Objektiv-Typ, der genauen Objektiv-Brennweite und der eventuellen vertikalen Objektivverschiebung (Meydenbauer bezeichnet dies als „Elevation“, heute sagt man dazu Shiften des Objektivs). Auch dies muss sorgfältig dokumentiert und den Messbildern zugeordnet werden können. Die Messbild-Kameras müssen so aufgestellt werden, dass die Aufnahme-Platte genau senkrecht steht (Meydenbauer 1912, S. 33-35 und 76-118).

2.2 Die Messbild-Kameras

Im vierten Kapitel „Instrumente“ (Meydenbauer 1912: S. 76-118) beschreibt Meydenbauer die zu der Zeit bereits vorhandenen Messbild-Kameras und die Entwicklung seiner eigenen Kamera-Konstruktionen, und geht auch auf das „Aptieren gewöhnlicher Kameras“ ein. Von allen Messbild-Kameras Meydenbauers haben nur zwei die Zeiten überdauert. Sie wurden nach 1886 in die Schweiz geliefert und haben eine Plattengröße von 30x30 cm (Grimm 1978b: S. 33-34), entsprechen also nicht den bei St. Pantaleon eingesetzten Kameras mit einer Plattengröße von 40x40 cm.

Nach Meydenbauers Veröffentlichungen kommen für die Zeit um 1889 drei Kameratypen, im Folgenden Instrumente genannt, in Frage, alle mit der Plattengröße von 40 cm x 40 cm und unterschiedlichen Brennweiten der Objektive:

- Instrument I mit Pantoskop Nr. 5, Brennweite 25 cm, keine Objektivverschiebung (an anderer Stelle wird hierfür eine Brennweite von 24 cm angegeben, Meydenbauer 1912: S. 7)
- Instrument II mit Pantoskop Nr. 6, Brennweite 35 cm, Objektivverschiebung bis 14 cm (16 cm, Meydenbauer 1912: S. 7)
- Instrument III mit Pantoskop Nr. 7, Brennweite 53 cm, Objektivverschiebung bis 22 cm (25 cm, Meydenbauer 1912: S. 7)

Andere Quellen (Götze 2021: S. 12-17; Lautenschläger/Hackemer 2021: S. 22) geben für die Pantoskop-Objektive davon abweichende Brennweiten an:

- Pantoskop Nr. 5 mit 245 mm (nach 1872 – vor 1908)
- Pantoskop Nr. 6 mit 370 mm (nach 1872 – vor 1908)
- Pantoskop Nr. 7 mit 550 mm (Produktblatt von 1911)

Bei Instrument I muss der Bildhorizont immer in der Mitte des Bildes liegen, da es keine Möglichkeit zur Objektivverschiebung gibt. Zur genauen Bestimmung der Lage des Horizonts und der ebenso wichtigen Hauptvertikalen sind in den Kameras an den Rändern der Negativ-Platte sogenannte Auflager angebracht, welche bei der Aufnahme ebenfalls auf der Platte abgebildet werden (Abbildung 2).

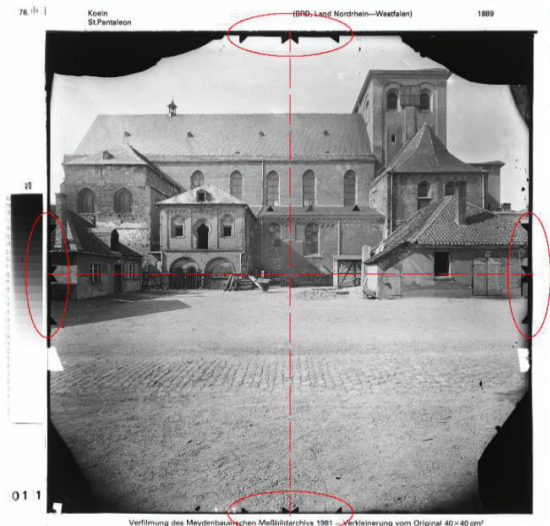


Abbildung 2 Positionierung der AuflagerBei den für diese Untersuchung genutzten sechzehn Messbildern ergab der Vergleich der Auflagerdarstellungen, dass tatsächlich drei unterschiedliche Instrumente benutzt wurden (Abbildung 3).

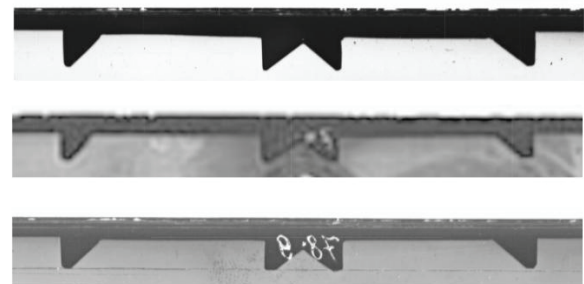


Abbildung 3 Unterschiede bei den Auflagern

Von den sechzehn noch vorhandenen Messbildern lassen sich zehn dem Instrument I zuordnen, wobei der Horizont genau in der Bildmitte liegt, fünf dem Instrument II, bei denen eine „Elevation“ stattfand und eine dem Instrument III, ebenfalls mit einer „Elevation“. Durch diese vertikale Objektivverschiebung wandert der Horizont auf dem Messbild nach unten, wodurch hoch aufragende Gebäudeteile noch auf der Platte abgebildet werden können. Eine Verschiebung des Horizonts nach oben ist ebenfalls möglich, kommt bei Architektur-Aufnahmen aber eher selten vor, z.B. bei einem stark erhöhten Kamera-Standpunkt, um die unteren Bauteile noch abbilden zu können. Die Größe der Objektivverschiebung muss zwar mit einer Genauigkeit von 0,1 mm gemessen werden, an der Messskala für die Verschiebung reicht aber eine Einteilung in halbe Zentimeterschritte, angezeichnet eben mit einer Genauigkeit von 0,1 mm. Die hier benutzten Instrumente

sind zerlegbar, was sich für den Transport als vorteilhaft erwies, dafür müssen sie nach jedem Zusammenbau justiert werden. Bei früheren Instrumenten mit einem starren Kamera-Kasten bestand immer die Gefahr des Verziehens durch Erschütterungen. Der wohl aufwendigste Teil der Justierung besteht in der Bestimmung der genauen Brennweite im Zusammenspiel zwischen Objektiv und Kameragehäuse. Es genügt nicht, mit den vom Werk angegebenen Brennweiten wie 25 und 35 und 53 cm zu arbeiten, sondern die Brennweite muss mit 0,1 mm Genauigkeit bestimmt werden. Dies erfolgte über eine Probeaufnahme, behandelt im dritten Kapitel „Objektive“ unter „5. Brennweite“ (Meydenbauer 1912: S. 69-74).

2.3 Die Brennweiten der Messbild-Kameras (Instrumente)

Die Bedeutung der Brennweite erklärt sich am besten über die Vorgehensweise bei der zeichnerischen Auswertung (Meydenbauer 1912: S. 187-196). Ein Kontaktabzug der Negativ-Glasplatte wird auf dem Zeichenbrett aufgespannt und Horizontale und Hauptvertikale anhand der Auflager-Markierungen eingetragen. Von deren Kreuzungspunkt, dem Hauptbildpunkt, wird die Brennweite f in Zentimetern nach unten abgetragen, also um 90° in die Zeichenebene geklappt und damit die Lage des Instrumenten-Standpunktes bestimmt, welche dem Objektivmittelpunkt O entspricht. Der Horizont stellt dann die Lage der Negativ-Glasplatte dar (Abbildung 4).

Die innere Geometrie der Messbild-Kamera wird also als Grundriss auf die Zeichenfläche gebracht, bloß spiegelverkehrt, weil durch die sich im Punkt O kreuzenden Strahlen auf der Glasplatte ein spiegelverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Bild entsteht (Meydenbauer 1912: S. 26 Fig. 2) und so in der Ebene des Horizonts sich das seitenrichtige Abbild des Bauwerks befindet (Meydenbauer 1912: S. 26 Fig. 2). Nun werden die darzustellenden Punkte im Messbild mit zum Horizont senkrechten Linien auf diesen projiziert. Hierbei kann es sich um Gebäudekanten, Fensterlaibungen, Pfeiler, Dachgauben usw. handeln. Da die Instrumente immer in Senkrechtstellung der Negativplatte aufgestellt werden, lässt sich sofort feststellen, ob z.B. Gebäudekanten auch tatsächlich senkrecht stehen. Die Projektions-Punkte auf dem Horizont werden nun mit dem Instrumenten-Standpunkt verbunden und es entsteht ein fächerförmiges Bild (Abbildung 5).

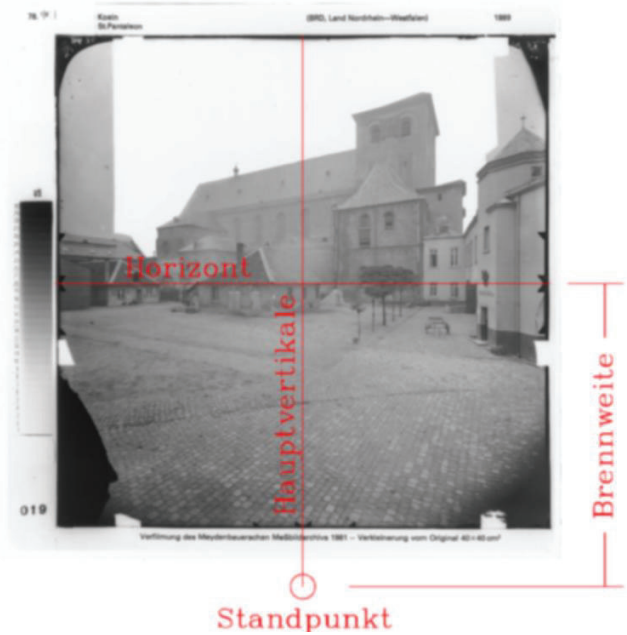


Abbildung 4 Abtragung der Brennweite

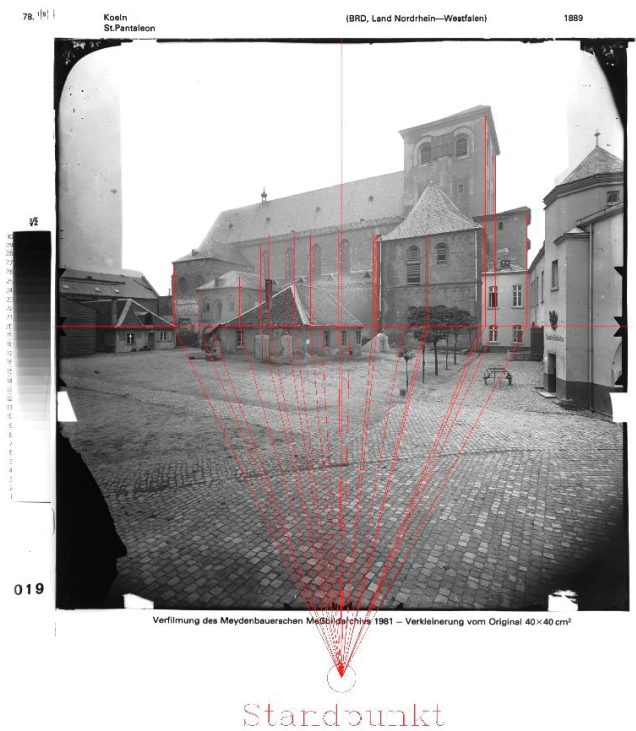


Abbildung 5 Linien zwischen den Projektionspunkten auf dem Horizont und dem Standpunkt

Bei unbekanntem Standpunkt, bekannter Brennweite und einer genügenden Anzahl von in ihrer Lage bekannten Gebäudepunkten beschreibt Meydenbauer eine nachträgliche Standortbestimmung über das „Rückwärtseinschneiden nach Potenot“ (Meydenbauer 1912: S. 32 und S. 218), heute meist als Potenotsche Aufgabe oder ebener Rückwärtsschnitt bezeichnet. Für die graphische Lösung beim Messbild-Verfahren müssen in dem jeweiligen Messbild mindestens drei bekannte Gebäudepunkte vorhanden sein, möglichst in mehreren Objekt-Ebenen über das gesamte Bild verteilt. Liegen diese Punkte zu eng beieinander, wird die Bestimmung ungenau. Für St. Pantaleon kommt hierfür nur der östliche Bereich der Kirche und das im Westen angrenzende Nebengebäude in Frage, da diese von den Baumaßnahmen 1890 bis 1892 weitgehend unberücksichtigt blieben. Die Winkel zwischen den vom über die Brennweite bestimmten Standpunkt S zu diesen Punkten P1 bis P3 führenden Strahlen (siehe oben) werden gemessen, wobei der Winkel zwischen den Strahlen zu P1 und P2 hier als α und der zwischen den Strahlen zu P2 und P3 als β bezeichnet wird (Abbildung 6).

Im schon aufgetragenen Grundriss werden zwei Linien gezeichnet, von P1 nach P2 und von P2 nach P3. Über die Formel

$$\gamma = (180^\circ - 2\alpha) : 2 \text{ bzw. } \delta = (180^\circ - 2\beta) : 2$$

erfolgt die Berechnung der Winkel γ und δ . Am Punkt P1 trägt man den Winkel γ in Richtung des angenommenen Standpunktes ab und zeichnet eine weitere Linie. Am Punkt P2 wird dies wiederholt. Die beiden Linien schneiden sich in einem Punkt M1, um welchen ein Kreis gezeichnet wird, der durch P1 und P2 geht. Entsprechend verfährt man an den Punkten P2 und P3 mit dem Winkel δ und erhält einen weiteren Kreis um M2 durch die Punkte P2 und P3. Die beiden Kreise schneiden sich im Punkt P2 und einem weiteren Punkt, dem gesuchten Standpunkt (Abbildung 7).

Bei einer Änderung der Brennweite ändern sich die Winkel γ und δ und folglich auch die Lage des Kamera-Standpunktes. In dem hier gezeigten Beispiel ergibt sich bei einer Differenz von 0,5 mm eine Verschiebung des Standpunktes um 18 cm, bei 5 mm sind es bereits 1,92 m. Die vom Standpunkt zu den Gebäudekanten führenden Strahlen werden nun kopiert und deren Anfangspunkte in den soeben ermittelten Standpunkt gelegt (Meydenbauer beschreibt hierfür ein zeichnerisches Verfahren über eine sogenannte Zulage: Meydenbauer 1912: S. 194-196). Das Strahlenbündel wird nun um den Standpunkt soweit gedreht,

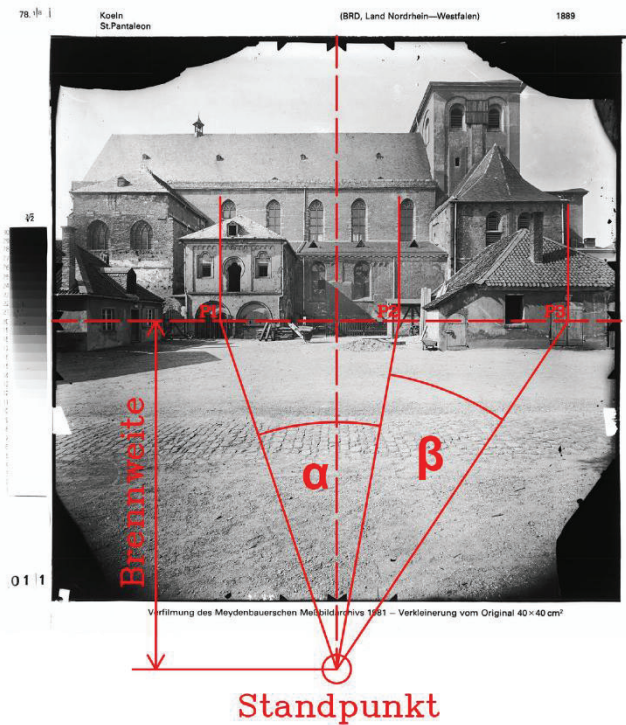


Abbildung 6 Messbild 78.18: Winkel zwischen den zu den bekannten Punkten führenden Strahlen

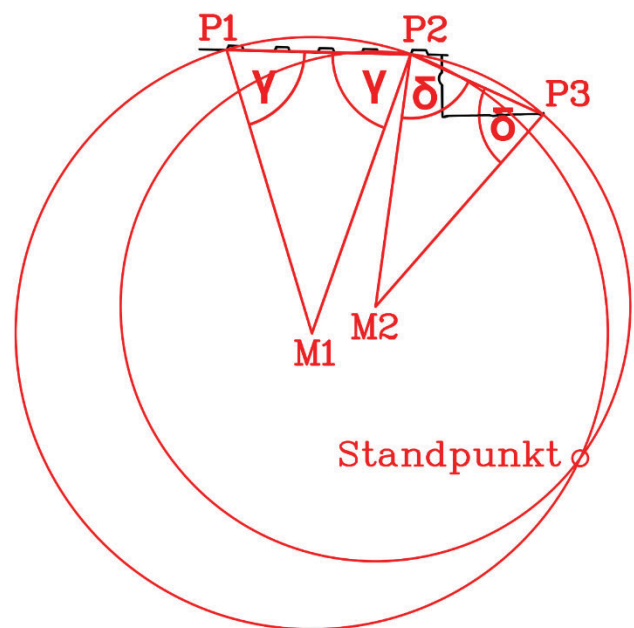


Abbildung 7 Bestimmung des Standpunktes

dass die zu den Punkten P1 bis P3 gehörenden Strahlen genau durch die entsprechenden Punkte, die Richtpunkte, im Grundriss gehen (Abbildung 8).

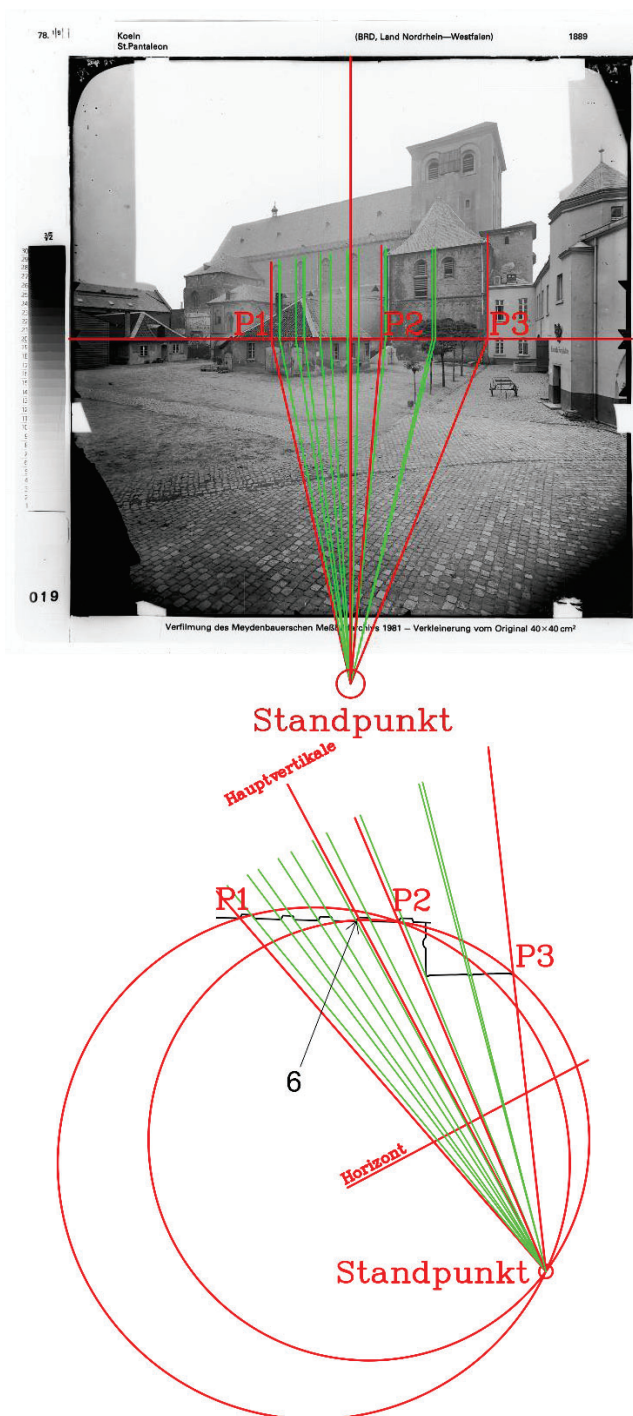


Abbildung 8 Messbild 78.19: Strahlen vom Standpunkt zu den bekannten Punkten im Grundriss, Richtpunkte in rot, weitere Punkte in grün

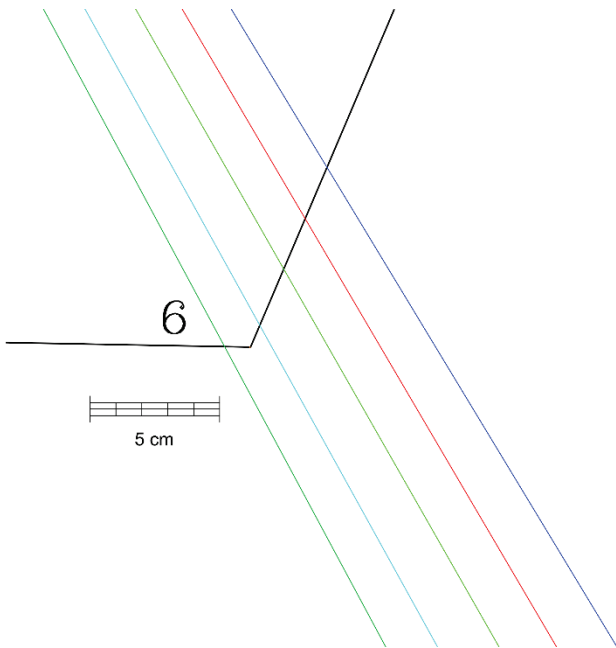
Bei den heute noch vorhandenen Gebäudekanten ist davon auszugehen, dass diese nicht genau senkrecht stehen,

hier bestätigt durch die aktuelle Vermessung mit dem 3D-Laserscanning. Aus der Gesamt-Punktswolke wurden also horizontale Schichten, z.B. direkt unterhalb der Kämpferhöhe der Obergaden-Fenster des Mittelschiffs und in der Höhe ausgewählter Steine der Eckquaderung, von etwa 5 cm Stärke extrahiert, welche in CAD als Grundriss nachgezeichnet werden (siehe Abbildung 8). Die ermittelten Punkte werden dann im Messbild so genau wie möglich bestimmt und von diesen die Senkrechten auf den Horizont konstruiert.

Unabhängig von der angesetzten Brennweite werden die Richtpunkte P1 bis P3 von ihren Strahlen immer genau getroffen, da über diese ja nach der Pothenotschen Aufgabe die Lage des Standpunktes bestimmt wurde. Die Strahlen der übrigen bekannten Gebäudepunkte, in Abbildung 8 grün angelegt, verfehlen die zugehörigen Fenster- und Gebäudekanten im Grundriss mehr oder weniger. Die Differenzen zwischen diesen Punkten und den Schnittpunkten der Strahlen mit der Gebäudeaußenfläche variieren bei Änderung der Brennweite. Es bietet sich so ein iteratives Verfahren an, d.h. ausgehend von der angegebenen Objektivbrennweite wird diese schrittweise verringert bzw. vergrößert. Für das Instrument I mit der Brennweite von 25 cm wurden hierzu die Messbilder 78.18 und 78.19 ausgewählt, weil diese eine größere Anzahl von in der Lage bekannten Punkten abbilden und eine Redundanz erreicht wird. In diesen Messbildern werden neben den Richtpunkten P1, P2 und P3 neun Punkte ausgewählt, von denen acht in beiden Bildern vorkommen.

Ausgegangen wird von der angegebenen Brennweite von 25 cm, darauf die Brennweiten 24,8 cm und 25,2 cm betrachtet. Die Änderung um jeweils zwei Millimeter ist willkürlich gewählt, doch Meydenbauer erwähnt, dass Brennweitenänderungen bis zu diesem Wert nicht selten sind, allerdings für Brennweiten über 25 cm (Meydenbauer 1912: S. 189). Bei beiden Bildern zeigt sich, dass die Abweichungen bei 24,8 cm am geringsten sind. Im zweiten Schritt wird die Brennweite in Millimeter-Schritten weiter verkleinert. Die Brennweite 24,4 cm zeigt die geringsten Abweichung und wird folglich für das Instrument I als guter Näherungswert angenommen (Abbildung 9).

Meydenbauer fordert jedoch die Brennweitenbestimmung mit einer Genauigkeit von 1/10 Millimeter. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit dies bei dieser Methode der nachträglichen Brennweitenbestimmung Sinn macht. Versuche haben gezeigt, dass Unterschiede bei den Abweichungen dann kaum noch messbar sind.



Brennweiten in cm	Messbild 78.18			Messbild 78.19		
	24,4	24,5	24,6	24,4	24,5	24,6
Punkt Nr.	Abweichungen in cm					
1	+0,2	+0,35	+0,5	+0,6	+0,6	+0,5
2	-0,1	+1,4	+1,8	+1,6	+1,7	+1,8
3	+3,0	+3,8	+4,2	+3,1	+3,3	+3,4
4	+1,0	+1,6	+2,1	+2,8	+3,0	+3,2
5	+1,9	+2,4	+2,8	+1,7	+1,9	+2,1
6	+1,2	+1,6	+1,9	+1,1	+1,3	+1,4
7	+1,3	+1,6	+1,8	-1,0	-0,9	-0,8
8	-1,4	+1,7	-2,1	/	/	/
9	-0,1	+1,7	+3,4	+0,8	+4,1	+6,7

Abbildung 9 oben: Verlauf der Strahlen unterschiedlicher Brennweiten am Gebäudepunkt 6 (siehe Abbildung 8), unten: Tabelle mit den Abweichungen der Strahlen an den unterschiedlichen Gebäudepunkten

Bleibt noch die Ermittlung der genauen Brennweiten der Instrumente II und III. Als weitere Unbekannte kommt bei diesen eine mögliche Objektivverschiebung hinzu. Für die Brennweitenbestimmung spielt diese jedoch keine Rolle, da die an dem Gebäude bekannten Punkte senkrecht auf den Horizont projiziert werden und es daher unerheblich ist, ob der Horizont sich im Messbild weiter unten oder oben befindet. Instrument II konnten fünf Messbilder zugeordnet

werden, von denen drei genügend bekannte Punkte zeigen, um eine Brennweitenbestimmung gemäß Instrument I durchführen zu können. Die geringsten Abweichungen zeigten sich hier bei einer Brennweite von 35,7 cm. Mit Instrument III wurde nur ein Messbild erstellt, in dem nur in der rechten Bildhälfte einige bekannte Punkte vorhanden sind. Eine Brennweite von 53,2 cm könnte eine gute Annäherung ergeben.

Mit den so ermittelten Brennweiten kann nun die Lage aller Standpunkte der 16 Messbilder über das „Rückwärtseinschneiden nach Potenot“ ermittelt werden (Abbildung 10).

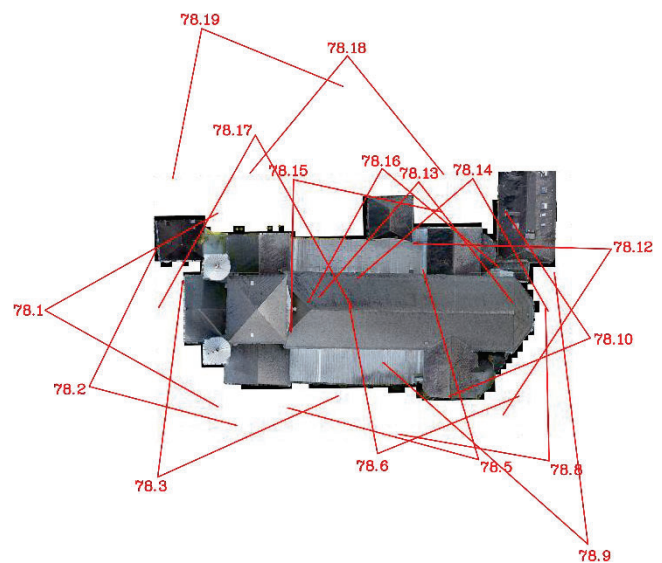


Abbildung 10 Aufsicht auf St. Pantaleon mit der Lage der Kamerastandpunkte der 16 Messbilder

2.4 Rekonstruktion des Baubestands

Über die Schnittpunkte der zu einem Gebäudepunkt von mehreren Kamerastandpunkten ausgehenden Strahlen lässt sich dessen Lage bestimmen. Falls möglich, sollten zur Kontrolle mehrere Messbilder einbezogen werden, wobei sich die Strahlen dann meist nicht in einem Punkt treffen, sondern z.B. bei drei Messbildern ein kleines Dreieck bilden (Abbildung 11). Meydenbauer zeigt mehrere Möglichkeiten zum Umgang mit diesen Ungenauigkeiten. Entweder wird der Schwerpunkt des Dreiecks als Gebäudepunkt definiert oder dem Strahl des nähergelegenen Kamerastandpunktes wird eine Priorität gegeben, oder es hat sich ein Messbild als unzuverlässig erwiesen aufgrund von Fehlern bei der Vermessung vor Ort. Es bleibt wohl immer eine Einzelfallentscheidung.

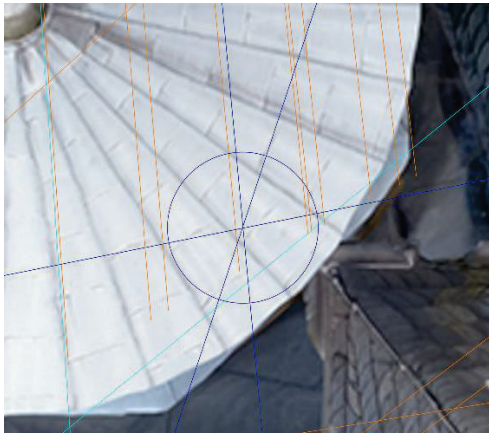
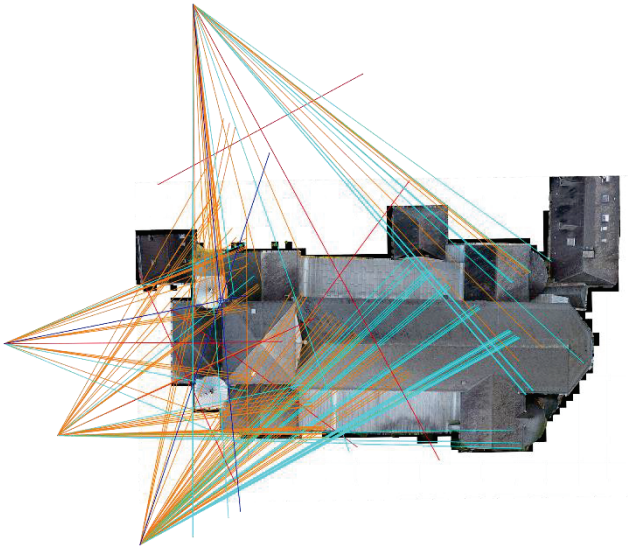


Abbildung 11 oben: Aufsicht auf St. Pantaleon mit den Messtrahlen von vier Kamerastandpunkten
mittig: Nordwestecke des auskragenden Daches des Glockenturms (siehe auch Abbildung 12) im blauen Kreis
unten: Vergrößerung aus der mittigen Abbildung, das kleine Dreieck hat Kantenlängen im Bereich von 1cm

2.5 Die Objektivverschiebung (Elevation)

Im Vergleich zur Brennweite gestaltet sich die Bestimmung der Objektivverschiebung, welche für die Höhenangaben ausschlaggebend ist, sehr einfach. Laut seinem Buch soll diese, von Meydenbauer Elevation genannt, in 1 cm-Schritten erfolgen. Dies lässt sich über annähernd waagerechte Bauteile direkt im Messbild feststellen. Die mit Instrument II erstellten Messbilder zeigen meist eine Elevation von 11 cm. Bei bekanntem Kamerastandpunkt lassen sich dann die Höhen einzelner Gebäudeteile über den Strahlensatz ermitteln (Abbildung 12).

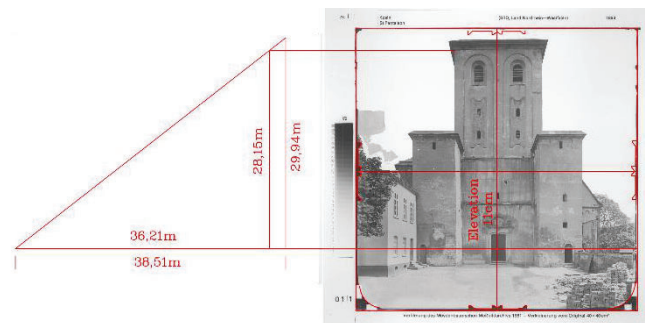


Abbildung 12 Bestimmung der Höhe der Nordwestecke des Glockenturms über den Strahlensatz. Hierzu muss die Horizontalentfernung zum Kamerastandpunkt bekannt sein

3 Ergebnisse

Aufgrund der fehlenden Unterlagen lässt sich nur eine möglichst genaue Annäherung an den Bauzustand zum Zeitpunkt der Aufnahmen erreichen. Die folgenden Voraussetzungen sind dafür notwendig:

- Untersuchung der Bauhistorie seit dem Zeitpunkt der Aufnahmen zur Bestimmung von Übereinstimmungen mit dem heutigen Bestand notwendig
- Ermittlung der verwendeten Instrumente (Größe der Negativ-Glasplatten und der Objektiv-Brennweiten)
- Bestimmung der genauen Brennweiten
- Bestimmung der „Elevationen“ (Objektivverschiebungen)

4 Fazit & Ausblick

Die hier dargelegten Untersuchungen basieren auf rein grafischen Methoden im Sinne der Vorgehensweise von Albrecht Meydenbauer. Inwieweit rechnerische und computergestützte Methoden gerade die aufwendige Brennweitenbestimmung vereinfachen und eventuell zu genaueren Ergebnissen führen können, bleibt noch zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Bentmann, R. & Viebrock, J. N. [Hrsg] (2006). Hessische Baukunst in alten Fotografien – Dokumentaraufnahmen der Preußischen Messbildanstalt zu Berlin von Albrecht Meydenbauer, Lampertheim
- Fraquelli, S. (2010). Die romanischen Kirchen im Historismus, Köln
- Fußbroich, H. (1984). St. Pantaleon, in: Stadts Spuren – Köln: Die Romanischen Kirchen, Köln
- Götze, B. (2021). Die optische Industrie in den 1850er und 1860er Jahren in Rathenow / Emil Busch – Perspektiven neuer Objektivherstellung, in: Meydenbauer / Busch – Pioniere der Photogrammetrie, [Hrsg] Bettina Götze, S. 4-17, Rathenow
- Grimm, A. (1978a). 120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland - Das Tagebuch von Albrecht Meydenbauer, dem Nestor des Messbild-Verfahrens, veröffentlicht aus Anlass des Jubiläums 1858/1978; Deutsches Museum, Abhandlungen und Berichte, 45. Jahrgang 1977 Heft 2, München
- Grimm, A. (1978b). Zwei Meydenbauer'sche Instrumente für die Architektur-Photogrammetrie wiedergefunden, in: Bildmessung und Luftbildwesen 46(1978)2
- Grimm, A. (2021). Albrecht Meydenbauer: Bauingenieur – Fotograf - Photogrammeter, in: Meydenbauer / Busch – Pioniere der Photogrammetrie, [Hrsg] Bettina Götze, S. 32-61, Rathenow
- Hillnhütter, S. (2021). *Faktotum Fotografie: Architektur und Geschichte im „unverfälschten Bildstoff“ der Photogrammetrie von Albrecht Meydenbauer*, in: Faktizität und Gebrauch früher Fotografie, [Hrsg] Tatjana Bartsch, Ralf Bockmann, Johannes Röhl, DAI und MPI Bibliotheca Herziana Rom.
- Hoffmann, G. (1995). Rheinische Romanik im 19. Jahrhundert, Köln
- Krings, U. & Schwab, O. (2007). Köln: Die romanischen Kirchen – Zerstörung und Wiederherstellung, Köln
- Lautenschläger, R.-P. & Hackemer, W. (2021). Zur Entwicklung des Weitwinkel-Fotoobjektivs „Pantoskop“ durch Emil Busch in Rathenow und die Nachrechnung der Pantoskop-Optikdaten in den Jahren 2014 und 2018, in: Meydenbauer / Busch – Pioniere der Photogrammetrie, [Hrsg] Bettina Götze, S. 18-31, Rathenow
- Li C. (1997). Nachträgliche Kalibrierung der historischen Meydenbauer-Kameras, in: Albertz, Jörg / Wiedemann, Albert [Hrsg]: Architekturphotogrammetrie gestern-heute-morgen, S. 63-77, Berlin
- Meyer, R. (1985). Albrecht Meydenbauer – Baukunst in historischen Fotografien, Leipzig
- Meydenbauer, A. (1892). Das photographische Aufnehmen zu wissenschaftlichen Zwecken, das Messbild-Verfahren. Erster Band: Die photographischen Grundlagen und das Messbild-Verfahren mit kleinen Instrumenten, Berlin
- Meydenbauer, A. (1912). Handbuch der Messbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler- und Reise-Aufnahmen, Halle a. S. Mühlberg (1989)
- Schwidefsky, K. (1971). Albrecht Meydenbauer – Initiator der Photogrammetrie in Deutschland, in: Bildmessung und Luftbildwesen. Berlin Karlsruhe, S. 183-189
- Siedler, G., Sacher, G. & Vetter, S. (2010). Photogrammetrische Auswertung von historischen Messbildern und Fotografien am Beispiel des Stadtschlösses in Potsdam, in: Von Handaufmaß bis HighTech III. 3D in der historischen Bauforschung, hg. von K. Heine et al., Mainz 2010, S. 26-32
- Wiedemann, A., Hemmleb, M. & Albertz, J. (2000): Reconstruction of Historical Buildings based on Images from the Meydenbauer Archives, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. XXXIII, Part B5. Amsterdam 2000, S. 887-893
- Zentralblatt der Bauverwaltung XV. Jahrgang (1895). *Aufnahmen von Bauwerken nach dem Meßbild-Verfahren*, Hrsg. Ministerium der öffentlichen Arbeiten, Berlin.

Von Scandaten zu visualisierten Punktwolken

Martin Graner¹

Zusammenfassung

Laserscanning hat sich in den letzten Jahrzehnten rasant weiterentwickelt. Altbekannte Aufnahmeverfahren wie Photogrammetrie sind verbessert worden. Hardware ist schneller, genauer, mit höherer Messreichweite und günstiger geworden. Mobile Geräte haben steigende Beliebtheitswerte und ein wachsendes Angebot von Herstellern. Daraus resultieren wiederum mehr Anwender, welche mehr Punktwolkenprojekte produzieren. Doch nicht nur in den Aufnahmeverfahren und der Hardware gibt es Fortschritt, sondern auch in der Softwareentwicklung. Immer mehr Softwareprodukte unterstützen das Einlesen, Verarbeiten und Visualisieren von Punktwolken. Des Weiteren verschieben sich die Anwendungen von bisherigen Desktoplösungen zu Cloudanwendungen. Daraus ergeben sich Schwierigkeiten in der Datenweitergabe zwischen Softwarelösungen, wie auch die effiziente Visualisierung immer größer werdender Projekte. Die Datenweitergabe von Punktwolken erfolgt in der Regel mittels bekannter Austauschformate. Die größte Schwierigkeit bei Austauschformaten ist zum einen die Befolgung des spezifizierten Standards von Firmen, zum anderen die Marktdurchdringung. Ein Format mit exzellenten Eigenschaften, wie kleiner Dateigröße, schneller Einlesegeschwindigkeit und optimaler Vorsortierung zum Prozessieren und Visualisieren wird nicht zwangsläufig vom Markt unterstützt, da Firmen stark darauf bedacht sind Kunden im eigenen Ökosystem zu halten.

In diesem Beitrag gehen wir auf den Arbeitsablauf vom Laden der Daten, auf dem Weg zur fertigen Visualisierung, ein. Außerdem werden die derzeit vom Markt am besten unterstützten Austauschformate miteinander verglichen. Zuletzt werden Visualisierungsstrategien diskutiert, da die derzeitige Hardware nicht für die Visualisierung riesiger Punktwolkenprojekte mit naiven Ansätzen ausgelegt ist.

Schlagwörter Laser scanning · Visualisierung · Punktwolken · Formate

1 Einführung

Durch die breitere Akzeptanz von Laserscanning im Aufmaß und als Grundlage zur Modellierung von Bestandsgebäuden steigt das Ausmaß von Projekten. Zusätzlich gibt es weitere Neuerungen in der Scannertechnologie. Reduzierung der Aufnahmezeit, Erhöhung der Distanzmessung und Vergrößerung der Scanauflösung führt zu immer umfangreicheren Punktwolken.

Daraus resultieren Schwierigkeiten im Bereich Datenmanagement, Dateigröße, Prozessierung und Visualisierung.

Im Kapitel 2 wird kurz auf den notwendigen Prozessablauf vom Datenträger in die Grafikkarte eingegangen. Danach werden im Kapitel 3 Punktwolkenformate, deren Speichergröße und Einlesegeschwindigkeit diskutiert. Zuletzt wird in Kapitel 4 und 5 die eigentliche Visualisierung besprochen.

2 Vom Datenträger in die Grafikkarte

In der Visualisierung mittels Computer müssen Daten mithilfe einer GPU (Graphical Processing Unit) in ein Format gebracht (rendering) werden, welches auf Bildschirmen angezeigt werden kann. Dabei können bestimmte Geometrien, wie Dreiecke, Quadrate und Linien, teilweise auch Punkte, direkt visualisiert werden, alles weitere muss jedoch in diese Geometrien überführt werden. Der Arbeitsablauf der Hardware folgt in diesem Fall vom Einlesen der Daten von einem Datenträger in den Arbeitsspeicher, entweder lokal über direkt verbundene Hardware oder über das Internet und von dort in den VRAM (Video Random Access Memory) der GPU.

Von dort kann die GPU dann auf die Daten zugreifen und diese prozessieren.

¹ PointCab GmbH, Talstr. 8, 73249 Wernau, Deutschland, E-Mail: martin.graner@pointcab-software.com

3 Punktwolkenformate

Unter dem Begriff Punktwolke verbirgt sich eine Ansammlung von Punkten im dreidimensionalen Raum. Diese Punktsammlung kann optional mit Metadaten, wie Scaninformationen und Projektionsmatrizen, verknüpft sein. Jedem Punkt in der Sammlung können diverse Attribute zugeordnet werden, wobei eine Punktwolke ohne Attribute auch zulässig ist. Typische Attribute sind Reflektivitäts bzw. Intensitätswerte, Farbinformationen, Zeitstempel, Segment- und Klassifikationsnummern, Validität und Normalen. In der Regel haben alle Punkte in der Punktwolke die gleiche Attributzusammensetzung. Bei Änderungen der Attribute gruppiert man Punkte in der Sammlung mit den gleichen Attributen zusammen. Im weiteren Verlauf werden wir Punkte mit den zugehörigen Attributen als Daten zusammenfassen.

Punktwolken werden in verschiedenen Formaten gespeichert. Standardmäßig hat jeder Gerätehersteller sein eigenes proprietäres Format. Dieses ist auf die Laserscannersysteme des Herstellers abgestimmt und wird im ersten Schritt, bei der Datenaufnahme in einem Rohformat abgespeichert.

Nach der Datenaufnahme werden diese Rohdateien per Kabel oder Wifi auf einen Rechner transferiert, um diese dort weiter zu prozessieren. Typische Schritte sind unter anderem die Verbesserung des SLAMs (simultaneous localisation and mapping), Kolorierung, Streupunktfilterung, Registrierung von terrestrischen Scans und das Entfernen bewegter Objekte. Die weitere Bearbeitung der Punktwolke erfolgt in der Regel nicht in der Punktwolkenprozessierungssoftware, sondern in Drittlösungen, in der Regel GIS (Geoinformationssystem), CAD (Computer-aided design) oder BIM (Building Information Modelling) Softwarepaketen.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Drittsoftwarelösungen nicht die proprietären Punktwolkenformate der Gerätehersteller lesen können, müssen daher die Dateien in ein Austauschformat gebracht werden, welches von der genutzten Drittsoftware verarbeitet werden kann.

Typische Punktwolkenaustauschformate im Gebrauch sind unter anderem XYZ, E57, LAS und LAZ.

Zu unterscheiden sind hier binär- und textbasierte Formate. Während XYZ komplett textbasiert ist und keine Metadaten beinhaltet, liegen bei den anderen genannten Formaten die Daten Binär ab und sie enthalten Metadaten in Binär- oder Textform.

Ein weiterer Unterschied zwischen den genannten Formaten ist, dass im LAZ-Format die Daten komprimiert abgespeichert sind und dadurch deutlich weniger Speicherplatz verbraucht.

3.1 Speicherplatzbedarf der Formate

Den verbrauchten Speicherplatz bei unkomprimierten Binärformaten kann man generalisiert abschätzen. In (1) sehen wir, dass die Dateigröße sich aus der Summe der enthaltenen Attribute sowie Punkte berechnet. In der Regel werden die reinen Koordinaten in 24 Byte und die Farbkanäle pro Kanal in einem Byte gespeichert. Weitere Attribute fallen je nach gewählter Datentypenart in die gleiche Größenordnung. Metainformationen sind in der Regel zu vernachlässigen, da sie nur einen Bruchteil der Dateigröße ausmachen.

Im Gegensatz dazu kann bei textbasierten Formaten kein genauer Speicherplatzverbrauch berechnet werden. Beim XYZ-Format liegt dies daran, dass der Speicherplatzverbrauch nicht nur mit der Punktzahl und den vorhandenen Attributen skaliert, sondern auch mit dem gewählten Koordinatensystem sowie der gespeicherten Punktgenauigkeit. Dies liegt daran, dass jedes Zeichen im Textformat ein Byte groß ist. Das heißt, bei einem globalen Projekt ist in jedem Punkt die Translation vom lokalen in das globale Projekt als zusätzliche Textzeichen enthalten.

$$D = \sum(xyz + R + RGB) \quad (1)$$

wobei D = Dateigröße, xyz = Punktposition, R = Reflektivität, RGB = Farbinformation

In Abb. 1 sieht man die Dateigröße der bereits erwähnten Formate, sowie zwei Binärformate ohne Metadaten. Dabei fällt auf, dass eine Änderung der genutzten Datentypen einen starken Einfluss auf die Dateigröße hat. Einen deutlich größeren Einfluss hat jedoch die Kompression, wie bei dem kaum erkennbaren Balken vom LAZ-Format ersichtlich.

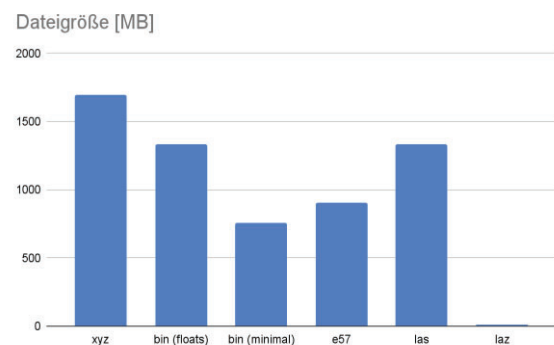


Abbildung 1 Dateigröße identischer Punktwolke mit 49,8 Mio. Punkten in diversen Austauschformaten

3.2 Einlesegeschwindigkeit der Formate

Die Einlesegeschwindigkeit ergibt sich aus zwei Schritten: Das Lesen sowie die Interpretation der Daten. Die theoretisch typischen Lesegeschwindigkeiten von Speichermedien findet man in Tabelle 1. Zu beachten ist, dass sich je nach Hardware sich die Geschwindigkeit um ca. Faktor zehn unterscheidet. Die resultierende Geschwindigkeit bis zu den bereitgestellten Daten hängt somit vom Speichermedium (interne SSD, externe Festplatten, Server über Internet, ...), als auch von der Formatspezifikation selbst ab.

Die Interpretation der Daten kann auch aus mehreren Schritten bestehen. Dekomprimierung, Dequantisierung SCHÜTZ (2016, S. 59), Wertebereichadaption und Koordinatentransformation. Je nach eingesetzter Methode oder Algorithmen können diese Schritte unterschiedlich rechenintensiv sein.

Heutige Dekompressionsverfahren sind in der Regel schneller als die Lesegeschwindigkeit einer internen SSD-Festplatte. In Kombination mit den anderen Interpretationsschritten kann die Geschwindigkeit der Interpretation der Daten aber langsamer als die Lesegeschwindigkeit sein. Als Beispiel sei das Parsen und Umwandeln von Text in Binärdaten genannt, das deutlich langsamer als die typische Lesegeschwindigkeit einer SSD ist.

Die Lese-, sowie die Interpretationsschritte können alle parallel erfolgen. Es ist also nicht notwendig, zuerst die gesamte Datei zu lesen und dann zu interpretieren. Somit ergibt sich eine typische Flaschenhalssituation und der begrenzende Faktor kann klar determiniert werden.

Da die Lesegeschwindigkeit einer harten Grenze des gewählten Speichermediums unterliegt, muss man auf der anderen Seite die Anzahl und Rechenintensität der Interpretationsschritte beachten. Bei einer hohen Lesegeschwindigkeit des Mediums, wie bei einer SSD, kann man nicht viele Interpretationsschritte durchführen, bevor diese der begrenzende Faktor werden. Auf der anderen Seite ist beim Download von Daten aus dem Internet, der begrenzende Faktor stets die Lese- bzw. Downloadgeschwindigkeit und niemals die Interpretation. Im Falle von Daten aus dem Internet ist es also deutlich besser, kleinere Datenmengen lesen zu müssen und diese dafür in das benötigte Format zu interpretieren.

Tabelle 1 Typische Lesegeschwindigkeit von Daten

Typ	Geschwindigkeit GB/s
SSD	3,5
HDD	0,2
Externe Festplatte	0,06
250 MBit Internet	0,003

In Abb. 2 sieht man die komplette Einlesedauer der genannten Formate. Zu beachten ist hierbei, dass die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind, da E57, LAS und LAZ über externe Bibliotheken, die restlichen über Selbstimplementation durchgeführt wurden. Des Weiteren ist die Lesegeschwindigkeit bei der Selbstimplementation nicht optimal, da nur einzelne Byte anstatt größerer Blöcke gelesen wurden.

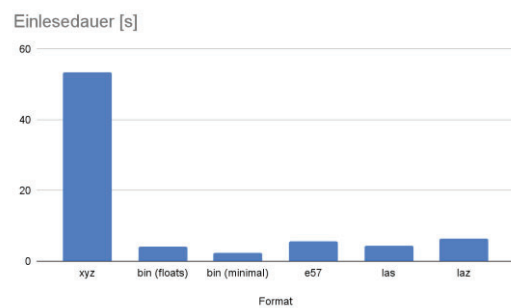


Abbildung 2 Einlesedauer identischer Punktwolke mit 49,8 Mio. Punkten in diversen Austauschformaten von SSD

4 Grafik APIs

Eine API (Application Programming Interface) ist ein Verbindungsstück zwischen verschiedener Hardware und Software oder zwischen Programmen. Damit man nicht für jede verfügbare Hardware Programmcode erstellen muss, benutzt man APIs. Dies gilt auch für Grafikkarten. Dort sind die bekanntesten APIs OpenGL, Vulkan, DirectX und Metal. Während DirectX und Metal proprietär nur unter Windows bzw. MacOS laufen, unterstützt OpenGL und Vulkan alle herkömmlichen Betriebssysteme.

Die verschiedenen APIs haben seit den Jahren ihrer Entstehung diverse Umstellungen in ihren Programmierkonzepten und -mustern. Das derzeit vorherrschende Vorgehen ist das Aufbauen diverser Pipelines. Man kann sich das wie Fließbandarbeit vorstellen, wo an verschiedenen Stationen die Daten spezialisiert bearbeitet und dann weitergegeben werden.

5 Visualisierung

Nachdem nun der Arbeitsablauf vom Laden und Interpretieren der Punktwolken diskutiert wurde, kommen wir zur eigentlichen Visualisierung.

Wie in Kapitel 2 gezeigt wurde, kann die gesamte Punktwolke nicht in Echtzeit von einem Medium in den Arbeitsspeicher geladen werden. Des Weiteren ist es ab einer gewissen Projektgröße auch nicht mehr möglich, das Projekt im Arbeitsspeicher und noch weniger im VRAM der Grafikkarte zu halten. Zusätzlich muss bei einem Szenenwechsel (Bewegung der Kamera), das visualisierte Bild möglichst schnell wieder aufgebaut werden, präferiert in Millisekunden oder schneller.

Übliche Ansätze um diese Limitierungen zu umgehen sind das Erstellen diverser Detailgrade (Level of Detail, LOD), mit Octree oder kd-tree Aufteilungen. Ein detaillierter Überblick über räumliche Datenstrukturen findet sich in SAMET (2006). Generell ist es wichtig, dass sichtbare Regionen mit einer hohen Punktzahl visualisiert werden, während nicht sichtbare oder verschattete Regionen nicht visualisiert werden müssen. Um möglichst wenig Punkte pro Region für das beste Visualisierungsergebnis anzeigen zu müssen, sollte man bei der Punkteverteilung der einzelnen Regionen einen geeigneten Ansatz wählen. Wie von SCHÜTZ (2016, S. 17) gezeigt, ist eine geeignete, jedoch rechenintensive Verteilung Poisson-Disk Subsampling. Dabei wird die Distanz zwischen allen Punkten minimiert und somit Löcher vermieden, während gleichzeitig die benötigte Punktzahl minimiert wird.

Selbst mit dem Aufbau von LODs muss man die einzelnen Regionen schnell und effizient durch die Visualisierungspipeline schicken. Der naive und bisher übliche und für die Hardware ausgelegte Weg, GPU native Punktprimitive durch Rasterizer und Fragment Shader zu visualisieren, wird zunehmend durch Compute Shader ersetzt (SCHÜTZ et al., 2021).

6 Fazit & Ausblick

Die derzeit im Markt vorherrschenden Austauschformate für Punktwolken sind eine nicht zufriedenstellende Lösung. Weiterentwicklungen in der Kompressionstechnologie und das Verschieben von Anwendungen in die Cloud machen die Neuentwicklung offener Austauschformate notwendig. Dabei ist die größte Hürde nicht der Forschungsstand oder die Implementation eines Standards, sondern das Erreichen der Marktdurchdringung.

Visualisierung von vielen Daten ist ein altes und gut erforschtes Problem. Jedoch sind weiterhin Techniken zur effizienten Punktwolkenvisualisierung zu entschlüsseln, vor allem im Hinblick auf größer werdende Projekte.

Literaturverzeichnis

- Schütz, M. (2016). Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers.
- Schütz, M., Kerbl, B. & Wimmer, M. (2021), Rendering Point Clouds with Compute Shaders and Vertex Order Optimization. *Computer Graphics Forum*, 40: 115-126. <https://doi.org/10.1111/cgf.14345>
- Samet, H. (2006). *Foundations of multidimensional and metric data structures*. Morgan Kaufmann.

Evaluierung des Genauigkeitspotentials der PLS-Systeme GeoSLAM ZEB Horizon und Leica BLK2GO für die Erfassung einer komplexen Maschinenhalle

Stefan Binapfl¹, Robert Blaskow², & Ferdinand Maiwald¹

Zusammenfassung

Dieser Beitrag untersucht das Genauigkeitspotential der beiden Personal Laserscanning (PLS)-Systeme GeoSLAM ZEB Horizon und Leica BLK2GO in einer komplexen Maschinenhalle. Zu diesem Zweck wurde die Halleninnenfläche mit beiden handgehaltenen Laserscannern sowohl in einem durchgehenden Single-Route-Scan als auch in einem Multi-Route-Scan, bestehend aus vier Teilscans, erfasst. Bei Referenzflächenvergleichen mit einer terrestrischen Laserscanning (TLS)-Messung zeigt sich für beide Systeme ein Genauigkeitsniveau im unteren Zentimeterbereich, wobei bei strukturlosen Flächen jeweils größere Distanzen festgestellt wurden. Zudem weist der ZEB Horizon jeweils ein höheres Messrauschen auf. In den Punktwolkenvergleichen der PLS-Systeme untereinander treten die größten Abweichungen lokal an einzelnen Maschinen, entlang der Hallenränder sowie im Dachbereich auf. Trotz dieser lokalen Maximalabweichungen bleibt die durchschnittliche Abweichung der Punktwolkenvergleiche im unteren Zentimeterbereich. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich beide Systeme für die Erfassung industrieller Umgebungen eignen, sofern die geforderte Genauigkeit im Zentimeterbereich liegt.

Schlagwörter Personal Laserscanning · SLAM · Genauigkeitsuntersuchung · GeoSLAM ZEB Horizon · Leica BLK2GO

1 Einführung

Die dreidimensionale (3D) Erfassung von Gebäuden, Innenräumen sowie Vegetations- und Forstflächen ist ein zentraler Bestandteil der modernen Vermessungstechnik. Während das TLS aufgrund seiner hohen Zuverlässigkeit und Genauigkeit weiterhin den Referenzstandard zur Erzeugung präziser 3D-Modelle darstellt, gewinnt das PLS insbesondere durch seine hohe Zeit- und Kosteneffizienz zunehmend an Bedeutung (Di Stefano et al., 2021).

Aktuelle PLS-Systeme basieren auf der Fusion eines Inertial Measurement Unit (IMU)-Sensors, welcher die Rotations- und Drehbewegungen des Scanners aufzeichnet, einer Light Detection and Ranging (LiDAR)-Einheit sowie optionalen Kameras. Die gemessenen Daten aus allen Sensoren werden mithilfe des Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)-Algorithmus miteinander kombiniert, sodass die Trajektorie und die Umgebungsstruktur während der mobilen Datenaufnahme in Echtzeit erzeugt werden kann (Conti et al., 2024).

Aufgrund der dynamischen Datenerfassung lassen sich mit PLS-Systemen komplexe Strukturen innerhalb kurzer

Zeit erfassen, wohingegen bei TLS-Messungen mehrere Standpunkte und entsprechend längere Aufnahmezeiten erforderlich sind. Einschränkend wirken jedoch systematische Fehler, insbesondere Drifteffekte infolge von Messunsicherheiten der IMU sowie aufgrund zu homogener Umgebungsbedingungen (Martienßen, 2019).

Des Weiteren zeigen PLS-Geräte eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber dem Maßstabsfehler. Dieser entsteht dadurch, dass jede Laserdistanzmessung mit einem Maßstabsfaktor multipliziert wird. Weicht dieser Faktor von dem Wert 1 ab, werden die gemessenen Strecken systematisch zu lang oder zu kurz dargestellt. Aufgrund der multiplikativen Wirkung des Maßstabsfaktors nehmen die Abweichungen mit zunehmender Entfernung zum LiDAR-Sensor zu. Eine Untersuchung diesbezüglich zum GeoSLAM ZEB Horizon ergab einen Fehler von 1 bis 3 Zentimeter bei einer Messdistanz von 10 Metern zum untersuchten Objekt (Chio, 2022).

Das Ziel dieses Beitrages ist, die Genauigkeit und das Potential zweier PLS-Systeme in einem industriellen Umfeld zu evaluieren. Hierfür werden die beiden handgehaltenen Laserscanner, der GeoSLAM ZEB Horizon

¹ Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut/, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland, (stefan.binapfl, ferdinand.maiwald)@tu-dresden.de

² Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland, robert.blaskow@tu-dresden.de

und der BLK2GO (siehe Abb. 1), in einer Maschinenhalle einerseits mit einer präziseren Referenz und andererseits untereinander verglichen. Die Komplexität der Halle, welche durch Maschinen verschiedenster Größen sowie engen Gängen entsteht, stellt für die beiden PLS-Systeme eine anspruchsvolle Umgebungsbedingung dar.

1.1 Verwandte Arbeiten

Bisherige Forschungsarbeiten im Bezug zu PLS-Systemen beinhalteten vor allem die Genauigkeitsanalyse und Anwendungsmöglichkeiten von handgehaltenen Laserscannern in Außenbereichen, Gebäudeflächen und Kulturerbe.

Chrbolková et al. (2025) untersuchten beispielsweise die Genauigkeit von TLS- und PLS-Systemen zur Innenraumkartierung. Dabei wurden zwei statische Laserscanner mit drei SLAM-Geräten in einer Umgebung mit langen Korridoren verglichen und hinsichtlich Genauigkeiten, systematischer Fehler sowie Rauscheigenschaften analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass TLS-Systeme weiterhin die höhere Genauigkeit liefern. SLAM-basierte Geräte erreichen zwar geringere, jedoch für viele Indoor-Anwendungen ausreichende Genauigkeiten und stellen aufgrund ihrer Flexibilität und Zeiteffizienz eine praktikable Alternative dar. Gharineiat et al. (2024) führten eine Untersuchung zweier SLAM-basierter mobiler Laserscanner durch, welche mit Messungen einer Totalstation sowie eines TLS verglichen wurden. Dabei evaluierten die Autoren die Genauigkeit des Leica BLK2GO und NavVis VLX in Outdoor- und Indoor-Umgebungen. Die Ergebnisse zeigen, dass in Innenräumen Genauigkeiten im mittleren Millimeterbereich erreichbar sind, während die Outdoor-Genauigkeit stärker variiert und typischerweise im unteren Zentimeterbereich liegt. Insgesamt kommen die Autoren zu dem Schluss, dass SLAM-Scanner durch ihre hohe Aufnahmegeschwindigkeit und Flexibilität gut für schnelle Bestandsaufnahmen und regelmäßige Dokumentationen geeignet sind, während für hochpräzise Vermessungsaufgaben weiterhin statische Verfahren wie TLS oder Totalstationen vorzuziehen sind. Blaskow & Eltner (2023) untersuchten die Eignung des GeoSLAM ZEB Horizon zur Vermessung kleiner urbaner Gewässer. Dabei wurde die Genauigkeit der erzeugten Punktwolken durch den Vergleich mit TLS-Messungen bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass das PLS-System in natürlichen Umgebungen Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreichen kann, wobei die Qualität von Faktoren wie der Komplexität der Umgebung, der Länge der Trajektorien sowie der Verteilung der Passpunkte beeinflusst wird.

Dennoch bestehen Limitierungen, insbesondere bei größeren Messdistanzen oder in dynamischen Umgebungen.

2 Methoden

Für die vorliegende Untersuchung wurden mit dem GeoSLAM ZEB Horizon und dem Leica BLK2GO (siehe Abb. 1) zwei SLAM-basierte handgehaltene mobile Laserscanner eingesetzt. Die technischen Eigenschaften beider PLS-Systeme sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Abbildung 1 GeoSLAM ZEB Horizon (l), Leica BLK2GO (r)

Tabelle 1 Eigenschaften der PLS-Systeme

Kriterium	ZEB Horizon	BLK2GO
Gewicht	1500 g	775 g
Max. Reichweite	100 m	25 m
Messrauschen	± 30 mm	± 3 mm
Scanlinien	16	2
SLAM-System	LiDAR-SLAM	LiDAR- und Visual-SLAM

Der wesentliche Unterschied beider Geräte liegt im SLAM-System. Der GeoSLAM ZEB Horizon basiert ausschließlich auf dem LiDAR-SLAM-Algorithmus. Dabei wird die relative Position im Raum durch Messungen des rotierenden Velodyne VLP-16 LiDAR-Sensors zu markanten Objekten in Kombination mit einer IMU bestimmt (GeoSLAM Ltd, 2020). Der Leica BLK2GO hingegen nutzt eine Fusion aus LiDAR- und Visual-SLAM mit einer IMU, wobei zusätzlich Bilddaten zur relativen Positionsbestimmung herangezogen werden. Durch die im System integrierten Kameras verfügt die Punktwolke des BLK2GO außerdem neben Intensitätswerten zusätzlich über RGB-Informationen, während der ZEB Horizon nur Intensitätswerte in den Punktwolken ausgibt (Leica Geosystems AG, 2019).

Um die beiden Geräte hinsichtlich des Potentials und der Genauigkeit miteinander vergleichen zu können, müssen die Scans im ersten Schritt in ein einheitliches Koordinatensystem überführt werden. Als optimale

Schnittstelle beider Systeme zeigten sich Passpunkte in Form von Schachbrettmustern. Dementsprechend wurden in der 1500 Quadratmeter großen Maschinenhalle des Nationalen Leichtbauvalidierungszentrums (LEIV), in der die Untersuchungen stattfanden, insgesamt 39 von diesen angebracht, wovon 16 an Wandflächen und 23 am Boden befestigt wurden. Die Passpunkte wurden zunächst mit der Totalstation Leica MS60 gemessen, wobei darauf geachtet wurde, dass zur ausreichenden Überbestimmung des Punktnetzes jeder Punkt von mindestens drei verschiedenen Standpunkten aufgenommen wurde. Dieses Netz an Passpunkten wurde anschließend unter Zwang mit 4 Festpunkten ausgeglichen. Als resultierendes Ergebnis lag eine durchschnittliche Standardabweichung der 3D-Koordinate von 0,6 Millimetern vor, sodass eine übergeordnete Genauigkeit erreicht und ein Vergleich beider PLS-Systeme ermöglicht wurde.

Im nächsten Schritt wurden mit einem RIEGL VZ-400i Referenzflächen zur Validierung der PLS-Systeme gescannt. Der TLS eignet sich aufgrund seiner höheren Präzision von 3 Millimetern und Genauigkeit von 5 Millimetern bei einer Distanz von 100 Metern als Referenzsystem für die beiden untersuchten handgehaltenen Laserscanner. Dementsprechend wurde jeweils eine strukturlose Referenzfläche in Form einer flachen Wand sowie eine strukturierte Referenzfläche, welche die Oberfläche einer Maschine darstellte, aufgenommen.

Anschließend wurde die gesamte Innenfläche der Maschinenhalle des LEIV mit dem GeoSLAM ZEB Horizon und dem Leica BLK2GO gescannt. Dabei wurde die Halle einerseits jeweils in einem Single-Route-Scan und andererseits in vier Teilscans vermessen. Die Scandauer des Single-Route-Scans betrug bei beiden PLS-Systemen jeweils etwa 18 Minuten. Die Dauer der vier Teilscans war sowohl beim ZEB Horizon als auch beim BLK2GO deutlich kürzer und lag je Teilscan bei circa 10 Minuten.

Bei allen Scans wurde darauf geachtet, dass mindestens sechs Passpunkte zur Georeferenzierung herangezogen wurden. Während der Leica BLK2GO diese im Postprocessing automatisch erkennt, erfolgt die Georeferenzierung beim GeoSLAM ZEB Horizon in ein lokales Koordinatensystem durch ein mindestens 10 Sekunden langes Verweilen auf einer Mindestanzahl von vier Passpunkten. Um eine fehlerhafte Georeferenzierung, beispielsweise durch kleinere Bewegungen während dieses Zeitraums, zu vermeiden, wurden bei jedem Scan mindestens zwei zusätzliche Passpunkte über die erforderliche Mindestanzahl an Passpunkten hinaus verwendet. Zudem wurde darauf geachtet, in den Scans

beider Geräte mehrere Schleifen in der Trajektorie zu durchlaufen, um einen Schleifenschluss zu ermöglichen und Fehlereinflüsse zu minimieren. Ein Schleifenschluss liegt vor, wenn das System erkennt, dass ein bereits erfasster Bereich erneut durchlaufen wurde, wodurch aufgelaufene Positionsfehler infolge von Drifteffekten identifiziert und durch eine Optimierung der Trajektorie reduziert werden können. Dabei werden korrespondierende Beobachtungen desselben Bereichs miteinander verknüpft, sodass inkonsistente Positionsschätzungen ausgeglichen und die Gesamtgenauigkeit der Punktwolke erhöht wird.

Bevor die Ergebnisse in Cloud Compare verglichen werden konnten, wurden alle Punktwolken der beiden untersuchten PLS-Systeme im ersten Schritt mit Hilfe der Segment-Funktion manuell zugeschnitten. Durch Spiegelungen an Glas und sehr glatten Oberflächen kam es vor allem an den Hallenrändern zu fehlerhaften Punktzuordnungen, sodass Punkte außerhalb der Halle lagen und händisch entfernt wurden. Danach wurden alle Punktwolken mit dem Statistical Outlier Removal (SOR)-Filter bereinigt. Die jeweils vier Punktwolken der Teilscans wurden im darauffolgenden Schritt mittels des Merging-Werkzeugs jeweils zu einem Multi-Route-Scan zusammengeführt, sodass pro Gerät nur noch zwei Ergebnisdateien vorlagen (Single-Route-Scan, Multi-Route-Scan). Die verbleibenden vier Punktwolken wurden im letzten Schritt der Vorbereitung durch die Downsampling-Funktion auf einen einheitlichen Punktabstand von 2 Zentimetern reduziert.

Die beiden Referenzflächen der TLS-Messung wurden jeweils zu einem Mesh modelliert, mit dem die Punktwolken der PLS-Systeme anhand eines Cloud-to-Mesh (C2M)-Vergleiches evaluiert werden konnten. Die PLS-Punktwolken wurden untereinander mithilfe von Cloud-to-Cloud (C2C)-Distanzen verglichen. Aufgrund der Komplexität und Größe der PLS-Punktwolken wurde bei diesen Vergleichen auf eine Mesh-Erzeugung verzichtet, sodass die Rechendauer in der Auswertung deutlich reduziert werden konnte. Als zugrunde liegendes lokales Modell wurde bei den C2C-Distanzen das least squares plane Modell herangezogen. Dabei wurden drei verschiedene C2C-Vergleiche durchgeführt:

- Multi-Route-Scan mit Multi-Route-Scan
- Single-Route-Scans mit Single-Route-Scan
- Single-Route-Scans mit den Multi-Route-Scans

Die ersten beiden Vergleiche sind geräteübergreifend und dienen dem Vergleich der beiden PLS-Systeme sowohl anhand von Single-Route-Scans als auch von Multi-Route-Scans. Der dritte Vergleich ist hingegen geräteintern und

untersucht einerseits den Einfluss der längeren Scandauer des Single-Route-Scans sowie andererseits den Einfluss der Aufteilung der Maschinenhalle in vier Teilscans.

3 Ergebnisse

3.1 Referenzflächenvergleiche

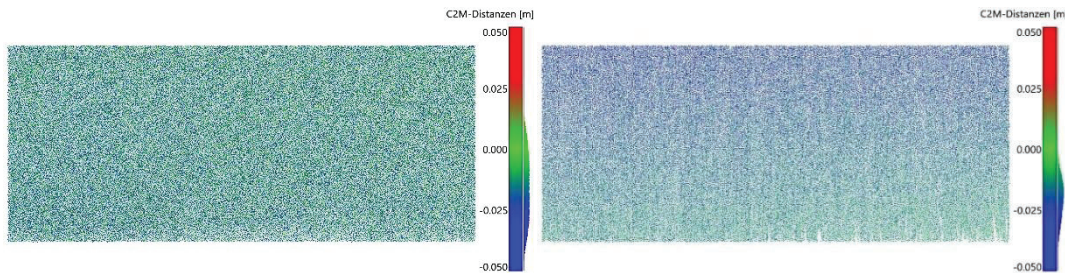


Abbildung 2 Vergleich der strukturlosen Referenzfläche mit den Single-Route-Scans: ZEB Horizon (l), BLK2GO (r)

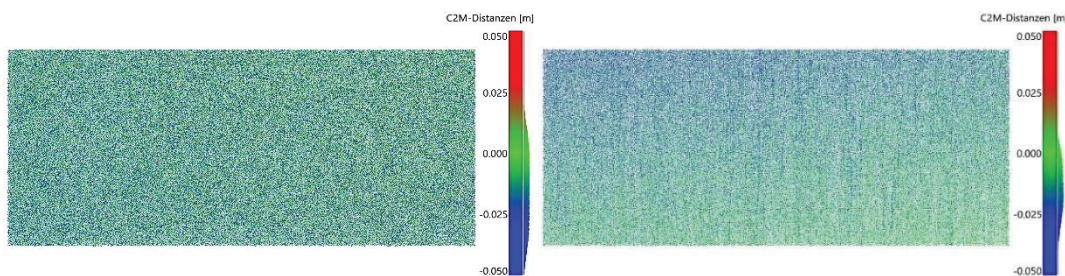


Abbildung 3 Vergleich der strukturlosen Referenzfläche mit den Multi-Route-Scans: ZEB Horizon (l), BLK2GO (r)

Bei den Punktwolkenvergleichen mit dem Mesh der strukturlosen Referenzfläche zeigen sich bei den Single-Route-Scans beider PLS-Systeme deutlich unterschiedliche Ergebnisse (siehe Abb. 2). Während beim GeoSLAM ZEB Horizon über die gesamte Wandfläche ein homogenes Rauschen vorliegt, fällt beim Leica BLK2GO eine deutliche Zunahme der Abweichungen mit zunehmender Höhe auf. Dies kann einerseits mit der immer größer werdenden Distanz sowie des immer steiler werdenden Auftreffwinkel der Laserstrahlen zusammenhängen. Des Weiteren zeigt der ZEB Horizon ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis als der BLK2GO. Zudem fällt anhand der durchschnittlichen Abweichungen der Punktwolken zur Referenzfläche aus Tabelle 2 auf, dass diese Werte jeweils im negativen Bereich liegen. Die Auswirkung dessen ist, dass die Punktwolken jeweils hinter der eigentlichen Referenzfläche liegen und die gemessenen Distanzen demnach zu lang sind. Der Grund hierfür kann ein Maßstabsfehler sein, der sich in einer ähnlichen Größenordnung auf beide Geräte auswirkt.

Bei den C2M-Vergleichen der Multi-Route-Scans mit der strukturlosen Referenzfläche zeigt sich ein ähnliches Bild (siehe Abb. 3). Auch bei diesen Punktwolken ist beim ZEB Horizon über die gesamte Fläche ein homogenes Rauschen zu erkennen, während beim BLK2GO erneut eine

höhenabhängige Abweichung vorliegt, welche allerdings im Vergleich zum Single-Route-Scan weniger stark ausgeprägt ist. Auch bei den Multi-Route-Scans sind die Distanzen jeweils zu lang, sodass die durchschnittlichen Abweichungen ebenfalls im negativen Bereich liegen.

Die durchschnittlichen Standardabweichungen sind beim GeoSLAM ZEB Horizon jeweils um 5 Millimeter größer als die des Leica BLK2GO. Diese Werte bestätigen das größere Messrauschen des ZEB Horizon, welches zusätzlich an den Histogrammen der Fehlerverteilungen in den Abbildungen dargestellt ist.

Tabelle 2 Ergebnisse des C2M-Vergleichs mit der strukturlosen Referenzfläche

Punktwolke	Ø Abw. [mm]	Std.abw. [mm]
Single-Route-Scan ZEB Horizon	-15	16
Single-Route-Scan BLK2GO	-15	11
Multi-Route-Scan ZEB Horizon	-16	14
Multi-Route-Scan BLK2GO	-20	9

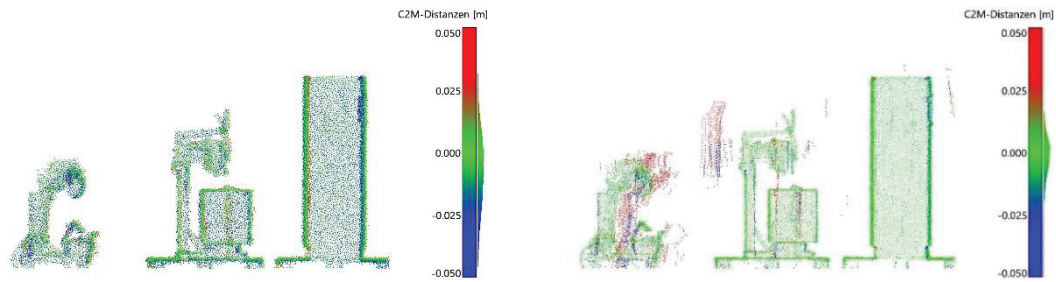


Abbildung 4 Vergleich der strukturierten Referenzfläche mit den Single-Route-Scans: ZEB Horizon (l), BLK2GO (r)

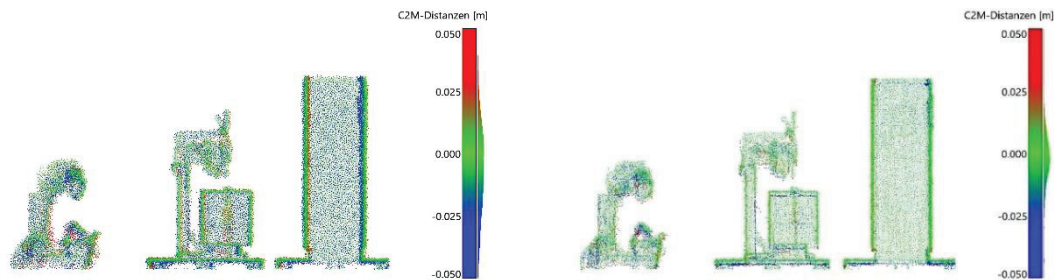


Abbildung 5 Vergleich der strukturierten Referenzfläche mit den Multi-Route-Scans: ZEB Horizon (l), BLK2GO (r)

Bei den C2M-Vergleichen der Single-Route-Scans mit der strukturierten Referenzfläche sind erneut deutliche Unterschiede zwischen dem ZEB Horizon und dem BLK2GO erkennbar (siehe Abb. 4). Wie bereits beim C2M-Vergleich mit der strukturlosen Referenzfläche zeigt sich beim ZEB Horizon ein stärkeres Messrauschen. Dies lässt sich insbesondere an den Wänden der rechten Maschine, an feineren Strukturen der linken Maschine sowie im Histogramm neben der Farbskala deutlich erkennen. Im Vergleich dazu weist der BLK2GO bei Betrachtung des Histogramms ein deutlich geringeres Rauschniveau auf. Allerdings treten in der Punktwolke im Bereich der strukturierten Referenzfläche fehlerhafte vertikale Linien auf, die möglicherweise durch Verspiegelungen verursacht wurden. Die mittlere und rechte Maschine wird insgesamt jedoch präziser abgebildet als beim ZEB Horizon.

Beim Referenzflächenvergleich der beiden Multi-Route-Scans (siehe Abb. 5) ist beim ZEB Horizon im Vergleich zum Single-Route-Scan kaum eine Verbesserung festzustellen. Auch hier zeigt sich ein erhöhtes Messrauschen, insbesondere in Bereichen mit feinen Strukturen. Im Vergleich zum BLK2GO erscheinen die Wände der rechten Maschinen erneut deutlich verbreitert. Beim BLK2GO sind im Multi-Route-Scan hingegen keine fehlerhaften vertikalen Linien mehr erkennbar, sodass erhöhte Abweichungen lediglich in fein strukturierten Bereichen auftreten.

In Tabelle 3 sind die durchschnittlichen Abweichungen sowie die Standardabweichungen zur strukturierten Referenzfläche dargestellt. Die Abweichungen der Single-Route-Scans sind dabei jedoch nur eingeschränkt interpretierbar. Aufgrund der fehlerhaften vertikalen Linien beim BLK2GO liegt dessen Standardabweichung mit 66 Millimetern deutlich über der des ZEB Horizon mit 18 Millimetern. Aussagekräftiger sind daher die Ergebnisse der Multi-Route-Scans. Hier zeigt sich, in Übereinstimmung mit der visuellen Darstellung, dass der BLK2GO sowohl hinsichtlich der Genauigkeit als auch der Präzision im Vergleich zum ZEB Horizon die besseren Ergebnisse darstellt.

Tabelle 3 Ergebnisse des C2M-Vergleichs mit der strukturierten Referenzfläche

Punktwolke	Ø Abw. [mm]	Std.abw. [mm]
Single-Route-Scan ZEB Horizon	-8	22
Single-Route-Scan BLK2GO	-5	18
Multi-Route-Scan ZEB Horizon	-8	18
Multi-Route-Scan BLK2GO	8	66

3.2 PLS-Punktwolkenvergleiche

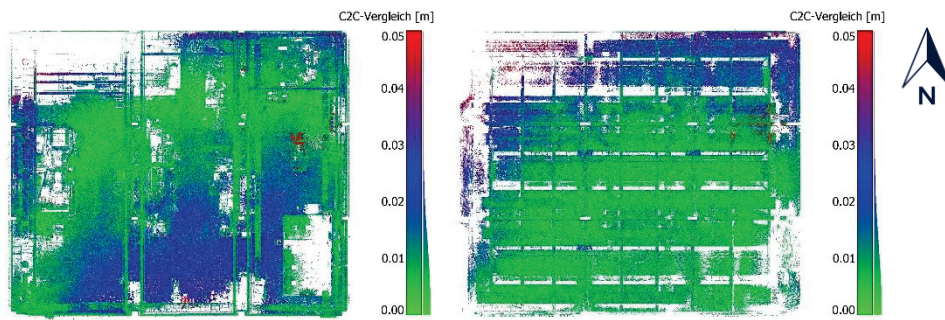


Abbildung 6 ZEB Horizon Single-Route-Scan vs. BLK2GO Single-Route-Scan; Hallenfläche (l), Dachfläche (r)

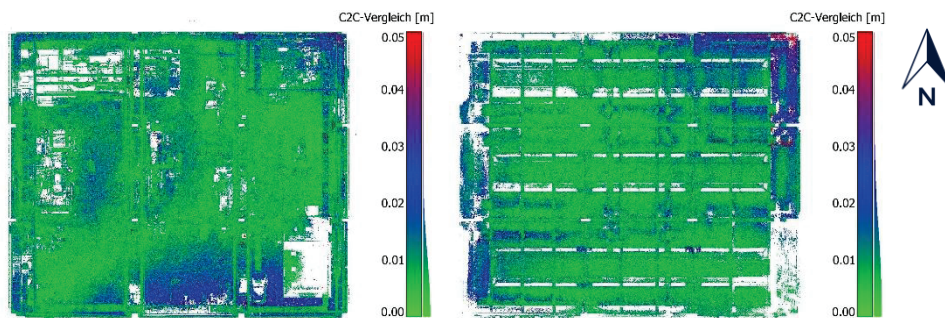


Abbildung 7 ZEB Horizon Multi-Route-Scan vs. BLK2GO Multi-Route-Scan; Hallenfläche (l), Dachfläche (r)

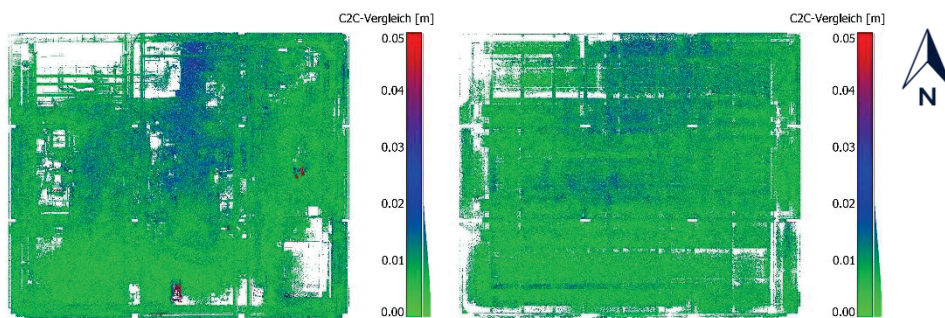


Abbildung 8 ZEB Horizon Single-Route-Scan vs. ZEB Horizon Multi-Route-Scan; Hallenfläche (l), Dachfläche (r)

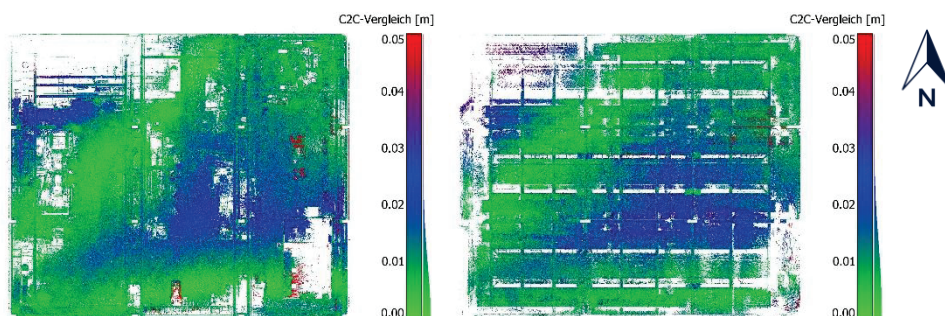


Abbildung 9 BLK2GO Single-Route-Scan vs. BLK2GO Multi-Route-Scan; Hallenfläche (l), Dachfläche (r)

Bei den Vergleichen der PLS-Punktwolken untereinander ist festzustellen, dass bei der geräteübergreifenden Gegenüberstellung der beiden Single-Route-Scans (siehe Abb. 6) im mittleren Bereich der Hallenfläche die höchste Übereinstimmung vorliegt. Dieser Effekt kann damit zusammenhängen, dass in diesen Bereichen mehrere Schleifen gelaufen wurden als beispielsweise im südlichen Teil der Halle, welcher erhöhte C2C-Distanzen aufweist. Im östlichen Bereich der Hallenfläche hingegen treten die größten Abweichungen auf. Diese liegen im Bereich der strukturierten Referenzfläche und sind vermutlich auf die fehlerhaften vertikalen Linien, welche bereits beim Referenzflächenvergleich auftraten (siehe Abb. 4), zurückzuführen. Im Dachbereich zeigen sich die größten Differenzen zwischen beiden PLS-Systemen insbesondere an den Randbereichen. Der Grund hierfür kann die größere Messdistanz zwischen PLS und Objekt sein, die sich negativ auf die Genauigkeit auswirkt. Insgesamt sind die Abweichungen der Punktwolken jedoch gering, sodass die mittlere Abweichung der C2C-Distanzen im Bereich der Hallenfläche 11 Millimeter und im Dachbereich 12 Millimeter beträgt.

Ein vergleichbares Muster zeigt sich beim C2C-Vergleich der beiden Multi-Route-Scans des ZEB Horizon und des BLK2GO (siehe Abb. 7). Auch hier weist der mittlere Bereich der Hallenfläche die größte Übereinstimmung auf, während an den Hallenrändern leichte Erhöhungen der Abweichungen festzustellen sind. Wie bereits beim ersten C2C-Vergleich kann dieser Effekt durch das Laufen von Schleifen im mittleren Hallenbereich zusammenhängen. Im Dachbereich treten die größten Differenzen insbesondere am nordöstlichen Rand auf. Analog zum vorherigen Vergleich der Single-Route-Scans sind die Unterschiede zwischen den beiden PLS-Systemen erneut insgesamt gering. Die durchschnittliche Abweichung der C2C-Distanzen beträgt dabei 10 Millimeter für die Hallenfläche und 13 Millimeter für die Dachfläche.

Bei der geräteinternen Gegenüberstellung des Single-Route-Scans mit dem Multi-Route-Scan des ZEB Horizon zeigen sich insgesamt gute Übereinstimmungen (siehe Abb. 8). Im Hallenbereich sind im südlichen sowie im östlichen Teil der Halle zwei lokale Maxima der Abweichungen erkennbar, die darauf zurückzuführen sind, dass die entsprechenden Objekte zwischen den beiden Aufnahmen bewegt wurden. Abgesehen davon sind weder in der Hallen- noch in der Dachfläche weitere signifikante Abweichungen festzustellen. Die mittlere Abweichung der C2C-Distanzen ist dementsprechend gering und beträgt 9 Millimeter beziehungsweise 8 Millimeter.

Ein geringfügig schlechteres Ergebnis ergibt sich beim entsprechenden Vergleich des BLK2GO (siehe Abb. 9). Auch dieser C2C-Vergleich ist von der Verschiebung der beiden Objekte betroffen, sodass auch an diesen Stellen in den beiden Punktwolken Abweichungen entstehen. Allerdings zeigen sich im Vergleich zum ZEB Horizon zusätzlich im östlichen Bereich der Hallenfläche weitere Abweichungsmaxima, die möglicherweise durch Verspiegelungen hervorgerufen wurden. Zudem sind im östlichen Dachbereich die größten Unterschiede beider Punktwolken festzustellen. Insgesamt weist dieser geräteinterne Punktwolkenvergleich höhere Abweichungen auf, sodass die mittleren C2C-Distanzen 10 beziehungsweise 11 Millimeter betragen.

Zur Einordnung und besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind in Tabelle 4 die prozentualen Anteile der Punkte dargestellt, die im C2C-Vergleich eine Abweichung von weniger als 30 Millimeter aufweisen.

Tabelle 4 Prozentualer Anteil der Punkte mit C2C-Distanzen unter 30 Millimeter

Punktwolkenvergleich	≤ ± 30 mm Hallenfläche	≤ ± 30 mm Dachfläche
Single-Route-Scan zu Single-Route-Scan	97%	95%
Multi-Route-Scan zu Multi-Route-Scan	98%	93%
ZEB Horizon: Single-Route-Scan zu Multi-Route-Scan	99%	99,8%
BLK2GO: Single-Route-Scan zu Multi-Route-Scan	98%	98%

Die beiden geräteübergreifenden Vergleiche weisen jeweils ein ähnliches Muster auf. In der Hallenfläche liegt der Anteil der Punkte mit einer Abweichung von weniger als 30 Millimetern mit 97% beziehungsweise 98% höher als im Dachbereich, in dem 93% beziehungsweise 95% der Punkte unterhalb dieses Schwellenwertes liegen. Eine mögliche Ursache hierfür stellt die größere Distanz zwischen PLS und Objekt dar, die sich unterschiedlich auf die beiden Systeme auswirken kann.

Bei den geräteinternen Vergleichen zeigen sich sowohl im Hallen- als auch im Dachbereich bessere Ergebnisse. Beim ZEB Horizon liegen 99% der Punkte in der Hallenfläche und 99,8% der Punkte in der Dachfläche unterhalb einer Abweichung von 30 Millimetern. Der niedrigere Anteil im Hallenbereich kann erneut auf die

Verschiebung der beiden Objekte zurückgeführt werden, die sich ausschließlich im bodennahen Bereich auswirkt.

Wie bereits aus dem visuellen Vergleich hervorgeht, weist der BLK2GO mit jeweils 98% im Vergleich zum ZEB Horizon einen geringeren Anteil an Punkten mit einer C2C-Abweichung von unter 30 Millimetern auf.

Insgesamt verdeutlicht diese prozentuale Darstellung der Fehlerverteilung, dass die Unterschiede zwischen den Single-Route-Scans und den Multi-Route-Scans bei beiden PLS-Systemen nur gering ausfallen. Dies zeigt sich darin, dass jeweils mindestens 98% der C2C-Distanzen unterhalb von 30 Millimetern liegen.

4 Fazit

In diesem Beitrag wurden die beiden handgehaltenen Laserscanner GeoSLAM ZEB Horizon und Leica BLK2GO in einer komplexen Maschinenhalle hinsichtlich der Genauigkeit und des Anwendungspotenzials verglichen. Dabei zeigte sich bei beiden PLS-Systemen durch Referenzflächenvergleiche mit einer TLS-Messung ein vergleichbares Genauigkeitspotenzial im unteren Zentimeterbereich. Die Messungen des ZEB Horizon wiesen hierbei jedoch ein höheres Messrauschen auf als die des BLK2GO.

Darüber hinaus ergab die Auswertung der Scans, dass die RGB-Informationen in den Punktwolken des BLK2GO einen wichtigen Beitrag für die Modellierung und die anschließende Weiterverarbeitung leisten können.

Die geräteinternen Vergleiche, bei denen Single-Route-Scans mit Multi-Route-Scans verglichen wurden, zeigten keine signifikanten Abweichungen. Dementsprechend ist eine Zerlegung der Halle in einzelne Teilscans nicht erforderlich. Auf dieser Basis ist es möglich, eine Maschinenhalle dieser Größenordnung und Komplexität innerhalb von 20 Minuten zu erfassen und dennoch eine Zentimetergenauigkeit zu erreichen.

Abschließend konnte in diesem Beitrag gezeigt werden, dass sich beide PLS-Systeme für die 3D-Erfassung industrieller Umgebungen eignen, sofern eine Genauigkeit im unteren Zentimeterbereich ausreichend ist.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Danilo Schneider von der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden für die Bereitstellung des Leica BLK2GO.

Darüber hinaus danken wir dem LEIV sowie Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude für die Bereitstellung der Maschinenhalle als Testumgebung.

Literaturverzeichnis

- Blaskow, R., & Eltner, A. (2023). Investigation of the suitability of a personal laser scanning device for the monitoring of small water bodies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1/W1-2023, 45–50. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-45-2023>
- Chio, S.-H. (2022). An Investigation on a Plane-Based Dynamic Calibration Method for the Handheld LiDAR Scanner. *Sensors*, 22(1), 369. <https://doi.org/10.3390/s22010369>
- Chrbolková, A., Štroner, M., Urban, R., Michal, O., Křemen, T., & Braun, J. (2025). A Comparative Study of Indoor Accuracies Between SLAM and Static Scanners. *Applied Sciences*, 15(14), 8053. <https://doi.org/10.3390/app15148053>
- Conti, A., Pagliaricci, G., Bonora, V., & Tucci, G. (2024). A comparison between terrestrial laser scanning and hand-held mobile mapping for the documentation of built heritage. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W4-2024, 141–147. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-141-2024>
- Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R. (2021). Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387–2429. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1964617>
- GeoSLAM Ltd. (2020). Zeb-Horizon User Manual.
- Gharineiat, Z., Tarsha Kurdi, F., Henny, K., Gray, H., Jamieson, A., & Reeves, N. (2024). Assessment of NavVis VLX and BLK2GO SLAM Scanner Accuracy for Outdoor and Indoor Surveying Tasks. *Remote Sensing*, 16(17), 3256. <https://doi.org/10.3390/rs16173256>
- Leica Geosystems AG. (2019). Leica BLK2GO.
- Martienßen, T. (Hrsg.). (2019). Punktwolken von Handscannern und ihr Potenzial. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH. Geokinematischer Tag.

Integration statischer und kinematischer TLS-Daten: Evaluierung des *RIEGL VZ-600i*

Nikolaus Studnicka¹ & Florian Pöpl²

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren hat sich die terrestrische Laserscanning (TLS)-Technologie erheblich weiterentwickelt. Moderne TLS-Laserscanner bieten höhere Messgeschwindigkeiten, gesteigerte Präzision und kompakte Bauformen, sodass heute Scanzeiten von etwa einer Minute pro Scanposition auch über einen ganzen Tag realisierbar sind. Parallel dazu wächst der Bedarf an Verfahren, die sowohl statische als auch kinematische Datenerfassungsmodi effizient unterstützen. Während im Mobile Mapping traditionell einachsige Profils Scanner dominieren, eröffnet die kinematische Nutzung zweiachsiger terrestrischer Laserscanner neue Potenziale hinsichtlich Datenqualität, geometrischer Vollständigkeit und operativer Flexibilität.

Dieser Beitrag untersucht das Leistungsvermögen des *RIEGL VZ-600i* im statischen und kinematischen Einsatz unter Verwendung von RTK-GNSS-Informationen und adressiert damit praxistaugliche Outdoor-Szenarien. Im statischen Modus werden retro-reflektierende Zielmarken hochauflösend erfasst, die zuvor mittels Totalstation bestimmt wurden. Diese Festpunkte werden mit hoher Gewichtung in die Blockausgleichung der Scanpositionen in der Software RiSCAN PRO integriert. Die kinematischen Punktwolken werden zunächst auf Basis der GNSS-Trajektorie berechnet und anschließend durch Laserscandaten weiter verfeinert.

Die resultierende Genauigkeit der kinematischen Punktwolken liegt initial im Bereich der RTK-GNSS-Genauigkeit (≈ 2 cm) und wird durch einen ebenenflächenbasierten Ausgleichsprozess an die millimetergenaue statische Punktwolke angepasst. Somit kann die Trajektorie gezielt nachoptimiert und eine hochgenaue Fusion beider Datensätze erreicht werden. Die Ergebnisse demonstrieren das Potenzial dieses integrierten Ansatzes für hochpräzise geodätische Anwendungen und mobile Erfassungsszenarien.

Schlagwörter Laserscanning · Mobile Mapping · Punktwolken · VZ-600i · kinematische Erfassung

1 Einführung

Terrestrisches Laserscanning hat sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten zu einer etablierten Methode zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten und Umgebungen entwickelt. Die Technologie ermöglicht die schnelle Aufnahme großer Datenmengen und liefert hochauflösende Punktwolken, die für vielfältige Anwendungen in Vermessung, Bauwesen und Geoinformationswissenschaften genutzt werden können.

Der klassische Einsatz terrestrischer Laserscanner erfolgt in einer statischen Konfiguration. Dabei wird der Scanner auf einem Stativ positioniert und führt von mehreren Scanpositionen aus sogenannte Panoramascans durch. Die einzelnen Scans werden anschließend registriert und zu einer gemeinsamen Punktwolke zusammengeführt.

Neben diesen statischen Verfahren gewinnen mobile beziehungsweise kinematische Erfassungsmethoden zunehmend an Bedeutung. Hierbei erfolgt die Datenerfassung während der Bewegung des Laserscanners, beispielsweise auf einem Rucksacksystem getragen oder auf der Dachmontage auf einem Auto. Dadurch lassen sich große Bereiche deutlich schneller erfassen.

Der terrestrische Laserscanner *RIEGL VZ-600i* stellt ein leistungsfähiges Messsystem dar, das sich sowohl für hochauflösende statische Scans als auch für mobile Anwendungen eignet. Ziel dieses Beitrags ist es, zunächst die grundlegenden Eigenschaften des Systems sowie den typischen Ablauf eines Laserscanprojekts zu beschreiben. Anschließend wird die Kombination statischer und kinematischer Scans diskutiert.

¹ *RIEGL* Laser Measurement Systems GmbH / Riedenburgstr.48, 3580 Horn, Österreich, E-Mail: nstudnicka@riegl.com

² *RIEGL* Laser Measurement Systems GmbH / Riedenburgstr.48, 3580 Horn, Österreich, E-Mail: fpoeppl@riegl.com

2 Terrestrisches Laserscanning mit dem RIEGL VZ-600i

2.1 Funktionsprinzip des terrestrischen Laserscannings

Ein terrestrischer Laserscanner, der nach dem Impuls-Laufzeit-Prinzip arbeitet, erfasst dreidimensionale Informationen der Umgebung durch das Aussenden von infraroten Laserimpulsen und die Messung ihrer Reflexion an Oberflächen. Aus der Laufzeit der Laserimpulse wird die Entfernung zwischen Scanner und Objekt bestimmt. Zusammen mit den Winkelinformationen der Scannermechanik können daraus präzise dreidimensionale Koordinaten berechnet werden.

Die gemessenen Punkte bilden eine sogenannte Punktwolke, die die geometrische Struktur der erfassten Umgebung digital beschreibt. Punktwolken können anschließend zur Erstellung von dreidimensionalen Modellen, zur geometrischen Analyse oder zur Dokumentation von Bauwerken verwendet werden.

Bei der klassischen terrestrischen Aufnahme wird der Scanner auf einem Stativ installiert und führt einen Panoramascan nach dem anderen aus. Die Scanpositionen werden anschließend zueinander registriert.

2.2 Der Laserscanner RIEGL VZ-600i

Der terrestrische Laserscanner RIEGL VZ-600i (RIEGL 2026) ist ein Laserscanner, der nach dem Impuls-Laufzeitverfahren arbeitet. Er dient zur schnellen und hochauflösenden dreidimensionalen Erfassung von Umgebungen. Das System erreicht Pulsrepetitionraten von bis zu 2,2 MHz sowie Scangeschwindigkeiten von bis zu 420 Scanlinien pro Sekunde.

Dadurch können bis zu etwa 60 Scanpositionen pro Stunde aufgenommen werden (inklusive Umstellen des Dreibeinstativs und Fotoaufnahme). Die Punktauflösung beträgt für das „Panorama_6mm“-Standardscanmuster etwa 6 mm in einer Entfernung von 10 m. Die geometrische 3D-Genauigkeit liegt im Bereich von etwa 3 mm bei einer Distanz von 50 m.

Der Scanner überstreicht bei einem Panoramascan einen horizontalen Scanwinkel von 360° sowie einen vertikalen Scanwinkel von 105°. Die maximale Reichweite beträgt bei einer Scanrate von 2,2 MHz, je nach Reflexionsgrad der Oberfläche bis zu über 200 m. Mit der Reduktion der Pulswiederholrate auf 140 kHz lassen sich Messentfernungen bis zu einem Kilometer erreichen.

Ein wesentliches Merkmal des Systems ist die robuste und automatische Registrierung (Ullrich 2017) der Scanpositionen während der Datenerfassung. Sie ist weder von der Belichtung der Umgebung, noch vom Vorhandensein von Gebäuden abhängig. Dadurch kann die Registrierung der Scanpositionen zuverlässig und schnell im Feld erfolgen, was die Effizienz des gesamten „Workflows“ deutlich erhöht.

3 Typischer Ablauf eines Scanprojekts

3.1 Datenerfassung

Bei der Aufnahme eines Scanprojekts werden mehrere Scanpositionen im Untersuchungsgebiet verteilt. Der Scanner wird an jedem Standort aufgestellt und führt einen vollständigen Panoramascan der Umgebung aus.

Um eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebiets zu gewährleisten, werden die Scanpositionen so gewählt, dass sich die Punktwolken benachbarter Scans ausreichend überlappen. Typischerweise werden Scanabstände von etwa zehn Metern gewählt.

Während der Datenerfassung kann der Fortschritt des Scanprojekts bereits in Echtzeit auf mobilen Geräten überwacht werden. Dadurch lässt sich unmittelbar überprüfen, ob alle relevanten Bereiche erfasst wurden.

3.2 Registrierung und Georeferenzierung

Zur Georeferenzierung der Scans werden häufig retroreflektierende Zielmarken im Untersuchungsgebiet angebracht oder mittels Ministativ über bekannten Bodenpunkten aufgestellt. Diese Passpunkte werden sowohl mit dem Laserscanner als auch mit geodätischen Instrumenten, beispielsweise einer Totalstation, vermessen.

Die einzelnen Scans werden anschließend in einer Blockausgleichung (dem sogenannten „Multi-Station Adjustment 2“, MSA2) in der Software RiSCAN PRO ausgeglichen. Dabei werden die relativen Positionen der Scanstandpunkte optimiert und verbleibende Restfehler minimiert.

Das Ergebnis ist eine konsistente und georeferenzierte Punktwolke, die die Geometrie der erfassten Umgebung detailliert abbildet. Ein ausführlicher MSA2-Bericht gibt über die erzielte Qualität des Blockausgleichs Auskunft (Restklaffungen zu den Passpunkten). Diese liegen üblicherweise im Bereich von wenigen Millimeter. Der Blockausgleich funktioniert grundsätzlich auch ohne Festpunkte, in diesem Fall fehlt aber die Möglichkeit der Beurteilung der Georeferenzierungsqualität anhand der

Restklaffungen zu den Zielmarken. Die Genauigkeit hängt dann primär von der Güte der GNSS-Positionierung ab. Beim VZ-600i wird empfohlen mit RTK-GNSS zu arbeiten, wodurch unter guten Bedingungen eine Positionierungsgenauigkeit von bis zu 2 cm erreicht werden kann.

4 Beispiel eines Scanprojekts

Ein Beispiel für den praktischen Einsatz terrestrischen Laserscannings ist die Vermessung des deutschen Bahnhofs Steinach (b. Rothenburg o.d. Tauber).

In einem entsprechenden Projekt wurde am 16. September 2025 eine Fläche von etwa 20.000 m² mit insgesamt 653 Scanpositionen erfasst. Die Datenerfassung konnte innerhalb von etwa 11,5 Stunden von einer Person durchgeführt werden.

Die einzelnen Scans wurden bereits im Scanner registriert und in RiSCAN PRO zu einer homogenen Punktwolke zusammengeführt. Sie bildet die Oberfläche des Bodens und der Umgebung detailliert ab und kann als Grundlage für die weiterführende Erstellung eines Lage-Höhenplans genutzt werden.

5 Kombination statischer und kinematischer Scans

Die beschriebenen Verfahren basieren auf klassischen statischen Scanpositionen. Diese liefern hochauflösende und geometrisch in sich stabile Punktwolken, die Datenerfassung ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen Zeitaufwand verbunden. Mobile beziehungsweise kinematische Laserscan-Systeme ermöglichen dagegen eine kontinuierliche Datenerfassung während der Bewegung des Sensors. Dadurch können große Bereiche deutlich schneller erfasst beziehungsweise Datenlücken und Scanschatten (beispielsweise zwischen parkenden Autos) gefüllt werden.

Allerdings ist die Genauigkeit kinematischer Punktwolken grundsätzlich durch die Qualität der Trajektorienbestimmung limitiert, da die Punktwolken-genauigkeit über die Georeferenzierung direkt von der Genauigkeit der Trajektorie abhängt. Aus diesem Grund weisen mobile Punktwolken häufig eine geringere geometrische Stabilität auf als statische Scans. Die absolute Genauigkeit ist dabei bei Verwendung von GNSS in erster Linie durch die GNSS-Positionsgenauigkeit bestimmt.

Eine vielversprechende Strategie besteht daher darin, statische und kinematische Scans zu kombinieren. Während statische Scanpositionen eine hohe geometrische Genauigkeit und stabile Referenzpunkte liefern, ermög-

lichen kinematische Messungen eine schnelle flächen-deckende Datenerfassung mit reduzierter Abschattung. Durch die Zusammenführung beider Datensätze kann eine effiziente Datenerfassung mit einer hohen geometrischen Qualität der resultierenden Punktwolke erreicht werden.

Das erfordert aber entsprechende Georeferenzierungsmethoden mit denen die Konsistenz zwischen statischer und kinematischer Punktwolke sichergestellt werden kann. Methoden zur Punktwolkenregistrierung (Cheng, 2018) beruhen großteils auf einer starren Transformation zwischen den einzelnen „fertigen“ Punktwolken der verschiedenen Datenquellen.

Die hier vorgestellte Methode dagegen ist eine Registrierung des kinematischen Datensatzes *auf* den kinematischen Datensatz, wobei das Verfahren keine rein rigide Transformation des Einen auf das Andere ist, sondern eine Integration der statischen Referenzdaten in eine ganzheitliche Trajektorien-schätzung zur Georeferenzierung der kinematischen Daten. Den Grundstein bildet der Blockausgleich der statischen Scanpositionen (in diesem Fall MSA2) unter Berücksichtigung von eingemessenen Zielmarken als Passpunkte. Durch entsprechende geometrische Verteilung von Scanpositionen und Passpunkten kann dadurch in der Regel eine millimetergenaue Georeferenzierung in Bezug auf das durch die Passpunkte realisierte Koordinatensystem erreicht werden. Die resultierende statische Punktwolke wird dann als *Referenz* für die Georeferenzierung der kinematischen Daten herangezogen.

Das wird erreicht, indem ebene Flächenstücke aus der statischen sowie aus der kinematischen Punktwolke extrahiert werden. Eine einzelne Ebenenbeobachtung aggregiert eine gewisse Anzahl an Messpunkten und wird durch einen Schwerpunkt und einen Normalvektor beschrieben. Ebenenbeobachtungen aus der kinematischen Punktwolke, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden und dieselbe physische Ebene beschreiben, werden miteinander verknüpft. Diese Verknüpfungen fließen in eine ganzheitliche Ausgleichsrechnung (Pöpl, 2023) zusammen mit GNSS-Positionen und Messungen der inertialen Messeinheit (IMU). Für jede zusammengehörende Gruppe an Ebenenbeobachtungen werden innerhalb der Ausgleichsrechnungen drei Parameter mitgeschätzt (ein Versatz entlang der Normalen, zwei Kippwinkel). Insgesamt werden im Ausgleich also die Position und Orientierung des VZ-600i, die zeitabhängigen Fehler der internen inertialen Messeinheit, sowie die Ebenenparameter ermittelt (Pöpl, 2024).

Eine Besonderheit im hier vorgeschlagenen Ansatz ist dabei die Verknüpfung mit Ebenen aus der statischen Punktwolke. Die statische Punktwolke wurde bereits mittels Blockausgleich zueinander und ggf. in Bezug auf eingemessene Zielmarken ausgeglichen und kann daher für den Zweck der Registrierung der kinematischen Daten als Referenz angenommen werden. Für Ebenenbeobachtungen, welche mit statischen Ebenen verknüpft sind, werden also keine Parameter im Ausgleich geschätzt, wodurch diese Ebenen im Ausgleich eine absolute Referenz bilden.

In diesem Ansatz wird also nicht die kinematische Punktwolke auf die statische, rigide Punktwolke transformiert, sondern die statischen Daten wirken als zusätzliche Referenzbeobachtungen stützend in der Ausgleichsrechnung. Dadurch wird die Redundanz erhöht und u.a. eine zuverlässigere Schätzung der zeitabhängigen IMU-Fehler gewährleistet. Insgesamt wird mit diesem Ansatz eine höhere Konsistenz zwischen statischer und kinematischer Punktwolke aber auch eine präzisere kinematische Punktwolke an sich erreicht.

6 Ergebnisse

Bereits im Feld werden die Scanpositionen zueinander registriert. Dies kann am Bildschirm des *RIEGL VZ-600i* jederzeit kontrolliert werden, wie man in Abbildung 1 sieht.



Abbildung 1: *RIEGL VZ-600i* Laserscanner mit den bereits automatisch registrierten Scanpositionen

Der Bahnhofsbereich wurde sowohl statisch, als auch kinematisch mit dem Laserscanner vermessen (siehe Abbildung 2). Im statischen Modus war er auf einem

Dreibeinstativ (Abbildung 3 links) und kinematisch auf einem Rucksack montiert, wie in Abbildung 3 rechts zu sehen.



Abbildung 2: Punktwolke Bahnhof Steinach, eingefärbt nach „Reflectance“ (mit „Point Shading“-Visualisierung).



Abbildung 3 Der Laserscanner im statischen (links) und im kinematischen (rechts) Einsatz

Abbildung 4 zeigt die Normalabstände zwischen der statischen und der kinematischen Punktwolke nach der separaten Auswertung beider Datensätze, also ohne Ko-Registrierung. Die Genauigkeit des kinematischen Datensatzes liegt durch Verwendung von RTK-GNSS bei ca. 2-3 cm, was sich auch in der Differenz zur statischen Punktwolke widerspiegelt.

Durch die Ko-Registrierung der kinematischen Scandaten auf die statischen Scandaten, also durch Einbeziehen der entsprechenden Ebenenbeobachtungen im Ausgleich, kann die Abweichung der Datensätze zueinander drastisch reduziert werden. Abbildung 5 zeigt die Normalabstände

zwischen den beiden Datensätzen nach Registrierung der kinematischen Daten auf die statischen Daten. Im Vergleich zu ursprünglich 2-3 Zentimeter Differenz zwischen den Daten beträgt die Restklaffung nur mehr wenige Millimeter.

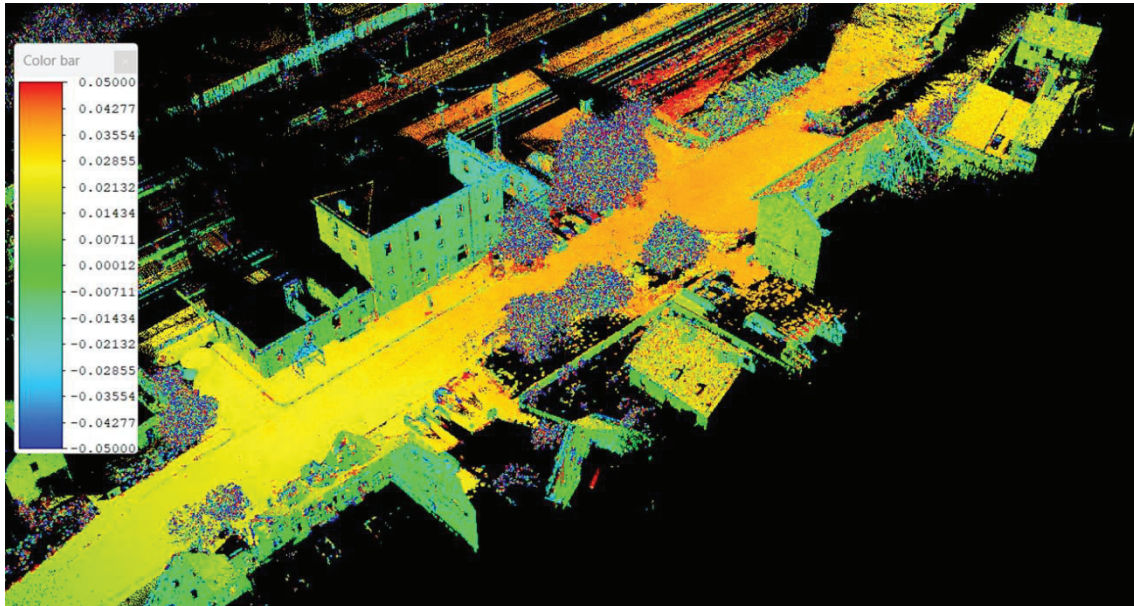


Abbildung 4: Kinematische Punktwolke eingefärbt nach der Abweichung der kinematischen Scans zu den statisch aufgenommenen Scans, ohne Ko-Registrierung.

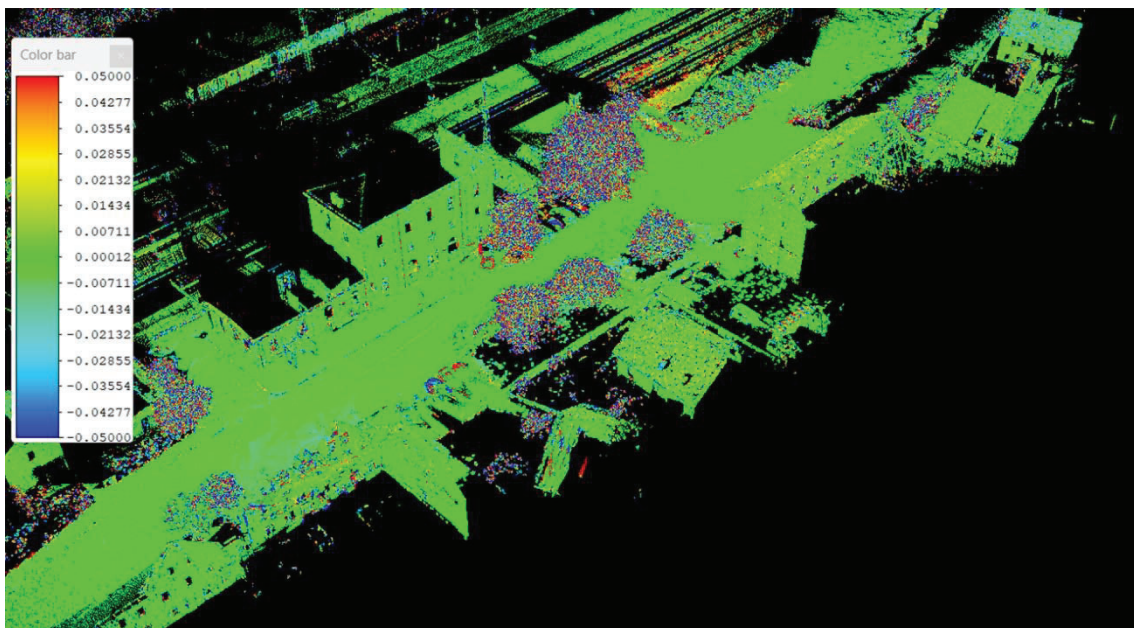


Abbildung 5: Kinematische Punktwolke eingefärbt nach der Abweichung der kinematischen Scans zu den statisch aufgenommenen Scans, mit Ko-Registrierung. Nach der Ausgleichung betragen die Abweichungen wenige Millimeter.

7 Fazit und Ausblick

Der terrestrische Laserscanner *RIEGL VZ-600i* ermöglicht eine schnelle und hochauflösende dreidimensionale Erfassung komplexer Umgebungen. Klassische statische Scanverfahren liefern dabei eine hohe geometrische Genauigkeit, während kinematische Systeme eine besonders effiziente Datenerfassung ermöglichen.

Die Kombination beider Methoden stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Vorteile beider Verfahren zu nutzen. Zukünftige Arbeiten werden sich daher mit der detaillierten Integration statischer und kinematischer Datensätze sowie mit der Bewertung der erreichbaren Genauigkeit befassen.

Literaturverzeichnis

- Ullrich, A. & Fürst, Ch. (2017). Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. Beiträge zum 165. DVW-Seminar 11./12. Dezember 2017 in Fulda.
- Cheng, L., Chen, S., Liu, X., Xu, H., Wu, Y., Li, M. & Chen, Y. (2018). Registration of Laser Scanning Point Clouds: A Review. In: *Sensors* 18.5, p. 1641, <https://doi.org/10.3390/s18051641>
- Pöpl F., Pfennigbauer M., Ullrich A. & Pfeifer, N. (2023) Trajectory Estimation with GNSS, IMU, and LiDAR for Terrestrial/Kinematic Laser Scanning, *Laser Radar Technology and Applications XXVIII*, <https://doi.org/10.1117/12.2663454>
- Pöpl, F., Ullrich, A., Mandlbürger, G. & Pfeifer, N. (2024). A Flexible Trajectory Estimation Methodology for Kinematic Laser Scanning. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 215, pp. 62–79, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.06.014>
- RIEGL (2026): Datenblatt RIEGL VZ-600i. www.riegl.com/fileadmin/media/Products/01_Terrestrial_Scanning/RIEGL_VZ-600i/RIEGL_VZ-600i_Datasheet_2026-01-28.pdf, letzter Zugriff 04/2026.

Photogrammetrische Untersuchung von Verknüpfungspunkten für die relative Orientierung

Dennis Bibow¹, Jonas Sackmann¹, Tobias Weimer¹ & Martina Göring¹

Zusammenfassung

Die Vermessung von Windenergieanlagen ist eine wichtige Grundlage für die Bewertung möglicher Laufzeitverlängerungen. Zur Erfassung betriebsbedingter Deformationen der Rotorblattgeometrie eignet sich wegen der schnellen Bewegungen eine Mehrbildaufnahme mit Highspeed-Kameras. Für die dreidimensionale Rekonstruktion ist die relative Orientierung der Kameras erforderlich. Da aufgrund des Messobjektes eine nach oben gerichteten Aufnahmesituation erforderlich ist, befindet sich nur wenig Struktur für Verknüpfungspunkte im Bild. Der Einsatz einer Drohne ermöglicht zusätzliche kontrastreiche Punkte im Objektraum. In dieser Arbeit wird der Einfluss ihrer Anordnung auf die relative Orientierung in großen Messvolumina anhand von Simulationen und eines Praxisbeispiels untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass räumlich verteilte Punkte die Qualität und Genauigkeit verbessern. Dabei sollten mindestens 50 Prozent des Bildes mit Verknüpfungspunkten abgedeckt sein.

Schlagwörter Photogrammetrie · Relative Orientierung · Simulation · Verknüpfungspunkte · Drohne · Folgebildanschluss

1 Einführung

Die Vermessung von Windenergieanlagen stellt eine wichtige Grundlage für die Zustandsbewertung und die Beurteilung einer möglichen Laufzeitverlängerung dar. Im Projekt BLADAPTION (IAPG, 2026) werden dafür unter anderem photogrammetrische Messverfahren eingesetzt, um die Geometrie und Deformation von Komponenten der Anlage zu erfassen. Insbesondere bei Rotorblättern besteht ein hohes Interesse daran, geometrische Veränderungen zuverlässig und mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen.

1.1 Photogrammetrischer Hintergrund

Zur photogrammetrischen Aufnahme von Windenergieanlagen können markierte Zielpunkte an der Anlage angebracht, beispielsweise im Bereich der Nabe oder der Blattwurzel (Schmidt Paulsen et al., 2009; Winstroth et al., 2014). Mittels photogrammetrischer Verfahren können Mehrkamerasysteme eingesetzt werden, um große Messvolumina zu erfassen und dreidimensionale Rekonstruktionen bei gleichzeitig hochfrequenter Bildaufnahme zu ermöglichen. Anhand von Pass- bzw. Verknüpfungspunkte kann die relative Orientierung der verwendeten Kameras bestimmt werden. Sie bildet eine zentrale Voraussetzung für die dreidimensionale Rekonstruktion, da erst durch eine Bestimmung der relativen

Orientierung 3D-Koordinaten der beobachteten Objektpunkte berechnet werden können (Hartley & Zisserman, 2003; Heipke, 2017). Dies stellt jedoch gerade bei Windenergieanlagen eine große Herausforderung dar. Das Messobjekt weist große Ausdehnungen auf, die Aufnahmesituation mit den nach oben gerichteten Kameras ist komplex und die verfügbaren Strukturen sind oft nur ungleichmäßig über das Messvolumen verteilt. Dadurch kann die Bestimmung der relativen Orientierung mit erhöhten Unsicherheiten verbunden sein. Da die Qualität der relativen Orientierung einen wesentlichen Einfluss auf die 3D Rekonstruktion besitzt, ist die Anordnung und Verteilung der Verknüpfungspunkte von besonderem Interesse.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Forschung ist daher die Untersuchung des Einflusses der räumlichen Verteilung von Verknüpfungspunkten auf die Qualität der relativen Orientierung in großen Messvolumina. Da bisher keine geeigneten Softwarelösungen verfügbar sind, mit denen sich dieser Einfluss systematisch analysieren lässt, wird ein eigenes Simulationsprogramm entwickelt. Mithilfe dieses Programms werden unterschiedliche Verteilungen von Verknüpfungspunkten untersucht und deren Auswirkungen auf die erreichbare Genauigkeit bewertet.

¹ Jade Hochschule, Ofener Straße 16/19, 26121 Oldenburg, Deutschland, E-Mail: martina.goering@jade-hs.de

Ergänzend dazu werden Daten aus einem Feldversuch herangezogen. Dabei werden zusätzliche Verknüpfungspunkte durch den Einsatz einer RTK-Drohne im Objektraum ermöglicht (siehe Abb. 1). Auf diese Weise kann der Bildraum besser ausgenutzt und ein Vergleich zwischen simulierten Szenarien und realen Messdaten durchgeführt werden. Diese Arbeit soll damit ein Verständnis dafür liefern, wie die Verteilung von Verknüpfungspunkten die relative Orientierung und damit die photogrammetrische Vermessung großer Objekte beeinflusst.

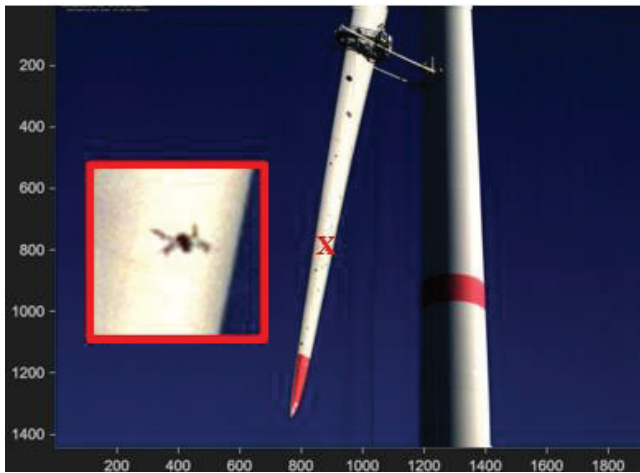


Abbildung 1: Kamerabild einer Windenergieanlage. Die Drohnenposition ist mit einem roten X markiert; der vergrößerte Bildausschnitt ist im rot umrahmten Bereich dargestellt.

2 Methodik

2.1 Programmarchitektur

Für die Bearbeitung der Forschungsfrage ist die Erstellung eines eigenen Simulationsprogrammes sinnvoll, da gezielt die konkreten Randbedingungen, wie einer variablen Verknüpfungspunktverteilung oder Bildmessgenauigkeit, berücksichtigt und angepasst werden können. Des Weiteren bleiben damit die einzelnen Verarbeitungsschritte transparent und nachvollziehbar, während bereits bestehende Programme häufig „Blackbox“-Systeme sind.

Dies schafft eine wissenschaftliche Nachprüfbarkeit und gibt die Möglichkeit einer Kontrolle. Es können gezielt relevante Werte ausgegeben, und mit denen aus weiteren Konfigurationen gegenübergestellt werden.

Das Programm bildet einen photogrammetrischen Auswerteprozess einer Stereokonfiguration nach. Es gibt zwei Programmzweige, die eng miteinander gekoppelt sind. Zum einen ist es möglich, verschiedene Szenarien zu

simulieren. Dies schafft die Möglichkeit, die Auswirkung der Verteilung der Verknüpfungspunkte und der Bildmessgenauigkeit auf die Standardabweichungen der relativen Orientierung zu untersuchen. Zum anderen soll es zur Validierung des Programms und zur Auswertung eines Feldversuchs möglich sein, reale Daten auszuwerten. Die Ergebnisse können, mit denen einer herkömmlichen photogrammetrischen Auswertesoftware, abgeglichen werden. Zusätzlich erfolgt eine Kontrolle von einzelnen Berechnungsschritten mit Daten aus der Literatur. Das Prozessdiagramm in Abbildung 2 gibt einen Überblick über das Simulationsprogramm mit den einzelnen Berechnungsschritten, sowie den Eingabe- und Ausgabeparametern. Beide Auswertungen werden in einer Graphik dargestellt, damit erkennbar wird, welche Schritte in den jeweiligen Fällen durchlaufen werden und wo es zu Unterscheidungen kommt. Im Allgemeinen ist das Programm in drei Ebenen eingeteilt, die Eingabe-, Berechnungs- und Ausgabebene. Für die Simulation lassen sich bei der Eingabe zunächst die Kameraparameter festlegen. Diese beinhalten die Kamerakonstanten, die Verzeichnungsparameter und die Geometrien der Sensoren beider Kameras (Luhmann, 2018).

Durch Berücksichtigung der Sensorgeometrie können bei bekannter relativer Orientierung die Blickfelder beider Kameras berechnet werden. Dafür eignet sich als Modell der Fall der unabhängigen Bildpaare. Dabei folgt aus der Eingabe einer Basislänge zwischen den Projektionszentren die räumlich skalierte Verordnung beider Kameras. Im linken Projektionszentrum befindet sich der Ursprung des Koordinatensystems. Das rechte ist um die Basislänge auf der X -Achse verschoben (Luhmann, 2018). Für die Ausrichtung jeder Kamera wird ein Fixpunkt definiert, welcher die optische Achse vom Projektionszentrum jeder Kamera festlegt. Die Rotation um die optische Achse wird auf null festgelegt. Die zwei fehlenden Rotationen der beiden Kameras werden durch den Höhen- und den Lageversatz des jeweiligen Fixpunktes gegenüber dem Projektionszentrum bestimmt. Mit gegebener Ausrichtung, Position, Kamerakonstanten und Sensorgeometrie kann das Blickfeld der Kameras als gekippte Pyramiden im Raum berechnet werden. Um nun Koordinaten im Objektraum abzugreifen, ist eine dreidimensionale Ansicht ungeeignet. Somit erfolgt mit wählbarem orthogonalem Abstand zur Basis eine Projektion des Randbereiches der Blickfelder in eine (Z -)Ebene. Nun besteht die Möglichkeit, die fehlenden X - und Y -Koordinaten in der Ebene abzugreifen. Über die Kollinearitätsgleichungen ist daraufhin die Berechnung optimaler Bildkoordinaten für jede Kamera möglich (Stallmann, 2008).

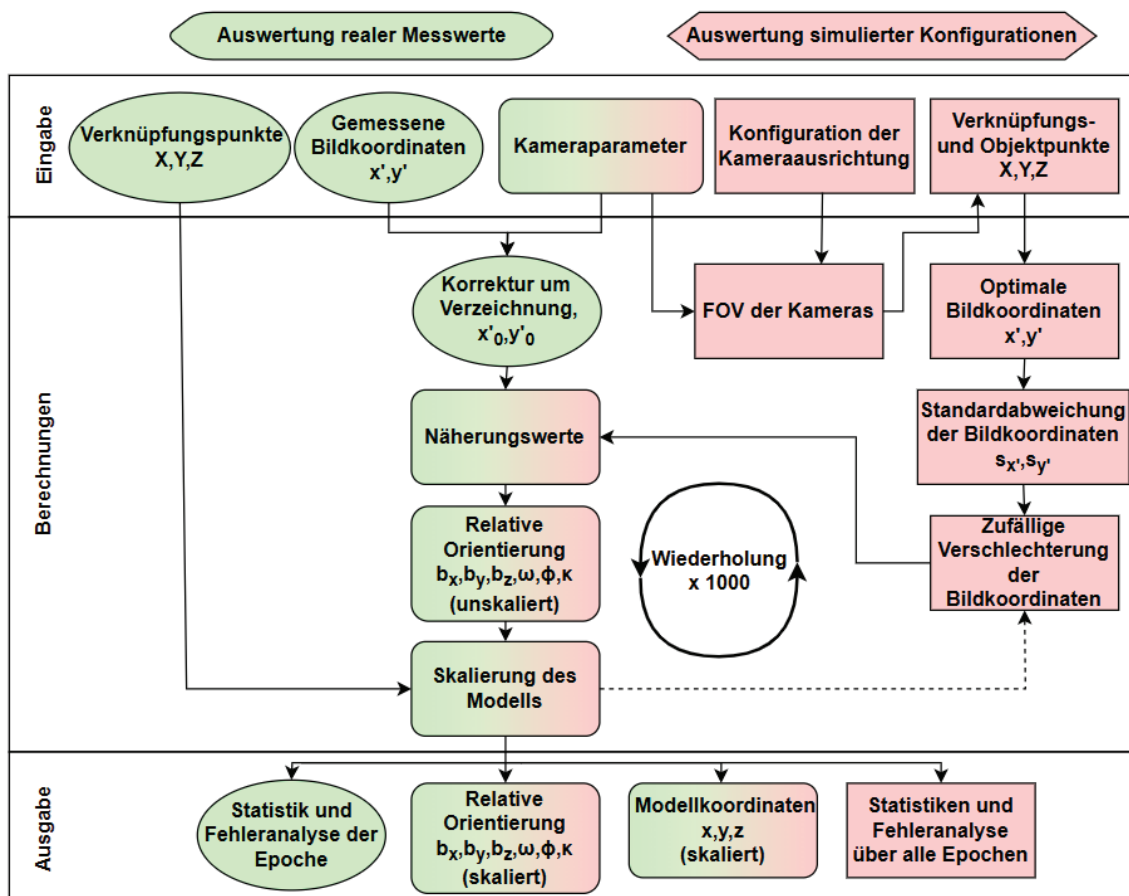


Abbildung 2: Programmarchitektur des eigenen Simulationsprogrammes

Im nächsten Schritt erfolgt die Bestimmung der Standardabweichungen der Bildkoordinaten. Sie sind notwendig, um aus den idealen Werten realitätsnahe Bedingungen für die spätere Ausgleichung zu erzeugen. Die Simulation berücksichtigt dabei die Standardabweichungen der inneren Orientierung und die Bildmessgenauigkeiten. Mathematisch ist die Berechnung der Standardabweichungen der Bildkoordinaten über die Varianzfortpflanzung von nichtlinearen Funktionen möglich (Niemeier, 2008). Dabei besteht das funktionale Modell für die Jacobi-Matrix aus den einzelnen Termen der standardisierten Verzerrungskorrekturfunktion der Bildkoordinaten nach Brown. Zusätzlich gibt es noch einen additiven Term zur Berücksichtigung der Bildmessgenauigkeit (Luhmann, 2018). Nachdem sowohl die Bildkoordinaten als auch die dazugehörigen Standardabweichungen bekannt sind, erfolgt anhand dieser eine Bestimmung der Genauigkeitsmaße der resultierenden relativen Orientierung und der skalierten Modellkoordinaten. Dafür kommt die Monte-Carlo-Methode zum Einsatz. Sie ist ein robustes Simulations-

verfahren, bei dem von den Eingangsgrößen über ein funktionales Modell eine Fortpflanzung der Standardabweichungen auf die Ausgangsgrößen möglich ist. Die Berechnung erfolgt numerisch über eine Vielzahl an Wiederholungen. Es ist deswegen, anders als bei analytischen Lösungen, keine Linearisierung der Funktion notwendig (Schwarz, 2020). Bei den Bildkoordinaten gilt die Annahme, dass keine systematischen, sondern ausschließlich zufällige Messunsicherheiten vorliegen. Für das Modell der statistischen Verteilung von zufälligen Abweichungen dient eine Normalverteilung (Niemeier, 2008). Auf dessen Grundlage erfolgt bei der numerischen Fehlerfortpflanzung eine zufällige Fehleraufschaltung auf die einzelnen Bildkoordinaten. Somit resultieren nach mehrmaligem Durchlaufen des funktionalen Modells unterschiedlichen Ergebnissen. Unter Voraussetzung, dass die Anzahl an Durchläufen mit jeweils leicht unterschiedlichen Eingabewerten mindestens 1000 beträgt, lässt sich für die unterschiedlichen Ausgangswerte ein Mittelwert mit Standardabweichung bestimmen (Schwarz, 2020). Das funktionale Modell, welches bei der Monte-

Carlo-Methode wiederholend durchlaufen wird, setzt sich dabei aus drei Bestandteilen zusammen.

Zu Beginn ergibt sich anhand der Bildkoordinaten beider Kameras eine rechnerische ausgeglichene Lösung für die Parameter der relativen Orientierung und die Komponenten der Modellkoordinaten. Die Ausgleichung erfolgt auf Basis der Koplanaritätsbedingung, mit dem Vorteil, keine Näherungswerte für die auszugleichenden Ergebnisse zu benötigen (Luhmann, 2018).

Im nächsten Schritt werden die Kollinearitätsgleichungen als Beobachtungsfunktionen verwendet. Als Näherungskordinaten der iterativen Lösung dienen die Ergebnisse des vorangegangenen Schrittes. Hier bildet das Modell des Folgebildanschlusses die Grundlage. Eine doppelte Berechnung ist notwendig, damit eine Unabhängigkeit von Näherungskordinaten bestehen bleibt und die resultierenden Ergebnisse trotzdem metrisch sind (Hartley und Zisserman, 2003; Heipke 2017; Stallmann, 2008; Luhmann, 2018).

Im letzten Berechnungsschritt erfolgt eine Skalierung des Modells auf Basis von Koordinateninformationen der Verknüpfungspunkte im Objektkoordinatensystem. Auf Basis bekannter dreidimensionaler Koordinaten von mindestens zwei Punkten kann über das Streckenverhältnis in beiden Systemen ein Skalierungsfaktor bestimmt werden. Liegen mehr Koordinaten im Objektraum vor, werden alle Streckenkombinationen berechnet und der gemittelte Wert angebracht. Die Skalierung des Modells über Streckenverhältnisse wurde einer direkten Koordinatentransformation vorgezogen, da sie für den Erhalt von maßstabsgetreuen Genauigkeitsangaben ausreichend ist. Neben den Punktkoordinaten wird der Faktor an die Basiskomponenten und die jeweiligen Standardabweichungen angebracht (Ingensand, 2004).

Die Auswertung realer Messdaten unterscheidet sich im Gegensatz zur Simulation darin, dass die auszugleichenden Bildkoordinaten bereits direkt eingegeben sind und nicht erst berechnet werden müssen. Über Korrekturfunktionen ist eine rechnerische Minimierung der Einflüsse von Verzeichnungen oder Bildhauptpunktverschiebungen möglich, sofern notwendige Kameraparameter ebenfalls übergeben werden (Luhmann, 2018). Für eine Skalierung können bekannte Verknüpfungspunktkoordinaten im Objektraum übergeben werden. Sie werden in der Eingabeebene mit den für die Skalierung notwendigen Verknüpfungspunkten an das Programm übergeben. Anschließend durchläuft das Programm den mit der Simulation gemeinsam genutzten Berechnungsblock. Hierbei findet eine Näherungswertberechnung mittels

Koplanaritätsbedingung, eine Ausgleichung mittels Kollinearitätsgleichung und eine Skalierung des Modells über die eingegebenen Verknüpfungspunkte statt. Im Gegensatz zur Simulation erfolgt nur ein einmaliger Durchlauf des Berechnungsblocks. Abschließend kommt es zur Ausgabe der resultierenden Ergebnisse analog zur Simulation.

Die Verifikation und die Validierung des Programms erfolgten über einen Abgleich der Ergebnisse mit einer Referenz.

2.2 Annahmen und Konfigurationsparameter der Simulation

Für die nachfolgend untersuchten Simulationsszenarien werden Annahmen und Konfigurationen so gewählt, dass die photogrammetrischen Geometrien sowie die Szenarien untereinander vergleichbar sind.

2.3 Annahme zur Bildgeometrie und Beobachtungssituation

Die erreichbare Genauigkeit, insbesondere in Tiefenrichtung, wird maßgeblich durch die Schnittgeometrie bestimmt, welche sich über das Höhen-Basis-Verhältnis beschreiben lässt. Für praxisnahe Anwendungen gelten mittlere Bereiche als günstig. In dieser Arbeit wird ein Höhen-Basis-Verhältnis von etwa 1:2 angesetzt, was als robuste Geometrie angesehen werden kann (Hasegawa et al., 2000.; Luhmann, 2018). Hierbei ergibt sich eine optimale Konfiguration, wenn die Winkel zwischen sich schneidenden Raumstrahlen im Mittel bei 90° liegen (Luhmann, 2018).

Für alle Szenarien der Simulation beträgt die Zahl der sichtbaren Verknüpfungspunkte konstant 15, da mehr Punkte keine signifikante Verbesserung aufweisen würden und um die Ergebnisse zwischen Verteilung und Genauigkeitsannahmen vergleichbar zu machen (Zhang et al., 2022).

Für eine stabile Ausgleichung ist nicht nur die Anzahl, sondern auch die räumliche Verteilung von Punkten im Raum entscheidend. Der klassische Gedanke der Gruber-Punkte adressiert dabei eine gleichmäßige Abdeckung des Bildformats, um Korrelationen zwischen Parametern zu reduzieren und die Geometrie zu stabilisieren (Luhmann, 2018). In der Simulation werden verzeichnungsfreie Daten angenommen, um die Einflüsse der Punktverteilung und der Beobachtungsgenauigkeiten isoliert analysieren zu können. In realen Aufnahmen lassen sich Abbildungsfehler in der Regel durch vorherige- oder simultane Kalibrierung

modellieren und berücksichtigen. Für die simulierten Werte stehen sie daher nicht im Fokus. Darüber hinaus gilt die Annahme, dass die simulierten Verknüpfungspunkte in beiden Kameras sichtbar sind und somit eine mögliche Abdeckung der Punkte durch den Turm oder die Rotorblätter nicht auftritt. Diese Annahme dient der kontrollierten Vergleichbarkeit der Szenarien und reduziert den Einfluss szenenspezifischer Sichtbarkeiten.

2.4 Konfiguration

Die Simulationsgeometrie wird durch einen horizontalen, orthogonalen Abstand von der Basis zum aufzunehmenden Objektraum in der Mitte mit 100 m festgelegt, während der Höhenversatz bei 65 m liegt. Die Basislänge zwischen den Kameras beträgt 200 m. Diese Konfiguration deckt den relevanten Objektbereich des Referenzfalls, welcher von 27 m bis 115 m liegt, nahezu vollständig ab. Die Verknüpfungspunkte werden hierbei in drei Hoch-Ebenen angeordnet, welche jeweils 30 m auseinander liegen (siehe Abb.3).

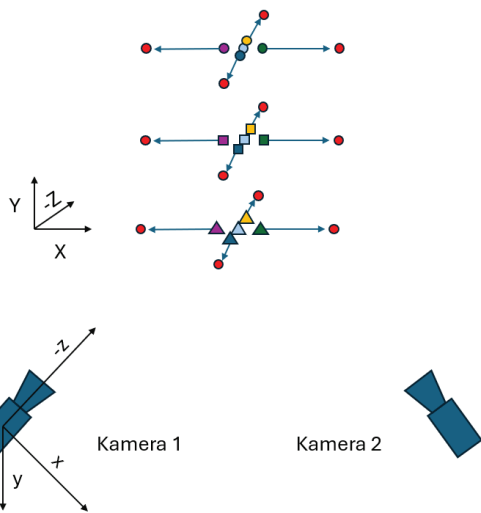


Abbildung 3: Übersicht der Verknüpfungspunktverteilung

Die unterste Ebene befindet sich bei 40 m. Wenn dieses Kriterium aufgrund der Randbedingungen nicht mehr erfüllt werden kann, da die Punkte außerhalb des gemeinsamen Sensorbereichs wandern würden, bleiben diese auf dem letzten gültigen Koordinatenwert. Damit bleibt die Verteilung so gleichmäßig wie möglich, ohne die Simulationslogik zu brechen. Um eine systematische Variation zu gewährleisten, werden die Punkte in Schritten von 5m gestaffelt. Die Verteilung der Punkte erfolgt in Basisrichtung und in horizontaler Aufnahmerichtung. Hiermit beträgt die größtmögliche Spanne 50 bis 150 m.

2.5 Simulationsfälle

Für die Simulationsparameter werden zwei Szenarien betrachtet. Zunächst erfolgt eine Untersuchung, ob eine räumliche Verteilung der Verknüpfungspunkte im Vergleich zu einer turmgebundenen Verteilung einen messbaren Einfluss auf die Genauigkeit der relativen Orientierung besitzen. Danach folgt eine gezielte Untersuchung des Einflusses der Bildmessgenauigkeit. Diese getrennte Betrachtung von Geometrie- und Genauigkeitseffekten schafft die Möglichkeit, isoliert den Einfluss der Stellgrößen zu beobachten.

3 Ergebnisse

3.1 Simulierte Szenen

Ziel der folgenden Ergebnisse ist eine systematische Quantifizierung der Fragestellung, ob zusätzliche räumlich verteilte Drohnepunkte im Anwendungsfall einer Windenergieanlage zu einer Steigerung der Genauigkeit beitragen. Dabei werden die in Kapitel 2.3 beschriebenen Annahmen über die Konfiguration sowie die Parameter der Kameras, die Bildmessgenauigkeit und die Korrektur der Verzerrung als konstant angenommen. Allein die Verteilung der Verknüpfungspunkte und somit die Sensorabdeckung variiert in den einzelnen Simulationsdurchläufen. Die Berechnung der prozentualen Sensorabdeckung erfolgt über eine Differenzbildung von der gesamten Sensorfläche mit der einer Konvexhülle um die sich ergebenden Bildkoordinaten. Abbildung 4 zeigt die Standardabweichungen der relativen Orientierung in Abhängigkeit zur prozentualen Sensorabdeckung.

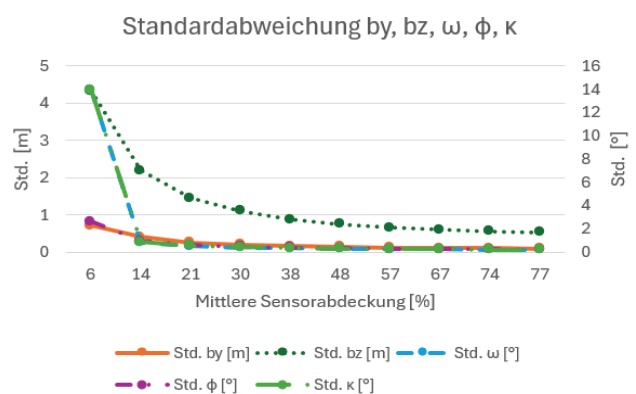


Abbildung 4: Standardabweichungen der relativen Orientierung bei variabler Verknüpfungspunktverteilung

Es lässt sich ein monoton fallender Verlauf aller Datenreihen bei größer werdender Distanz zwischen den Verknüpfungspunkten konstatieren. Auffällig sind dabei hohe Standardabweichungen in b_z , ω , und κ zu Beginn des Verlaufs. Bei den Rotationen ist zunächst eine starke und anschließend eine stetig kleiner werdende Verbesserung zu beobachten. Die Translation b_z hingegen nähert sich b_y langsamer an, weist dabei aber stets eine größere Standardabweichung als b_y auf. Am Ende des Verlaufs ist sie mit 0,5 m in etwa um den Faktor fünf größer. Dahingegen weisen die Standardabweichungen der Rotationen zum Ende des Verlaufs alle einen ähnlichen Wert von circa $0,2^\circ$ auf. Insgesamt fällt der Zugewinn an Genauigkeit ab einer Abdeckung von etwa 50 Prozent nur noch gering aus.

Der RMS- und Helmertsche‘ Punktfehler der skalierten Modellkoordinaten wird in Abbildung 5 ebenfalls in Abhängigkeit zur Sensorabdeckung dargestellt. Analog zur vorherigen Abbildung 4 ist ein monoton fallender Verlauf aller Datenreihen zu beobachten.

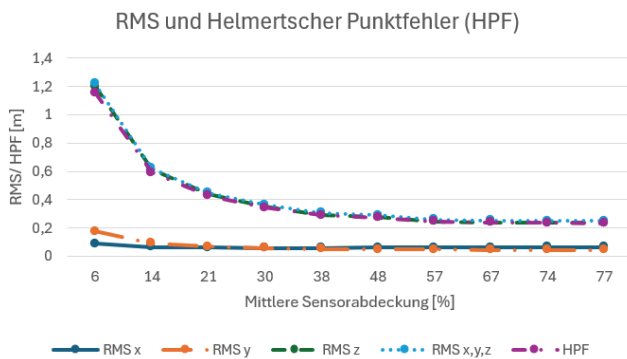


Abbildung 5: Mittlere Standardabweichungen der skalierten Modellkoordinaten bei variabler Verknüpfungspunktverteilung

Beim Vergleich der einzelnen Komponenten der skalierten Modellkoordinaten fällt auf, dass die Abweichung in z-Richtung, insbesondere zu Beginn, deutlich größer ausfällt als in x- und y-Richtung. Sowohl der RMS_{xyz} , als auch der Helmertsche‘ Punktfehler verlaufen dabei nahezu identischen mit dem RMS_z . Dieser Verlauf stabilisiert sich bei Distanzen ebenfalls bei etwa 50 Prozent und es folgen fortan geringfügige Verbesserungen. Am Ende des Verlaufs ist der RMS_z mit 0,20 m in etwa um den Faktor fünf größer als der von x und y.

3.2 Praxisbeispiel

m Feldversuch des Projekts BLADAPTION wird eine Drohne, die einen systematischen Flug um eine

Windenergieanlage ausführt, durch vier synchronisierte Highspeed-Kameras erfasst. Die Kameras sind dabei primär so ausgerichtet, dass ein nahezu vollständiges Rotorblatt (einschließlich der 15 daran angebrachten Messmarken) im Bild erfasst wird (Abbildung 1). Für die Auswertung werden exemplarisch zwei Kameras isoliert betrachtet und mit Hilfe des Programms ausgewertet. Die Basis beider Kameras zueinander begrenzt sich durch die Gegebenheiten vor Ort auf ca. 52,5 m. Die Koordinaten des Mittelpunkts der Drohne (Drohnepunkte) werden aus 20 synchronen Bildern beider Kameras extrahiert. Diese Werte bilden die Startkonfiguration für die Auswertung in dem Programm. Schrittweise wird ein Drohnepunkt durch einen Punkt auf dem Rotorblatt ausgetauscht. Damit liegt zu Beginn eine räumlich verteilte Konstellation vor, welche sich sukzessive auf das Rotorblatt konzentriert.

Da die Anzahl der Punkte auf dem Rotorblatt auf 15 begrenzt ist, sinkt in den letzten Schritten nur noch die Zahl der Drohnepunkte. Für die Maßstabsbestimmung müssen mindestens zwei dreidimensionale Objektkoordinaten vorliegen, sodass der letzte Schritt 15 Punkte auf dem Rotorblatt und zwei Punkte durch die Drohne abbildet. In Abbildung 6 ist die Verteilung aller verwendeten Punkte auf den beiden Bildsensoren abgebildet.

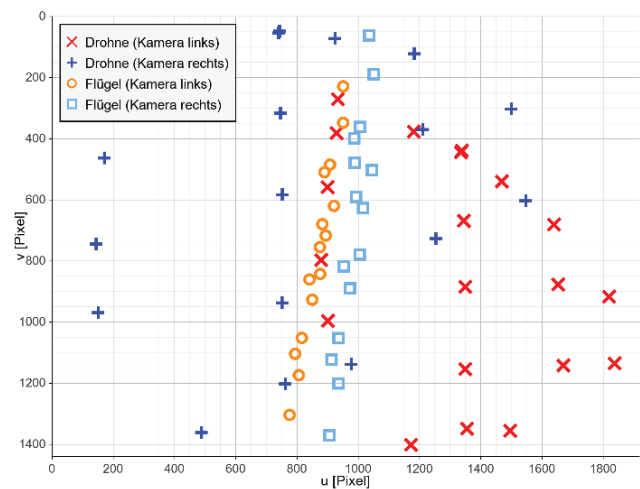


Abbildung 6: Abbildung aller Verknüpfungspunkte auf den Bildsensoren der Kamera links (rot & orange) und Kamera rechts (hell- und dunkelblau)

Die Standardabweichungen der Parameter der relativen Orientierung weisen im Großteil des Verlaufs wenige Veränderungen auf (Abb. 7). Erst ab dem Moment, als weniger als fünf Drohnenpunkte vorhanden sind, entsteht ein starker Anstieg in allen Werten. Den stärksten Anstieg verzeichnet die Basiskomponente b_z .

Wie auch schon in den Ergebnissen der Simulation erkennbar, ist der RMS_z deutlich größer als dessen Pendant in x - und y -Richtung (siehe Abb. 8). Somit ist es nicht verwunderlich, dass dieser den größten Teil des RMS_{xyz} ausmacht. Insgesamt steigen der RMS_{xyz} und der Helmertsche' Punktfehler stetig an, während zweiterer um den Faktor 1,5-2 höher ist.

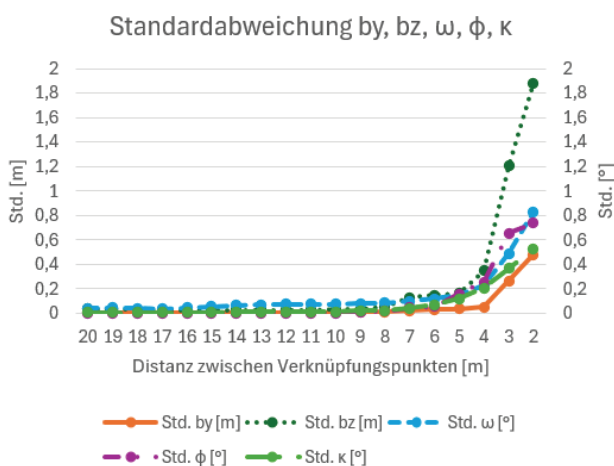


Abbildung 7: Standardabweichungen der relativen Orientierung bei veränderter Verknüpfungspunkt-konstellation

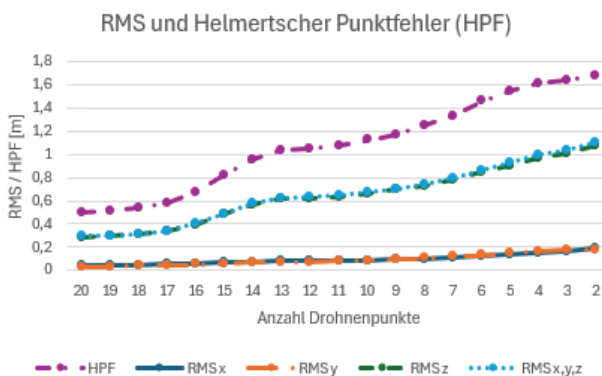


Abbildung 8: RMS und Helmertscher' Punktfehler bei veränderter Verknüpfungspunkt-konstellation

4 Diskussion

4.1 Ergebnisse

Durch die in Kapitel 3 vorgestellten Resultate ist eine Abhängigkeit zwischen der räumlichen Verteilung der Verknüpfungspunkte und der Genauigkeit der relativen Orientierung erkennbar. Dabei zeigen sowohl die simulierte als auch die reale Szene ein konsistentes Bild.

Dies bestätigt die grundlegende Erwartungshaltung, dass mit zunehmender räumlicher Verteilung eine höhere Gesamtgenauigkeit der Lösung erreicht wird. Diese positiven Effekte konvergieren jedoch ab einer räumlichen Spanne von über 60 m im Objektkoordinatensystem, sodass nur noch geringe Verbesserungen im RMS_{xyz} und Helmertschen' Punktfehler auftreten. Somit ist eine ausreichend große Raumabdeckung nicht erst mit der maximalen Ausdehnung erreicht.

Die Sensitivität der z -Komponente ist dabei auffällig. In der Photogrammetrie ist meist die Tiefenkomponente jene, die aufgrund der Geometrie der Aufnahme die größte Unsicherheit hat (Luhmann, 2018). Jedoch reagieren die z -bezogenen Anteile, also der RMS_z sowie b_z deutlich stärker als x und y .

Des Weiteren ist erkennbar, dass eine isolierte Veränderung der Spanne in Aufnahme-Richtung keine nennenswerte Verbesserung der Parameter der relativen Orientierung mit sich bringt. Eine isolierte Ausdehnung parallel zur Basis, also orthogonal zur horizontalen Aufnahme-Richtung, zeigt, dass hier der größte Anteil der Genauigkeitssteigerung erzielt wird.

Der Einfluss der Bildmessgenauigkeit verhält sich wie erwartet. Der erkennbare lineare Anstieg aller Qualitätskennzahlen spiegelt eine direkte, proportionale Abhängigkeit aller Größen zur Bildmessgenauigkeit wider. Daraus folgt, dass zwangweise eine Verbesserung der Detektion des Zielpunktes, zum Beispiel durch einen hohen Kontrast oder ein präzises bestimmbares Zentrum, einen unmittelbaren direkten positiven Einfluss auf die Modellgenauigkeit hat.

Die Ergebnisse der Simulation finden sich ähnlich im Praxisbeispiel wieder. Die Übereinstimmung der Daten ist hierbei direkt durch die Trends der Kennwerte erkennbar. Bei einer Verringerung der räumlichen Verteilung der Verknüpfungspunkte verschlechtert sich bei ausreichend hoher Verteilung zunächst nicht viel. Sobald jedoch die räumlich naheliegenden Punkte nahezu den gesamten Horizont an Verknüpfungspunkten abdecken, wird die Qualität der relativen Orientierung sprunghaft schlechter.

Damit ist erkennbar, dass bereits eine geringe Anzahl an räumlich verteilten Punkten ausreicht, um eine stabile Lösung zu erhalten.

Somit untermauert neben der Simulation auch das Praxisbeispiel die Aussage, dass eine räumliche Verteilung der Verknüpfungspunkte bei großen Messvolumina einen wesentlichen Einfluss auf die relative Orientierung hat.

4.2 Methodische Einordnung und Limitationen

Im wissenschaftlichen Umfeld sind photogrammetrische Stereoaufnahmen in größeren Messvolumina bereits mehrfach thematisiert worden. Der Fokus liegt jedoch bislang nicht auf der Untersuchung der Verknüpfungspunkterzeugung und -verteilung in strukturarmen Szenen. Stattdessen beschränken sich bisherige Arbeiten auf Messmarken an den Rotorblättern (Schmidt Paulsen et al., 2009; Winthroth et al., 2014). Mit Hilfe des Programms wird ein Rahmen geschaffen, der reproduzierbare und kontrollierbar auswertbare Ergebnisse liefert. Die Trennung von Simulation und Auswertung ermöglicht es, potenzielle Verknüpfungspunktverteilungen vor einer realen Anwendung zu testen und nach der Aufnahme gewonnene Daten auszuwerten. Der Berechnungsfluss über die Koplanaritätsbedingung zur robusten Startlösung bis zur finalen Ausgleichung mittels Kollinearitätsgleichungen funktioniert zuverlässig. Die Skalierung über eine gemittelte Streckenverhältnisbildung bietet eine praktikable Maßstabsübertragung. Diese ist direkt interpretierbar und bei wenigen zuverlässigen Referenzstrecken robust. Das klassische Vorgehen wäre eine 7-Parameter-Ähnlichkeitstransformation (Schneider, 2009). Validierungen mit verschiedenen Referenzdaten zeigen jedoch, dass das verwendete Verfahren durchweg zu Abweichungen von unter 1 % des absoluten Maßstabwertes führt und damit ausreichend präzise ist. Zur Modellierung der Unsicherheit in der Simulation wird die Monte-Carlo-Methode eingesetzt. Auch bei nichtlinearen Gesamtmodellen ist bei ausreichend vielen Durchläufen Reproduzierbarkeit gegeben (Robert & Casella, 2004). Ein Umfang von 1000 Iterationen liefert dabei einen guten Richtwert. Die Berechnung aller Lösungen einschließlich Mittelung relevanter Kennzahlen dauert weniger als eine Minute. Mehr Durchläufe würden die Rechenzeit erhöhen, aber auch die Qualitätskennzahlen weiter schärfen. Methodisch bestehen jedoch einige Einschränkungen, die die Aussagekraft der Ergebnisse mindern. So geht die Simulation von zeichnungsreichen Bildern, ohne Verschiebung des Bildhauptpunkts und mit bekannter

Kamerakonstante aus. Durch eine Berechnung der Standardabweichungen der Bildkoordinaten aus den Unsicherheiten der inneren Orientierung könnten Beobachtungen gewichtet werden. Da Verzeichnungen und Kalibrierungsunsicherheiten im Randbereich des Sensors typischerweise stärker wirken als im Zentrum, ist die Unsicherheit eines Messpunkts dort meist größer (Luhmann, 2018). Werden alle Beobachtungen gleich gewichtet, bleibt dieser Unterschied unberücksichtigt. Besonders relevant ist dies, wenn die Kalibrierung im Nahbereich erfolgt, die spätere Aufnahme aber aus deutlich größerer Distanz stattfindet. Daraus ergibt sich Potenzial für weiterführende Untersuchungen zu den Auswirkungen der Kameraparameter in großen Volumina. Zudem sind die Achsen im Modell aufgrund des Folgebildanschlusses an das Kamerakoordinatensystem der linken Kamera gebunden. Für eine bessere praktische Einordnung könnten die Qualitätsmaße durch eine Transformation in ein kartesisches System überführt werden, sodass beispielsweise z die Hochachse und x die Achse entlang der Basis bildet. Auch für den praktischen Nutzen bestehen Einschränkungen. Es wird nur ein Stereofall betrachtet. Weitere Kameras würden das Messvolumen verändern und könnten durch zusätzliche Perspektiven eine stabilere Lösung ermöglichen (Maas, 1997; Rumpler, 2011). Ein weiterer entscheidender Faktor ist ein präzises Abgreifen der Drohne und hiermit verbunden die Kameraauflösung. Eine höhere Auflösung im Objektraum würde die Genauigkeit bei der Erfassung relevanter Informationen weiter verbessern. Trotz dieser möglichen Verbesserungen lassen sich mit der verwendeten Methodik belastbare Ergebnisse erzeugen und die Forschungsfrage beantworten. Zugleich besteht ein praktischer Mehrwert, der eine direkte Übertragbarkeit auf künftige Feldmessungen ermöglicht.

5 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes wird ein Verfahren zur Bestimmung der relativen Orientierung zweier Highspeed-Kameras für die Vermessung großer Volumina an einer Windenergieanlage untersucht. Die Auswertung simulierter und realer Daten erwies sich als sehr aufschlussreich. Es lässt sich mit den Ergebnissen der Einfluss der Punktverteilungsgeometrie sowie der Bildmessgenauigkeit auf die relative Orientierung nachvollziehbar bewerten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine räumlich bessere Abdeckung des Sensorraums die Berechnungen stabilisiert. Drohnenbasierte Verknüpfungspunkte verbessern gegenüber einer turm- oder rotorblattgebundenen Punktverteilung die Genauigkeit des Systems.

Das Simulationsprogramm ermöglicht es hierbei, verschiedene Aufnahmeszenarien effizient zu variieren und Geometrie- sowie Genauigkeitseinflüsse zu erproben. Hierdurch können konkrete Ansätze zur verbesserten Bestimmung der relativen Orientierung abgeleitet werden. Insbesondere der spezifische Anwendungsfall der nach oben gerichteten Kameras mit sehr wenigen, bis keinen natürlichen Verknüpfungspunkte stellt eine Herausforderung dar, welche nun simuliert und stetig verbessert werden kann. Die Auswertung realer Daten bestätigen die Ergebnisse der Simulation.

Insgesamt zeigt diese Arbeit einen Ausschnitt der Simulationsmöglichkeiten und schafft eine belastbare Grundlage für weitergehende Untersuchungen, um einen optimalen Versuchsaufbau für zukünftige Messungen abzuleiten.

Literaturverzeichnis

- Hartley, R., & Zisserman, A. (2003). Multiple view geometry in computer vision (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://books.google.de/books?id=si3R3Pfa98QC>
- Hasegawa, H., Matsuo, K., Koarai, M., Watanabe, N., & Masaharu, H. (2000). DEM accuracy and the base to height (B/H) ratio of stereo images. Geographical Survey Institute, Japan. https://isprs.org/proceedings/XXXIII/congress/part4/356_XXXIII-part4.pdf
- Heipke, C. (2017). Photogrammetrie und Fernerkundung—eine Einführung. In Photogrammetrie und Fernerkundung: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freuden und Reiner Rummel (pp. 1-27). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- IAPG (2026), Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik. *BLADAPTION*. Jade Hochschule. Abgerufen am 1. Februar 2026, von <https://iapg.jade-hs.de/en/projects/bladaption>
- Ingensand, H. (2004). Einführung in die geodätische Messtechnik. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich. https://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/skript/Skript_GMT_2004_1.pdf
- Luhmann, T. (2018). Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden, Beispiele (4., neu bearb. und erw. Aufl.). Wichmann. <http://www.vde-verlag.de/buecher/537640/nahbereichsphotogrammetrie.html>
- Maas, H.-G. (1997). Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Niemeier, W. (2008). Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden (2., überarb. und erw. Aufl.). De Gruyter. <http://www.reference-global.com/isbn/978-3-11-020678-4>
- Robert, C. P., & Casella, G. (2004). Monte Carlo statistical methods (2nd ed.). Springer. http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=012869394&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA
- Rumpler, M., Irschara, A., & Bischof, H. (2011). Multi-view stereo: Redundancy benefits for 3D reconstruction. Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology. https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICG/Images/team_fraudorfer/personal_pages/markus_rumpler/multiview_aapr2011.pdf
- Schmidt Paulsen, U., Erne, O., & Klein, M. (2009). Modal analysis on a 500 kW wind turbine with stereo camera technique. In Proceedings of the 3rd International Operational Modal Analysis Conference. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/4532444/2009_81.pdf
- Schneider, D. (2008). Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten [Dissertation, Technische Universität Dresden].
- Schwarz, W. (2020). Methods for the determination of the measurement uncertainty using GUM. <https://gispoint.de/>
- Stallmann, D. (2008). DGAPNotes: DGAPVersion 3.2.0. <https://ifpwww.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/openbundle/dgap-notes-de.pdf>
- Winstroth, J., Schoen, L., Ernst, B., & Seume, J. R. (2014). Wind turbine rotor blade monitoring using digital image correlation: A comparison to aeroelastic simulations of a multi-megawatt wind turbine. Journal of Physics: Conference Series, 524, 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012064>
- Zhang, Y., Yang, J., Li, G., Zhao, T., Song, X., & Zhang, S. (2022). Camera calibration for long-distance photogrammetry using unmanned aerial vehicles. Journal of Sensors, 2022, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2022/8573>

CHAD TSDF: TSDF Submapping mit Schleifenschluss und hoher Kompression mittels Knoten-Hashing

Jan Kuhlmann¹, Thomas Wiemann²

Zusammenfassung

Truncated Signed Distance Fields (TSDFs) sind ein gängiges Verfahren zur Repräsentation von 3D-Oberflächen. Sie können durch ein 3D-Gitter abgetastet werden, bei welchem an den Gitterknotenpunkten die Entfernung zur nächstgelegenen Oberfläche gespeichert wird. TSDFs finden auch im Bereich von SLAM-Anwendung, wo sie die Integration von Punktwolken unterstützen. Ein Gitter ist jedoch unflexibel und verhindert Optimierungen nach der Integration von Punktwolken, wie beispielsweise bei der globalen Posengraphoptimierung nach Schleifenschlüssen. Bestehende Verfahren verwenden mehrere kleine und sich überlappende Karten (Submaps), um eine globale Karte darzustellen, was zu einem erhöhten Speicherplatzverbrauch führt. Wir haben eine Cluster-Hashed assoziative und diskretisierte (CHAD TSDF) Datenstruktur für TSDF SLAM entwickelt, welche diesen Speicherverbrauch durch das Hashing von Knoten reduziert. In einem vorherigen Beitrag haben wir gezeigt, dass eine hohe Kompression und gleichzeitig eine ausreichend geringe Laufzeit für die übliche LiDAR-Sensorfrequenz von 10 Hz bis 20 Hz möglich ist. CHAD TSDF wurde nun um Submapping erweitert, welches das bereits bestehende Kompressionsverfahren nutzt und nun in der Lage ist, globale Posen und deren Submaps nach einem Schleifenschluss zu optimieren. Submaps können mittels TSDF-zu-TSDF Fusion kombiniert werden, was eine Rekonstruktion einer globalen Karte als 3D-Mesh ermöglicht.

Schlagwörter TSDF · Schleifenschluss · SLAM

1 Einführung

Ein TSDF ist eine volumetrische Darstellung einer Szene, die den Abstand zur nächstgelegenen Oberfläche für jeden Punkt in einem 3D-Gitter kodiert; die Abstände sind außerhalb von Oberflächen positiv und innerhalb negativ, wobei Werte jenseits eines bestimmten Bereiches von der Oberfläche abgeschnitten werden, um Inkonsistenzen zu vermeiden. Diese Darstellung ist besonders leistungsfähig für das Zusammenführen von Informationen aus mehreren Sensorbeobachtungen. Insbesondere eignet sie sich gut für die 3D-Rekonstruktion. Für SLAM bietet es die Fähigkeit, eine Scan-zu-TSDF-Registrierung durchzuführen. Durch die Aggregation von Daten aus mehreren Blickwinkeln können TSDF-basierte SLAM-Systeme genaue pseudokontinuierliche 3D-Karten der Umgebung erstellen. Sobald die Geometrie jedoch in das TSDF integriert ist, geht die Verbindung zwischen der Scan-Position und den betroffenen Zellen im TSDF-Volumen verloren.

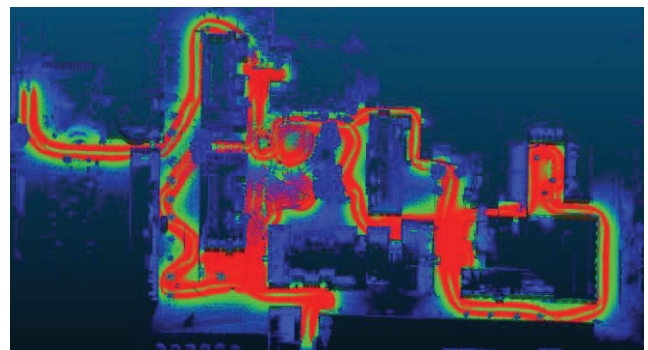


Abbildung 1 Von CHAD TSDF rekonstruiertes 3D Mesh des Campus der Hochschule Fulda. Je höher die Anzahl der integrierten Punkte, desto wärmer der Farbgradient.

Dies ist ein großes Problem bei SLAM, insbesondere beim Schließen von Schleifen und Optimierung des Posengraphen. Ein üblicher Ansatz für TSDF-Kartierung ist hier die Verwendung von Submapping. Statt einer großen Karte wird diese in mehrere kleinere Karten segmentiert, welche unabhängig voneinander nach einem Schleifenschluss transformiert werden können. Dieser Ansatz ist kompatibel mit Graph-basiertem SLAM, welches

¹ Hochschule Fulda, Angewandte Informatik, Leipziger Straße 123, 36037 Fulda, jan.kuhlmann@informatik.hs-fulda.de

² Hochschule Fulda, Angewandte Informatik, Leipziger Straße 123, 36037 Fulda, thomas.wiemann@informatik.hs-fulda.de

das SLAM-Problem als Knoten in einem Posegraphen zu verschiedenen Zeitpunkten darstellt, wobei die Kanten des Graphens die räumlichen Beschränkungen zwischen diesen Posen sind. Die Bewegung des Roboters sorgt dabei für die Beobachtungen von verschiedenen Blickwinkeln.

CHAD TSDF ermöglicht eine kompakte Speicherung von TSDFs und verbindet dies mit Submapping für TSDF SLAM in großen Umgebungen. Der Kernbeitrag ist die Erweiterung des in einem vorherigen Beitrag vorgestellten CHAD TSDF um Submapping mit Schleifenschluss. Für die Schleifenschlusserkennung werden Normal Distribution Descriptors (NDDs) verwendet. Bei erfolgreicher Erkennung wird der Posegraph mithilfe von Goergia Tech Smoothing and Mapping (GTSAM) optimiert. Spezifisch wird die in GTSAM angebotene iSAM2 Implementierung für inkrementelle Optimierung während des Scanvorgangs verwendet.

2 Stand der Technik

In den letzten Jahren haben sich Truncated Signed Distance Fields (TSDFs) als vielseitige Umgebungsdarstellung für mobile Roboter bewährt. Sie ermöglichen die Extraktion von 3D Meshes über Marching Cubes (Lorenson & Cline, 1987), die dann für Anwendungen wie Pfadplanung (Pütz et al., 2021) und Lokalisierung (Eisoldt et al., 2023) genutzt werden können. Im Kontext von LiDAR SLAM können TSDFs verwendet werden, um Einzelbilder in einer globalen Darstellung zu registrieren. Besonders für Navigation kann die euklidische Distanz von hoher Bedeutung sein, weshalb es auch Euclidian Signed Distance Fields (ESDFs) gibt. Jedoch brauchen diese mehr Rechenaufwand (M. Zhang et al., 2019) und benötigen demnach besondere Hardware Beschleunigung wie die Verwendung von GPUs (A. Millane et al., 2024), um die Rechenzeit unterhalb der Sensorfrequenz zu ermöglichen. ESDFs werden für einfacheres Berechnen häufig zusammen mit TSDFs (H. Oleynikova et al., 2017) oder Occupancy Grids (L. Han et al., 2019) verwendet.

Nach der Integration von neuen Punkten in TSDF oder ESDF, können diese nicht mehr räumlich transformiert werden, da die Gitter statisch sind, außer es werden alle Scans vereinzelt separat abgespeichert (Y. Zhang et al., 2022), was jedoch zu einem höheren Speicherverbrauch führt. Eine häufig verwendete Lösung ist demnach das Submapping (V. Reijgwart et al., 2020 und Y. Wang et al., 2021). Submaps gruppieren Scans basierend auf Metriken wie Nähe, Rotationunterschied oder einer festgesetzten Scananzahl. Bei der Verwendung von Verfahren zur Registrierung von Punktwolken wird davon ausgegangen,

dass der Posendrift innerhalb einer Submap gering ist und somit nur ganze Submaps nach Schleifenschluss transformiert werden müssen. Die globale Karte ist dabei implizit und wird meistens erst zur finalen 3D Mesh-Rekonstruktion verwendet.

Die meisten Datenstrukturen für TSDF, ESDF oder Occupancy Grid Daten sind Gitterbasiert und bestehen aus Octrees, Hashmaps oder Graphen. Eine bekannte Implementation mit Octrees ist Octomap (A. Hornung et al., 2013). Auf TSDF spezialisierte Implementationen sind Voxblox (Oleynikova et al., 2017) und VDBFusion (Vizzo et al., 2022). Voxblox verwendet eine Hash-Map, um signierte Distanzen zu speichern, während VDBFusion OpenVDB verwendet, das einen räumlichen Hash auf der obersten Ebene und eine Baumstruktur mit hohem Verzweigungsfaktor enthält. Darüber hinaus ermöglicht Voxblox die Konstruktion ESDFs aus ihren TSDF-Karten für eine genauere Rekonstruktion. Voxfield (Pan et al., 2022) erweitert Voxblox durch TSDFs, die mit geschätzten Oberflächennormalen berechnet werden, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen. Nvblox (Millane et al., 2024) ist eine weitere Variante, welche mit Unterstützung von GPUs auch ESDFs zu Echtzeit berechnen kann. Diese Systeme mit monolithischen Karten sind jedoch inkompatibel mit der Graphenoptimierung, um Drift zu kompensieren. Voxgraph und supereight verwenden Submaps, was das Schließen von Schleifen und die Optimierung des Graphen ermöglicht, wenn auch allerdings um den Preis eines höheren Speicherbedarfs durch Überlappung zwischen einzelnen Submaps.

Ein weiterer Ansatz für global konsistentes TSDF mapping ohne Submaps ist die Verwendung einer neuronalen impliziten Repräsentation wie in PIN-SLAM (Pan et al., 2024), welches neuronale Punkte trainiert, um eine Karte darzustellen. Es ist jedoch nicht für höhere TSDF Genauigkeiten <40cm anwendbar und hat deutlich höhere Hardwareanforderungen aufgrund der Verwendung eines GPUs. Dies ist der Fall für jedes neuronale Kartierungsverfahren wie auch NICE-SLAM (Zhu et al., 2022) und NICER-SLAM (Zhu et al., 2024).

Schleifenschlüsse können über verschiedene Methoden erfasst werden. Eine davon basiert auf Bildern wie in ORB-SLAM (Mur-Artal et al., 2015) und VINS-MONO (Mur-Artal et al., 2017), welche mit „bag-of-words“ lokale Features erfassen und diese in einer Bilder-Datenbank abspeichern. Auf Bilder basierende Methoden leiden jedoch unter Veränderung in der Belichtung oder Blickrichtung auf erfasste Features. Andere Methoden sind semantische oder geometrische Assoziationen mit Point-Pair Features (PPFs)

in SLAM++ (Salas-Moreno et al., 2013), TSDF-Volumen für Segmentierte Objekte in FUSION++ (McCormac et al., 2018) oder 3D semantische Graphen in SemanticLoop (Yu & Shen, 2022). Diese Methoden haben jedoch Probleme mit Sensorrauschen in Punktwolken und Odometrie, sowie Verdeckung segmentierter Objekte. Die in ScanContext (Kim & Kim, 2018) vorgestellte Methode entfernt sich demnach von der Objekterkennung durch das Speichern der maximalen Höhe von Punkten innerhalb von Zellen eines 2D Kreises mit inneren Ringen und Sektoren. Jeder solcher Scans speichert separat einen Lookup Key, welcher mithilfe eines K-D Baumes für Schleifenschlusserkennung verwendet wird. Die Speicherung der maximalen Höhe von Punkten führt zu Problemen innerhalb geschlossener Räume mit Decke, weshalb Normal Distribution Descriptors (NDDs) von Zhou et al. (2022) stattdessen die Normalverteilung der Punkte innerhalb der Zellen speichert.

Nach der Schleifenschlusserkennung können alle Posen innerhalb eines Posengraphen optimiert werden, wofür GTSAM (Dellaert & Kaess, 2017) und G²o (Kümmerle et al., 2011) bekannte Verfahren für inkrementelle Optimierung mittels Faktorgraphen sind.

CHAD TSDF verwendet Submapping mit komprimierten TSDF-Daten, um selbst im Vergleich mit monolithischen TSDF-Kartierungsverfahren insgesamt weniger Speicherplatz zu verbrauchen. Es basiert auf Octrees, dessen Knoten mittels Hashing derer gespeicherten Werte, statt der Position wie in VDBFusion, häufig wiederverwendet werden können. Das Submapping erlaubt Korrektur von Drift mithilfe von Schleifenschlusserkennung durch NDDs und Posengraphoptimierung mit iSAM2 von GTSAM. Die Implementierung läuft in Echtzeit mit einem CPU und benötigt keine zusätzliche Hardware, wie z.B. GPUs.

3 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die CHAD TSDF Datenstruktur und den kompletten Prozess der integration neuer Punktwolken und Odometrie (siehe Abb. 2).

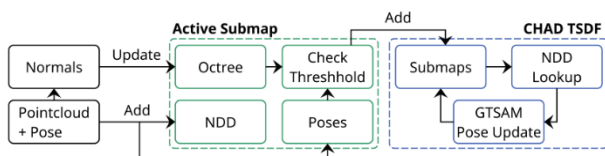


Abbildung 2 Übersicht über den Integrationsprozess neuer Punktwolken und Odometrie.

Kapitel 3.1 beschreibt die Schätzung der Oberflächennormalen und die generelle Integration von Punktwolken in die neueste Submap. Kapitel 3.2 erklärt die Konstruktion der NDDs aus den neu integrierten Punktwolken für die Schleifenschlusserkennung. In Kapitel 3.3 werden die Hashed Octrees der fertigen Submaps vorgestellt, welche den Kern des niedrigen Speicherverbrauchs bilden. Kapitel 3.4 erläutert das Prinzip hinter Submapping, sowie deren Einsatz in der Posengraphoptimierung nach einem erfolgreichem Schleifenschluss. Die letzten Kapitel 3.5 und 3.6 zeigen wie die Submaps zu einer globalen Karte zusammengefügt werden um zum Ende ein komplettes 3D Mesh rekonstruieren zu können (siehe Abb. 1).

3.1 Scan Integration

CHAD TSDF erwartet extern registrierte und gefilterte Punktwolken, sowie korrigierte Posenschätzung. Für die hier gezeigten Ergebnisse wurde DLIO (Chen et al., 2023) verwendet, welches aber durch andere LIO-Verfahren ersetzt werden kann. Die registrierten Punktwolken werden für die Schätzung von Oberflächennormalen nach ihrer Z-Order sortiert. Punkte innerhalb von Voxel mit steigender Diskretisierung werden hier als Nachbarn gezählt, bis eine parametrisierbare Anzahl an Nachbarn gefunden wurde. Bei zu vielen Punkten innerhalb von Voxel selbst mit der kleinsten Diskretisierung wird zufälliges Subsampling verwendet. Die Normalen werden durch die gefundenen Nachbarn geschätzt oder aus dem normalisierten Vektor vom Punkt zur Roboter Pose berechnet, falls nicht genügend Punkte in der Nachbarschaft gefunden wurden. Im Anschluss werden mittels Raycasting durch ein 3D Voxel Gitter die von jedem Punkt betroffenen Voxel ermittelt, jedoch begrenzt auf die gewählte Truncation der TSDF-Auflösung. Für jede dieser Zellen werden mithilfe der geschätzten Oberflächennormalen die Signed Distances berechnet. Außerdem speichert jede Zelle ein Gewicht, welches sich aus der Anzahl der beitragenden Punkte ergibt. Diese Gewichte werden verwendet, um gewichtete Mittelwerte der Signed Distances zu berechnen, was die Verfälschung durch Ausreißer in den Daten verhindert.

Das 3D Gitter, in welches diese neuen Punktwolken integriert werden, verwendet einen Octree ohne Hashing, da sich die Zellen mit hoher Wahrscheinlichkeit nach jedem Scan verändern.

3.2 NDD Konstruktion

Für jede integrierte Punktwolke wird ein passender Normal Distribution Descriptor (NDD) erstellt. Dessen Radius und die Anzahl der Ringe und Sektoren sind parametrisierbar. Jeder NDD speichert zusätzlich einen Lookup Key mit einer Größe gleich der Anzahl der Ringe. Dieser wird nur als grobe Schleifenschlusserkennung verwendet und im Anschluss durch Vergleiche der kompletten NDDs zweier Punktwolken verfeinert.

Unsere Implementation basiert auf den von Zhou et al. (2022) vorgestellten und öffentlich zugänglichen Quellcode mit Optimierungen der NDD Konstruktion und generell vereinfachter Matrizenoperationen für eine schnellere Laufzeit. Für mehr Informationen zu der Normalverteilung der einzelnen Zellen, sowie der Schleifenschlusserkennung, siehe die Arbeit der NDD Autoren.

3.3 CHAD TSDF Octrees

Neben dem bereits in Kapitel 3.1 erwähnten Octree ohne Hashing der Knoten besteht CHAD TSDF zum Großteil aus mehreren Hashed Octrees für 3D Gitter, jeweils zwei pro Submap. Jeder dieser Octrees speichert $D2I = (d_0, d_1, \dots, d_{20})$ Level an Tiefe. Einer der Octrees jeder Submap speichert die Signed Distances, der andere die Gewichte. Beide Octrees speichern Knoten und Blätter, die nach deren Inhalt, anstelle derer Position wie in VDBFusion, einen Hash berechnen und damit in eine Hashmap eingefügt werden. Dies erlaubt Wiederverwendung von Voxel in beliebiger Tiefe des Octrees (siehe Abb. 3).

Knoten speichern 32-bit Adressen zu Kinderknoten, während Blätter 64-bit Gruppen von entweder 8 Signed Distances oder 8 Gewichten abspeichern, jeweils diskretisiert auf 8 Bits. Der gespeicherte Datentyp ist für die Wiederverwendung von Blättern irrelevant, da die Hashes ohne Interpretation der Bit-Muster berechnet werden. Siehe Abb. 3 für eine Übersicht zur Wiederverwendung von Knoten und Blättern. Für Illustrationszwecke wurde hier ein 2D Quadtree verwendet. Jeder Knoten und jedes Blatt wird durch einen Index pro Tiefe adressiert und zeigt z.B., dass das Blatt mit Index 1 in Tiefe d_2 in 5 verschiedenen Knoten der Tiefe d_1 verwendet werden kann. Diese Wiederverwendung kann auch zwischen zwei verschiedenen Octrees stattfinden.

Um den 64-bit Hash eines Knotens zu erhalten werden alle validen Adressen zu Kinderknoten zu einem einzigen Hash Wert kombiniert. Die gespeicherten Daten der 64-bit Blätter können direkt als Hash verwendet werden.

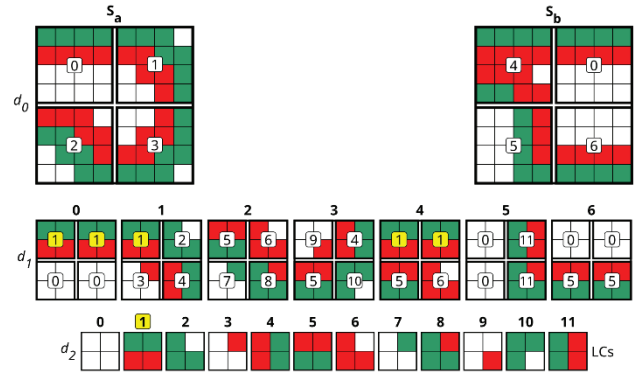


Abbildung 3 Wiederverwendung von Knoten (d_0 und d_1) und Blättern (d_2) eines Quadtrees für Illustrationszwecke, der Signed Distances speichert; jeweils rot und grün für negativ und positiv.

3.4 Submapping

CHAD TSDF speichert $S_n = (s_0, s_1, \dots, s_{n-1})$ Submaps mit einer wachsenden Anzahl n ohne festgelegte Grenze. Jede Submap S_n hat ein eigenes Koordinatensystem F_n mit f_0 als Repräsentation des globalen Koordinatensystems. Submaps speichern jeweils $P_c = (p_0, p_1, \dots, p_{c-1})$ Posen and $D_c = (d_0, d_1, \dots, d_{c-1})$ NDDs, wo c gleich der Anzahl der in diese Submap integrierten Punktwolken ist und sich nach der Fertigstellung einer Submap nicht mehr verändern kann. Der in Kapitel 3.1 erwähnte Octree ohne Hashing hat eine dynamische Anzahl c , bis dieser als Submap mit Hashed Octrees, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, abgespeichert wird. Dies geschieht nach dem Überschreiten einer parametrisierbaren euklidischen Distanz zwischen p_0 und p_{c-1} . Eine gemittelte Pose p_{mean}

$$p_{mean} = \frac{1}{c} \sum_{n=1}^c p_n \quad (1)$$

wird von allen gespeicherten Posen P_c berechnet und geht von nur minimalem Sensordrift zwischen den Posen aus. Die berechnete Pose p_{mean} kann demnach als Pose im GTSAM's iSAM2 Faktorgraph verwendet werden. Der 3D Vektor zwischen den jeweiligen p_{mean} von s_{n-1} und s_{n-2} wird als Constraint im Faktorgraph hinzugefügt. Wenn $s_{n-1} = s_0$, also $n = 1$, wird p_{mean} mittels Constraint an das globale Koordinatensystem geankert.

Nach Fertigstellung einer Submap werden alle NDDs und deren Lookup Keys innerhalb jener Submap verwendet, um nach Kandidaten für Schleifenschlüsse zu Suchen. Mehrere der NDDs zwischen zwei Submaps müssen eine Korrelation über einen parametrisierbaren Schwellwert haben, um als Schleifenschluss zu gelten. Wenn erfolgreich, wird ein Constraint im Posengraphen hinzugefügt und

iSAM2 führt eine Graphoptimierung durch, was die betroffenen Submap posen p_m transformiert.

3.5 TSDF-zu-TSDF Fusion

Mehrere Submaps können in eine einzige globale Karte fusioniert werden. Um TSDF-zu-TSDF Fusion der Voxel in Submaps s_a und s_b durchführen zu können, muss s_b vom Koordinatensystem f_b zu f_a transformiert werden. Da TSDFs auf festen Achsen der 3D Gitter gespeichert werden, können diese nicht auf triviale Weise transliert oder rotiert werden, ohne die festen Achsen zu beeinträchtigen.

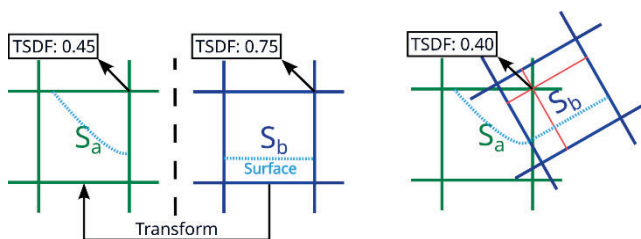


Abbildung 4 Fusion der TSDF Voxel von Submaps s_a und s_b mithilfe von trilinearere Interpolation der Voxel aus s_b .

Nach der Transformation von s_b sucht jeder Voxel in s_a nach bis zu 8 umliegenden Nachbarvoxeln von s_b . Mithilfe von trilinearere Interpolation können die umliegenden Voxel zu einem TSDF- und Gewichtswert interpoliert werden (siehe Abb. 4). Diese werden dann für die gewichtete lineare Interpolation mit dem Voxel aus s_a verwendet.

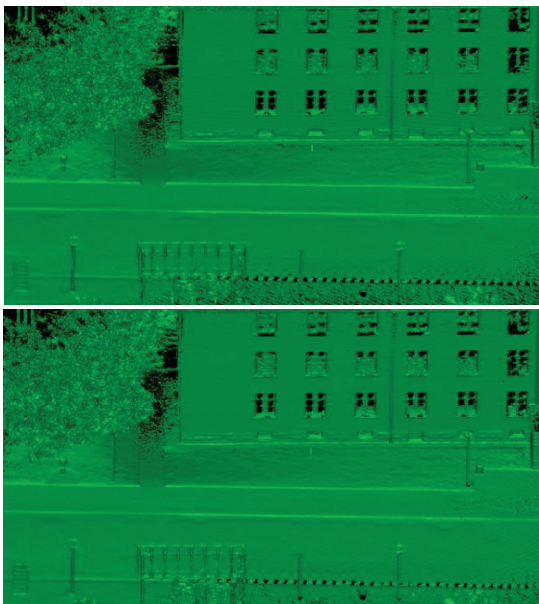


Abbildung 5 Rekonstruierte HSFDF Meshes von VDBFusion (oben) und CHAD TSDF (unten).

3.6 Mesh Rekonstruktion

Nach der Fusion der Submaps kann aus der entstandenen globalen Karte durch Marching Cubes ein 3D Mesh rekonstruiert werden. Sehr große Karten können optional in mehrere Meshes aufgeteilt werden. Dies erlaubt eine performantere Darstellung der Meshes mit Render-Tools mit Verwendung von dynamischem Culling. Plattformen mit unzureichendem Videospeicher im GPU werden nur vereinzelt Meshes darstellen müssen, was auch dort die Meshvisualisierung vereinfacht.

4 Ergebnisse

Für die Evaluation wird ein qualitativer Vergleich der rekonstruierten Meshes zwischen VDBFusion und CHAD TSDF durchgeführt, um die auf 8 Bits diskretisierten Signed Distances in Anbetracht sichtbarer Unterschiede zu vollen 32 Bits aus VDBFusion zu untersuchen. Außerdem wird für die quantitative Evaluation ein Vergleich im Speicherverbrauch durchgeführt, da CHAD TSDF trotz der Wiederverwendung von Knoten überlappende Submaps verwendet, statt einer einzigen monolithischen Karte in VDBFusion. Als Datensatz werden die MulRan Sequenzen (Kim et al., 2020) verwendet, worin großflächige Aufnahmen mit einem OS1-64 LiDAR bei einer Auflösung von 1024x24 mit 10 Hz aufgenommen wurden. Die ausgewählten Sequenzen aus dem MulRan Datensatz sind *Riverside01*, *DCC01*, *KAIST01* und *Sejong01*. Diese sind in der Aufzählung nach Länge der Gesamtstrecke sortiert, wo *Riverside01* eine 4 km und *Sejong01* eine 23,4 km Autofahrt beinhaltet. Alle Sequenzen haben großflächige Schleifenschlüsse. Zusätzlich zu dem MulRan Datensatz haben wir vom Campus der Hochschule Fulda eine Aufnahme mit einem Ouster OS0-128 LiDAR bei einer Auflösung von 128x1024 mit 10 Hz verwendet.

Zusätzlich zu dem MulRan Datensatz haben wir vom Campus der Hochschule Fulda eine Aufnahme mit einem Ouster OS0-128 LiDAR bei einer Auflösung von 128x1024 mit 10 Hz verwendet. Dieser hat eine deutlich reduzierte Geschwindigkeit im Vergleich zu den MulRan Sequenzen, da dieser zu Fuß über 3,5 km aufgenommen wurde. Die niedrige Geschwindigkeit sowie zahlreiche Schleifenschlüsse auf kurzer Strecke sind ein großer Nachteil für Submapping verfahren und soll demnach besonders im Speicherplatzvergleich für CHAD TSDF herausfordernd sein. Für alle Experimente wurde eine Signed Distance von 5 cm und Truncation von 10 cm verwendet. Beide TSDF-Kartierungsverfahren liefen zur Echtzeit. Punktwolken wurden mit DLIO registriert.

Tabelle 1 Vergleich des Speicherplatzverbrauches von VDBFusion, CHAD TSDF und der rohen Punktwolke.

Speicher (GiB)	Riverside01	DCC01	KAIST01	Sejong01	HSFD
VDBFusion	40,10	39,14	46,72	126,84	14,01
CHAD TSDF	3,87	4,80	5,46	13,21	7,22
Punktwolke	1,94	2,47	3,31	9,56	28,77

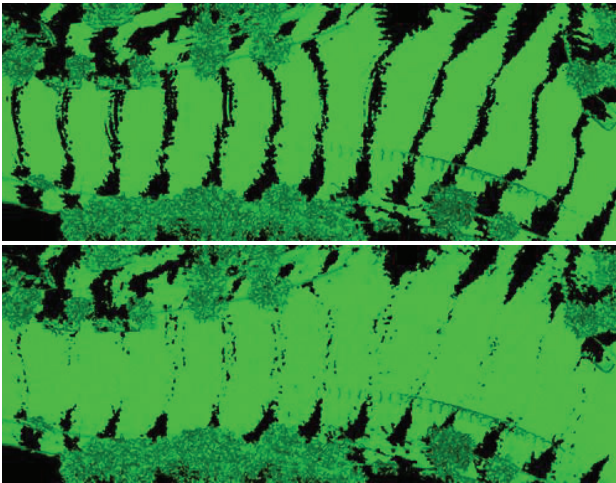
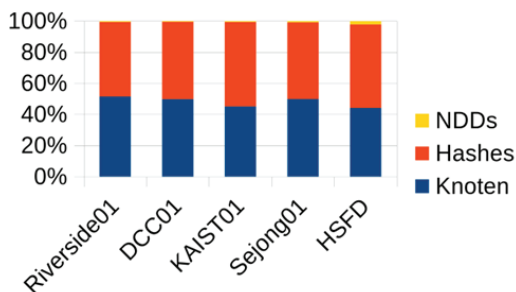
**Abbildung 6** Rekonstruierte *DCC01* Meshes von VDBFusion (oben) und CHAD TSDF (unten).

Abb. 5 zeigt einen Abschnitt der rekonstruierten Meshes von VDBFusion und CHAD TSDF mit dem Hochschule Fulda Datensatz (HSFD). Trotz der Verwendung von auf 8 Bits diskretisierte Signed Distances gibt es keine visuell auffällige Verschlechterung in der Qualität der Meshes. Die Verwendung von geschätzten Oberflächennormalen erlaubt CHAD TSDF jedoch besonders in Regionen mit niedriger Punktdichte mehr Oberflächen zu rekonstruieren. Im Mesh von *DCC01* ist die Punktdichte aufgrund hoher Fahrtgeschwindigkeit des Fahrzeuges noch niedriger, wo sich der Effekt der besseren Ausfüllung der Oberflächen ausgeprägter zeigt (siehe Abb. 6). Tabelle 1 zeigt den Speicherplatzverbrauch in jedem Datensatz.

**Abbildung 7** Relativer Speicherplatzverbrauch der größten CHAD TSDF Komponenten in jedem Datensatz.

Die Wiederverwendung von Knoten sorgt bei CHAD TSDF zu einer enormen Reduktion in Speicherverbrauch in allen Fällen, selbst bei *HSFD*, wo es dichte Punktwolken mit starken Überlappungen zwischen Submaps gibt. Der größere Speicherplatzverbrauch der rohen Punktwolken in *HSFD* lässt sich durch die höhere Auflösung des verwendeten Scanners erklären, was zu einer dichteren Punktwolke, aber nicht zu mehr Speicherplatzverbrauch bei TSDF-Verfahren führt. Um die Speicherverteilung zu messen wurden die größten Komponenten von CHAD TSDF analysiert (siehe Abb. 7), wo die relative Verteilung zwischen NDDs, Knoten und den Hashes von Interesse ist. NDDs sind hier sehr speichersparend. Hashes verbrauchen mehr Speicherplatz in Datensätzen mit komplexeren Oberflächen, aber sind dennoch im Durchschnitt ähnlich der gespeicherten Knoten.

5 Fazit & Ausblick

Trotz der Diskretisierung der Signed Distances auf 8 Bits hat CHAD TSDF eine visuell mit VDBFusion vergleichbare Qualität der Meshes und spart dabei enorm Speicher durch die Wiederverwendung von Knoten der Octrees. Zusätzlich bietet es die Möglichkeit für Schleifenschlüsse durch NDDs und Posengraphoptimierung mit GTSAM und ist somit besonders für großflächige Anwendungsfälle geeignet. Zukünftige Arbeit wird die Speicherung von Farbwerten und Fusionierung der Submaps zur Laufzeit implementieren.

Literaturverzeichnis

- Besl, P. J. & McKay N. D. (1992): Method for registration of 3-d shapes. Sensor fusion IV: control paradigms and data structures vol. 1611, International Society for Optics and Photonics, pp. 586-606.
- Borrmann D., Elseberg J., Lingemann K., Nüchter A. & Hertzberg J. (2008): Globally consistent 3d mapping with scan matching. Robotics and Autonomous Systems, vol. 56, no. 2, pp. 198-205.
- Careil V., Milleter M. & Eisemann E. (o.J.), Interactively modifying compressed sparse voxel representations. Computer Graphics Forum, vol. 39, no. 2, pp. 111-119.

- Chen K., Nemiroff R. & Lopez B. T. (2023): Direct lidar-inertial odometry: Lightweight lio with continuous-time motion correction. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* pp. 3983–3989, 2023
- Eisoldt M., Gaal J., Wiemann T., Flottmann M., Rothmann M., Tassemeier M. & Porrman M. (2022): A fully integrated system for hardware-accelerated tsdf slam with lidar sensors (hatsdf slam). *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 156.
- Eisoldt M., Mock A. Porrman M. & Wiemann T. (2023): Towards 6d mcl for lidars in 3d tsdf maps on embedded systems with gpus. *Seventh IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, IEEE, pp. 158-165.
- Gaal J., Wiemann T., Mock A. & Porrman M. (2023): Featsense-a feature-based registration algorithm with gpu-accelerated tsdf-mapping backend for nvidia jetson boards. *Seventh IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, IEEE, pp. 198-205.
- Hornung A., Wurm K. M., Bennewitz M., Stachniss C. & Burgard W. (2013): Octomap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*.
- Iyadi S., Kim D., Hilliges O., Molyneaux D., Newcombe R., Kohli P., Shotton J., Hodges S., Freeman D. & Davison A. (2011): Kinectfusion: real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera. *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 559-568.
- Kim G., Choi S. & Kim A. (2021): Scan context++: Structural place recognition robust to rotation and lateral variations in urban environments. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 3, pp. 1856–1874, 2021.
- Kim G. & Kim A. (2018): Scan Context: Egocentric Spatial Descriptor for Place Recognition Within 3D Point Cloud Map. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain, 2018, pp. 4802-4809.
- Kim G., Park Y. S., Cho Y., Jeong J. & Kim A. (2020): Mulran: Multimodal range dataset for urban place recognition. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, pp. 6246-6253.
- Lauterbach C., Garland M., Sengupta S., Luebke D. & Manocha D. (2009): Fast bvh construction on gpus. *Computer Graphics Forum*, vol. 28, no. 2, pp. 375-384.
- Lorensen W. E. & Cline H.E. (1987): Marching Cubes: A High Resolution 3d Surface Construction Algorithm. in *ACM SIGGRAPH*.
- Oleynikova H., Taylor Z., Fehr M., Siegwart R. & Nieto J. (2017): Voxblox: Incremental 3d Euclidian signed distance fields for on-board mav planning. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- Pan Y., Zhong X., Wiesmann L., Posewsky T., Behley J. & Stachniss C. (2024): PIN-SLAM: LiDAR SLAM Using a Point-Based Implicit Neural Representation for Achieving Global Map Consistency. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 40, pp. 4045-4064.
- Pütz S., Wiemann T., Piening M. K. & Hertzberg J. (2021): Continuous shortest path vector field navigation on 3d triangular meshes for mobile robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, pp. 2256-2263.
- Segal A, Haehnel D. & Thrun S. (2009): Generalized icp. *Robotics: science and systems*, vol. 2, no. 4, Seattle, WA, p. 435,
- Vizzo I., Guadagnino T., Behley J. & Stachniss C. (2022): VDBFusion: Flexible and efficient tsdf integration of range sensor data. *Sensors*, vol. 22, no. 3.
- Whelan T., Kaess M., Fallon M., Johannsson H., Leonard J. & McDonald J. (2012): Kintinuous: Spatially extended kinectfusion. *Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory Technical Report*.

Kombinierter Einsatz von künstlicher Intelligenz und Time-Lapse-Photogrammetrie für die robuste Epochenregistrierung im geomorphologischen Monitoring

Paul Hindorf¹

Zusammenfassung

Das hochfrequente Monitoring geomorphologischer Veränderungen ist essenziell für das Verständnis von Erdoberflächendynamiken. Time-Lapse-Photogrammetrie hat sich als flexible Methode zur Erfassung hochfrequenter 3D-Zeitreihen etabliert, steht jedoch vor der Herausforderung der hochgenauen Registrierung aller Epochen in ein gemeinsames Koordinatensystem. Deep-Learning basierte Bildmatching Methoden sind in der Lage auch unter großen radiometrischen Unterschieden robuste Bildpunktzuordnungen zu bestimmen und damit Passpunkte zu ersetzen. Für die Auswertung von längeren Bildzeitreihen wird daher untersucht, welche Bildmatchingstrategie geeignet ist, um zeitlich stabile Rekonstruktionen zu erzeugen. Es wird gezeigt, dass eine einfache sequenzielle Strategie geeignet ist, sowohl eine effiziente Auswertung als auch eine zeitlich stabile Rekonstruktion zu erzeugen.

Schlagwörter Time-Lapse-Photogrammetrie · Geomorphologisches Monitoring · Deep-Image-Matching

1 Einleitung

Geomorphologisches Monitoring, also die systematische Überwachung der Erdoberfläche, spielt in den Geowissenschaften eine zentrale Rolle bei der Untersuchung von Veränderungsprozessen, wie Küstenerosion (Anders et al., 2019), Bodenerosion (Eltner et al., 2017), Hangrutschungen (Anders et al., 2022; Hendrickx et al., 2025; Winiwarer et al., 2023) oder Gletscherdynamiken (Ioli et al., 2024). Hochfrequente 3D-Zeitreihen liefern dabei die Grundlage zur detaillierten Beschreibung der Prozesse und damit dem Verständnis der Zusammenhänge zwischen geomorphologischen Veränderungen und den zugrunde liegenden Einflüssen sowie der Entwicklung von Strategien zum Naturgefahrmanagement.

Traditionell wird hierfür Terrestrisches-Laser-Scanning (TLS) eingesetzt. Zwar liefern TLS-Zeitreihen hochpräzise Punktwolken, diese sind aber auch mit erheblichen Nachteilen wie hohen Anschaffungskosten und anspruchsvoller Sensorinstallation verbunden, was den flächendeckenden und langfristigen Einsatz, insbesondere in entlegenen Gebieten, einschränkt (Blanch et al., 2024; Ioli et al., 2024). Als flexibler und ökonomischerer Ansatz hat sich daher Time-Lapse-Photogrammetrie basierend auf der Analyse von Bildsequenzen etabliert (Eltner et al., 2017; James & Robson, 2014; James et al., 2017).

Für die Veränderungsanalyse in multitemporalen Datensätzen ist die Registrierung aller Epochen in ein gemeinsames stabiles Koordinatensystem von entscheidender Bedeutung. Beim Einsatz von Time-Lapse-Photogrammetrie, insbesondere wenn die Stabilität des Kamerasetups nicht garantiert werden kann, erfolgt die Registrierung zumeist durch Passpunkte mit bekannten globalen Koordinaten (Westoby et al., 2012; Eltner et al., 2017; Ulm et al., 2025). Instabilitäten oder Unsicherheiten in den meist mit GNSS bestimmten Passpunktkoordinaten und Unsicherheiten in den Bildmessungen führen häufig dazu, dass eine nachträgliche Feinregistrierung der Punktwolken, z.B. mittels Iterative-Closest-Point (ICP), vergleichbar zu Ansätzen unter Verwendung von TLS, zur Veränderungsdetektion notwendig ist (Ulm et al., 2025; Cucchiaro et al., 2020). Akkumulierende oder große geometrische Veränderungen zwischen den Epochen reduzieren allerdings die Qualität der ICP-Feinregistrierung.

Eine weitere Alternative zur Registrierung der Epochen ist die Verwendung von epochenübergreifenden Bildpunktzuordnungen und gemeinsame Auswertung mehrerer Epochen. Insbesondere die Verwendung klassischer Bildpunktmatching-Methoden, wie beispielsweise SIFT, stößt dabei aufgrund von radiometrischen Unterschieden zwischen den Epochen, durch wechselnde Lichtverhältnisse, Witterungseinflüsse oder anderen Veränderungen in der

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland, E-Mail: paul.hindorf@tu-dresden.de

Szene, an Grenzen (Ioli et al., 2024; Morelli et al., 2024). Stattdessen werden Epochen meist nur einzeln ausgewertet.

Im Gegensatz dazu sind Deep-Learning basierte Bildmatcher auch in der Lage gute Zuordnungen in Bildern mit geringer Qualität und großen radiometrischen Unterschieden zu bestimmen (Morelli et al., 2024). Um die beschriebenen Probleme bei der Registrierung zu umgehen, wird eine Strategie entwickelt, um Deep-Learning basierte Algorithmen zur Bildpunktzuordnung zu verwenden, um auch zwischen den Epochen robuste Merkmalskorrespondenzen zu bilden. Die Registrierung der Epochen ist damit auch ohne hochgenaue Passpunkte möglich.

Dazu wird der einfache Ansatz verfolgt, alle Epochen gemeinsam auszuwerten. Entsprechend wird eine Bildmatchingstrategie benötigt, um Bildpunktzuordnungen sowohl innerhalb als auch zwischen den Epochen effizient zu bestimmen, insbesondere da das Bildmatching einen der zeitaufwändigsten Schritte bei Structure-from-Motion Auswertungen darstellt (Jiang et al., 2020). Die für Structure-from-Motion gebräuchlichsten Strategien sind dabei Brute-Force-Matching, für kleinere Bildverbände, sowie die Bildpaarsuche basierend auf der Bildähnlichkeit oder überlappenden Aufnahmestandpunkten (Hartmann et al., 2016). Beide Ansätze führen aufgrund der Größe des Bildverbands und der Aufnahmestandpunkte und damit verbundener hoher visueller und räumlicher Ähnlichkeit zwischen allen Bildpaaren zu einem großen Matchingaufwand.

Eine einfache Alternative ist das sequenzielle Matching unter Verwendung der Zeitreiheninformation, wobei Bildpaare nur innerhalb eines zeitlichen Fensters ausgewertet werden. Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob trotz einfacher Bildmatchingstrategie eine sowohl effiziente als auch zeitlich stabile Rekonstruktion möglich ist.

2 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchung erfolgte am Beispiel der Aufnahme eines subarktischen Flussufers in Finnland (Abb. 1), das durch komplexe Stratigraphie und aktive Erosionsprozesse geprägt ist (Lotsari et al., 2020). Das Flussufer wird durch vier Wildkameras, mit Bildaufnahmen alle 2-Stunden, aufgenommen. Die Positionen und Orientierungen der an Bäumen montierten Wildkameras variieren zeitlich leicht. Zur Registrierung der Aufnahmeepochen sind zusätzlich sechs Passpunkte in der Szene verteilt.

3 Methodik

Da für das untersuchte Gebiet Referenzwerte für die Kamerapositionen und -orientierungen unbekannt sind, werden stattdessen basierend auf der realen Szene synthetische Beispieldatensätze mithilfe des in Abs. 3.1 beschriebenen Verfahrens generiert und anschließend zur Bewertung der zeitlichen Stabilität der Rekonstruktionen verwendet.



Abbildung 1 Beispielhafte Aufnahmen des Flussufers. Änderungen der Lichtverhältnisse (oben links zu oben rechts), Umwelteinflüsse wie Nebel (unten rechts) oder Bildartefakte (unten links) erschweren die Bildpunktzuordnung mit SIFT aufgrund der radiometrischen Unterschiede.

3.1 Synthetische Datengenerierung

Zur Erzeugung der synthetischen Daten werden ausgehend von einer realen Rekonstruktion synthetische Epochen erzeugt und Beobachtungsdaten, Merkmalspunkte- und Zuordnungen generiert (Abb. 2). Grundlage bilden sowohl die Kamerapositionen-, orientierungen und Intrinsiken sowie die rekonstruierte dichte Punktwolke.

Um Erosions- und Sedimentationsprozesse zu simulieren, werden iterativ zufällige Veränderungen an der Punktwolke vorgenommen. Dazu wird jeweils ausgehend von einem zufälligen Startpunkt mittels Region-Growing eine Punktmenge in der Nachbarschaft ausgewählt und entlang der lokalen Punktnormalen mit einer zufälligen, zum Rand der Punktmenge abnehmenden, Magnitude deformiert. Um mit dieser Methode realistische und komplexe Veränderungen in der Punktwolke zu erzeugen, die den natürlichen (meist diskreten) Erosions- und Sedimentationsprozessen ähneln, wird das Region-Growing in zufällige Richtungen durchgeführt, wodurch den realen Veränderungen entsprechende unregelmäßige Umrisse der Deformationen

entstehen. Auf diese Weise werden für jede Epoche des synthetischen Datensatzes Punktwolken mit akkumulierenden Veränderungen generiert, wobei die mittlere Veränderungsrate durch die Anzahl der Veränderungen und dem Punktvolumen der Punktgruppen variiert werden kann.

Als Grundlage für die Projektion der Punktwolken in den Bildraum und die Generierung der Bildmessungen werden die Kamerapositionen- und orientierungen ausgehend von der realen Rekonstruktion zufällig um wenige Zentimeter, bzw. grad, verändert, um die Instabilität der Kameraaufhängung an beweglichen Bäumen zu simulieren. Auf dieselbe Weise werden auch die Intrinsiken, Bildhauptpunkt und Verzeichnungen, variiert. Die Kamerakonstante wird dagegen als bekannt und konstant vorausgesetzt. Eine hochgenaue Bestimmung der Kamerakonstante aus den simulierten Daten ist aufgrund der geringen Tiefenvariation, und damit verbundener Korrelation zwischen Tiefenkoordinate und Kamerakonstante, nur eingeschränkt möglich. Um eine fehlerhafte Skalierung der Ergebnisse zu vermeiden, muss daher auf die Mitbestimmung der Kamerakonstante verzichtet werden.

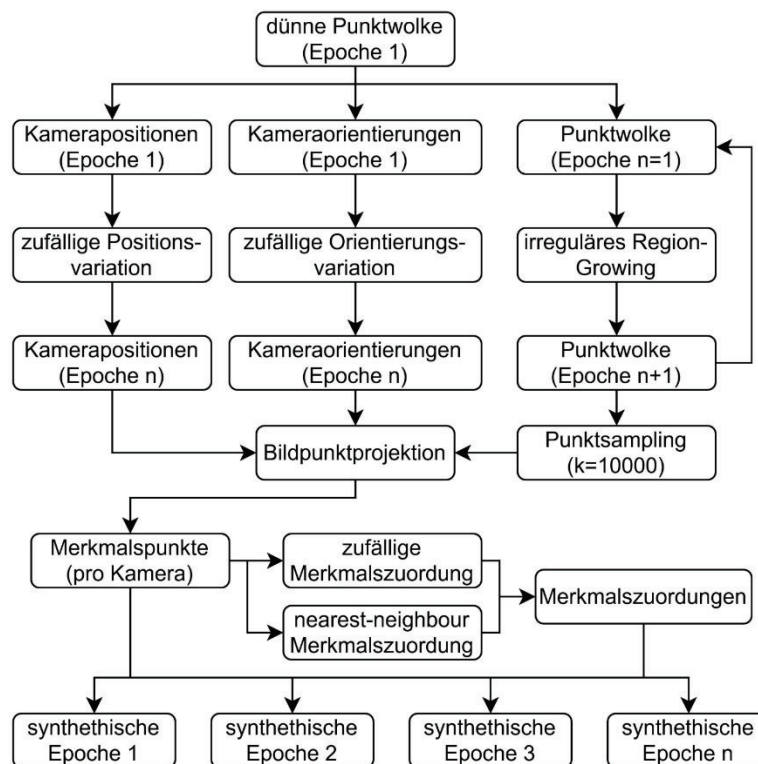


Abbildung 2 Ablauf der Generierung der synthetischen Daten. Ausgehend von einer realen Rekonstruktion werden iterativ Änderungen an dem Kamera-Setup und der Punktwolke vorgenommen und synthetische Beobachtungen generiert.

Anschließend werden die epochenweisen Punktwolken in die simulierten Kameras zu Bildpunkten projiziert. Um

eine ausreichende Überlappung der Bildpunkte zwischen den Epochen zu gewährleisten, werden dazu 10000 zufällige

Punkte je Epoche aus der Punktwolke ausgewählt, wobei zwei Drittel der Punkte mit der Auswahl der vorherigen Epoche übereinstimmen. Diese projizierten Bildmessungen werden abschließend mit gaußischem Rauschen gestört, um eine realistische Bildmessgenauigkeit zu erhalten, und entsprechen den Bildpunkten des Feature-Matchings.

Die simulierten Bildpunkte werden zuletzt mithilfe zufälliger Bildpunktzuordnungen zu Feature-Tracks verknüpft. Dazu wird zunächst eine Teilmenge der übereinstimmenden Bildpunkte innerhalb eines Bildpaares als valide Bildpunktzuordnungen ausgewählt. Zusätzlich zu den validen Zuordnungen werden Ausreißer generiert. Dazu werden Bildpunkte einem zufälligen nächsten Nachbarn im jeweils anderen Bild zugeordnet.

Die so generierten synthetischen Daten entsprechen den Ergebnissen der Merkmalszuordnung und werden als Grundlage für die Bewertung der Matchingstrategie verwendet.

3.2 Parameterbestimmung

Die zur Generierung der synthetischen Daten notwendigen Parameter der Bildpunktgenauigkeit und dem Anteil valider und invalider Merkmalszuordnungen werden mithilfe einer realen Rekonstruktion des Untersuchungsgebiets bestimmt.

Anhand der Referenzrekonstruktion werden die rohen Bildpunktzuordnungen erneut geometrisch verifiziert, zunächst anhand der Epipolargeometrie und dem Abstand zur Epipolarlinie.

Da nach der Filterung der Bildpunktzuordnungen in nur zwei Bildern weiterhin fehlerhafte Zuordnungen erhalten bleiben können, werden im zweiten Schritt die verbleibenden Bildpunktzuordnungen zu Feature-Tracks verknüpft und mithilfe einer robusten Feature-Track Validierung geprüft (Schönberger & Frahm, 2016). Dazu werden iterativ mittels RANSAC zusammenhängende Sub-Feature-Tracks ohne signifikante Ausreißer in den Rückprojektionsfehlern gefunden. Dieser Prozess wird iterativ auf den verbleibenden Bildmessungen eines Objektpunkte so lange durchgeführt, bis alle Bildpunkte einer Untermenge zugeordnet wurden oder kein Objektpunkt mit geringen Rückprojektionsfehlern mehr trianguliert werden kann.

Die so bestimmten zusammenhängenden Untermengen der Feature-Tracks werden als validierte Feature-Tracks betrachtet. Mithilfe der validierten Feature-Tracks können anschließend die Bildpunktzuordnungen erneut validiert werden: Nur Zuordnungen, die zu demselben Feature-Track gehören sind valide, alle anderen Ausreißer.

Tabelle 1 Anteil der validen und fehlerhaften Bildpunktzuordnungen innerhalb und zwischen den Epochen. Insgesamt ist der Anteil der validen Bildpunktzuordnungen für die untersuchte Szene mit SIFT höher als mit Superpoint und Lightglue,

Im zweiten Schritt werden die validierten Feature-Tracks auch zur Bestimmung der Bildmessgenauigkeit verwendet. Dazu werden die Feature-Tracks zu Objektpunkten trianguliert und die mittleren Rückprojektionsfehler bestimmt.

4 Ergebnisse

Die anschließende Auswertung erfolgt mithilfe einer hybriden Structure-from-Motion Pipeline.

4.1 Parameter der Datengenerierung

Zur Validierung der Referenzrekonstruktion werden zunächst die Rückprojektionsfehler der Passpunkte, als bekannte und validierte Bildpunkte- und zuordnungen, betrachtet. Dazu wird die Rekonstruktion zunächst ohne die Verwendung von zwei der sechs Passpunkte durchgeführt und anschließend der Rückprojektionsfehler bestimmt. Da die Genauigkeit der Objektkoordinaten der Passpunkte gering ist, werden diese mithilfe der rekonstruierten Kameras mitbestimmt, wobei die GNSS-Positionen nur als Näherungswerte dienen. Der mittlere Rückprojektionsfehler der zurückgehaltenen Passpunkte liegt mit 1.2 ± 0.6 Pixeln im Bereich der Messgenauigkeit der Passpunkte sowie über alle Epochen hinweg in derselben Größenordnung wie die Rückprojektionsfehler der weiteren Passpunkte. Es wird also angenommen, dass die Rekonstruktion sowohl räumlich als auch zeitlich stabil ist und für die Validierung der Bildpunktzuordnungen verwendet werden kann.

Tabelle 1 zeigt die Anteile der validen Bildpunktzuordnungen im Vergleich der Methoden SIFT und Superpoint mit Lightglue. Während der Anteil der validen Zuordnungen mit SIFT im Allgemeinen höher ist, liegt die absolute Anzahl mit durchschnittlich 104 gefundenen validen Zuordnungen mit SIFT zu 715 mit Lightglue deutlich niedriger. Die Vorteile Deep-Learning basierter Bildmatching Methoden zeigen sich insbesondere bei Betrachtung der Verteilung der validen Anteile über alle Bildpaare hinweg. Während mit Lightglue für alle Bildpaare ausreichend valide Matches für die geometrische Verifizierung und die Bestimmung von Feature-Tracks vorhanden sind, wurden mit SIFT für epochenübergreifende Bildpaare in 17% der Fälle weniger als 10% valide Matches, in 5% der Fälle sogar keine validen Matches gefunden (siehe Tabelle 2). Aus diesem Grund ist es mit SIFT für die Bildpunktzuordnung nicht möglich alle Epochen gemeinsam auszuwerten.

wobei der Anteil für epochenübergreifende Bildpaare in beiden Fällen aufgrund der radiometrischen Veränderungen in den Bildern geringer ist.

Matching-Methode	Anteil valide [%]		
	Insgesamt	Innerhalb Epochen	Zwischen Epochen
Superpoint+Lightglue	32	38	31
SIFT	48	71	45

Tabelle 2 Anteil der Bildpaare mit wenigen validen Bildpunktzuordnungen innerhalb und zwischen den Epochen. Während mit Superpoint und Lightglue für alle Bildpaare ausreichend valide Matches gefunden werden, schlägt das Matching mit SIFT für epochenübergreifende Bildpaare häufiger fehl.

Matching-Methode	Anteil Bildpaare 0% valide [%]		Anteil Bildpaare <10% valide [%]	
	Innerhalb Epochen	Epo- chen	Innerhalb Epochen	Zwischen Epochen
Superpoint+Lightglue	0	0	0	0
SIFT	0	5	0	17

Im Folgenden werden daher die bestimmten Parameter für Superpoint und Lightglue für die Erzeugung der synthetischen Datensätze verwendet.

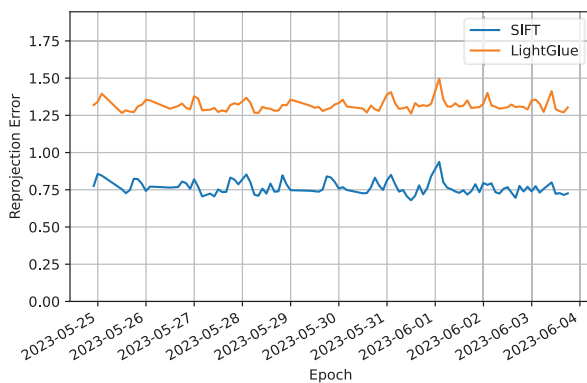


Abbildung 3 Mittlere Rückprojektionsfehler je Epoche im Vergleich zwischen Superpoint und Lightglue sowie SIFT

Zur Bestimmung des Parameters der mittleren Bildmessgenauigkeit werden wie beschrieben die validierten Feature-Tracks zu Objektpunkten trianguliert und die Rückprojektionsfehler bestimmt. Der mittlere Rückprojektionsfehler mit Superpoint für die Detektion und Lightglue für die Zuordnung von Bildpunkten liegt mit durchschnittlich 1.3 ± 0.7 Pixeln erwartungsgemäß über den Werten von 0.8 ± 0.6 Pixeln bei Verwendung von SIFT mit subpixelgenauer

Bildpunktdetektion. Da die Bildmessgenauigkeit in beiden Fällen näherungsweise konstant über alle Epochen bleibt werden im Folgenden die Mittelwerte für die Generierung der synthetischen Szenen verwendet (Abb. 3).

4.2 Stabilität der Rekonstruktion

Zur Bewertung der zeitlichen Stabilität der Rekonstruktionen werden zusätzlich zu den synthetischen Bildmessungen, weitere Bildmessungen für synthetische Passpunkte in den Bildern der ersten Epoche generiert. Für die erzeugten Rekonstruktionen werden anschließend mithilfe der Passpunkte der ersten Epoche und Perspective-n-Point Algorithmus der nicht zentralperspektiven Kamera Registrierungsparameter bestimmt und die gesamte Rekonstruktion transformiert. Anschließend werden die rekonstruierten Kamerapositionen- und orientierungen mit den synthetischen Referenzwerten verglichen. Eine zeitliche Instabilität, bzw. Drift, der Rekonstruktion würde sich entsprechend als ansteigender Positions- bzw. Orientierungsfehler zeigen.

Abb. 4 zeigt die über die gemittelten Positions- und Orientierungsfehler mit zeitlichen Matchingfenster von 12 Stunden. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Abweichungen lässt sich ableiten, dass die Rekonstruktion zeitlich stabil ist, wobei dasselbe Ergebnis bereits ab einem zeitlichen Fenster von 10 Stunden erzielt wird.

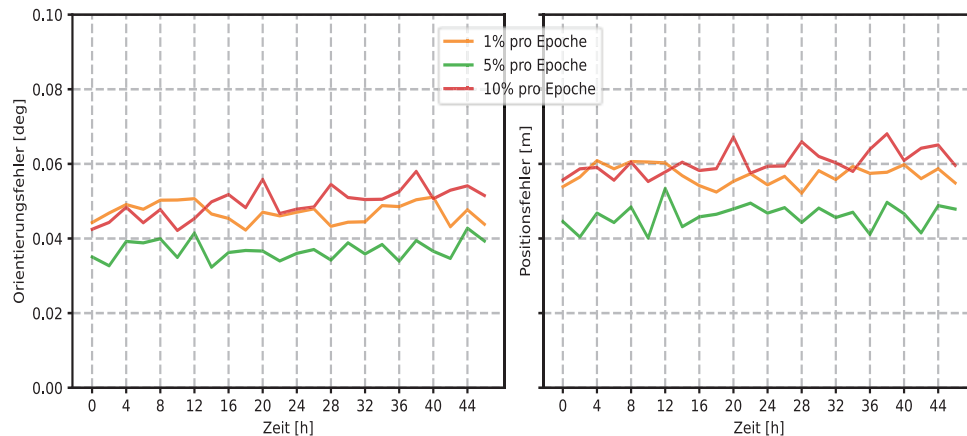


Abbildung 5 Orientierungs- und Positionsfehler je Epoche der SfM-basierten Rekonstruktion verschiedener synthetischer Beispielszene

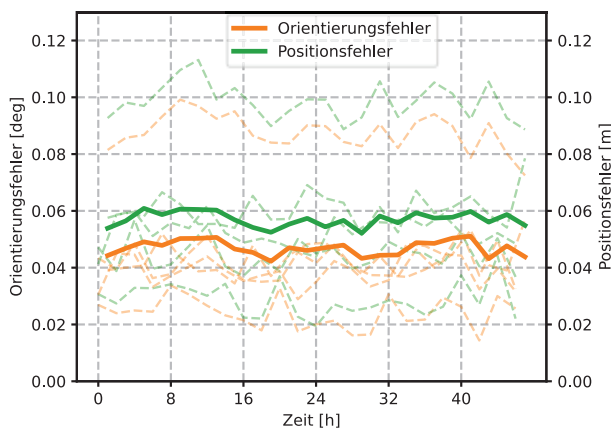


Abbildung 4 Orientierungs- und Positionsfehler je Epoche der SfM-basierten Rekonstruktion verschiedener synthetischer Beispielszenen.

Abb. 5 zeigt die Ergebnisse im Vergleich zwischen der realen Änderungsrate von etwa 1% je Epoche sowie höheren Änderungsraten. Während bei 5% Änderungsrate die Abweichungen stabil bleiben, steigt der Fehler bei 10% Szenenänderung je Epoche mit zunehmender Zeit an.

5 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Integration von Deep-Learning-Methoden und die damit ermöglichte epochenübergreifende photogrammetrische Auswertung von Bildzeitreihen die Abhängigkeit von Passpunkten für die hochgenaue Registrierung der Epochen reduziert werden kann. Unter der Annahme geringer mittleren Veränderungen zwischen den Epochen lässt sich auch mit der einfachen sequentiellen Bildmatchingstrategie eine zeitlich stabile Rekonstruktion erzeugen.

Literaturverzeichnis

- Anders, K., Winiwarter, L., Schröder, D., & Höfle, B. (2022). Integration of Kalman Filtering of near-continuous Surface Change Time Series into the Extraction of 4D objects-by-change. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022, 973–980. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-973-2022>
- Blanch, X., Guinau, M., Eltner, A., & Abellan, A. (2024). A cost-effective image-based system for 3D geomorphic monitoring: An application to rockfalls. *Geomorphology*, 449, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109065>
- Cucchiario, S., Maset, E., Cavalli, M., Crema, S., Marchi, L., Beinat, A., & Cazorzi, F. (2020). How does co-registration affect geomorphic change estimates in multi-temporal surveys? *GIScience & Remote Sensing*, 57(5), 611–632. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1763048>
- Eltner, A., Kaiser, A., Abellan, A., & Schindewolf, M. (2017). Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(14), 2240–2253. <https://doi.org/10.1002/esp.4178>
- Hartmann, W., Havlena, M., & Schindler, K. (2016). Recent developments in large-scale tie-point matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.09.005>

- Hendrickx, H., Elias, M., Blanch, X., Delaloye, R., & Eltner, A. (2025). AI-based tracking of fast-moving alpine landforms using high-frequency monoscopic time-lapse imagery. *Earth Surface Dynamics*, 13(4), 705–721. <https://doi.org/10.5194/esurf-13-705-2025>
- Ioli, F., Dematteis, N., Giordan, D., Nex, F., & Pinto, L. (2024). Deep Learning Low-cost Photogrammetry for 4D Short-term Glacier Dynamics Monitoring. *PGF – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 92(6), 657–678. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00272-w>
- James, M. R., & Robson, S. (2014). Sequential digital elevation models of active lava flows from ground-based stereo time-lapse imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.011>
- James, M. R., Robson, S., & Smith, M. W. (2017). 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(12), 1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- Jiang, S., Jiang, C., & Jiang, W. (2020). Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 167, 230–251. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.016>
- Lotsari, E., Hackney, C., Salmela, J., Kasvi, E., Kemp, J., Alho, P., & Darby, S. E. (2020). Sub-arctic river bank dynamics and driving processes during the open-channel flow period. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), 1198–1216. <https://doi.org/10.1002/esp.4796>
- Morelli, L., Ioli, F., Maiwald, F., Mazzacca, G., Menna, F., & Remondino, F. (2024). Deep-Image-Matching: A Toolbox for multiview image matching of complex scenarios. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-2/W4-2024, 309–316. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-309-2024>
- Schönberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. In *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 4104–4113). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445>
- Ulm, M., Elias, M., Eltner, A., Lotsari, E., & Anders, K. (2025). Automated change detection in photogrammetric 4D point clouds – transferability and extension of 4D objects-by-change for monitoring riverbank dynamics using low-cost cameras. *Applied Geomatics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12518-025-00623-9>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Winiwarter, L., Anders, K., Czerwonka-Schröder, D., & Höfle, B. (2023). Full four-dimensional change analysis of topographic point cloud time series using Kalman filtering. *Earth Surface Dynamics*, 11(4), 593–613. <https://doi.org/10.5194/esurf-11-593-2023>

20 Jahre in Drei Dimensionen – Rückblick und Perspektiven der 3D-Funddokumentation mittels Nahbereichsscannern im Landesamt für Archäologie Sachsen

Thomas Reuter¹

Zusammenfassung

Das Landesamt für Archäologie Sachsen (LfA) nutzt seit 2005 industrielle Messsysteme zur hochwertigen 3D-Erfassung archäologischer Funde. Aus einem Pilotprojekt entstand ein fester Fachbereich, in dem bis heute über 25000 Objekte digitalisiert wurden. Die große Menge vorhandener 3D-Daten werden schrittweise im Online-Katalog „Archaeo|3D“ zugänglich gemacht. Darüber hinaus bietet das LfA Studierenden die Möglichkeit praxisnahe Kenntnisse und Fähigkeiten im Umgang mit den 3D-Scannern sowie in digitaler Dokumentation und Datenmanagement zu erlangen. Der Beitrag zieht eine Bilanz dieser Entwicklung, stellt zentrale Meilensteine und Projekte vor und blickt auf Perspektiven und Herausforderungen für die kommenden Jahre.

Schlagwörter 3D Scanning · Archäologie · Kulturgut · Streifenlichtscanner · 3D-Funddokumentation

1 Einführung

In der Archäologie spielt die bildliche Dokumentation von Funden seit jeher eine entscheidende Rolle im wissenschaftlichen Diskurs. Da diese von Hand gefertigten technischen Zeichnungen immer mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden sind und das so gewonnene Abbild immer subjektiv geprägt ist, bestand schon seit langem das Interesse, effizientere, kostengünstigere und objektivere technische Lösungen zu finden, um die zeichnerische Dokumentation zu optimieren. Auch die technische Fotografie konnte hier nur bedingt Fortschritte bieten, was an der nicht steuerbaren Informationsdichte von Aufnahmen liegt – einzelne geometrische Oberflächenmerkmale werden immer von der Gesamttextur des fotografierten Objektes überdeckt. Außerdem muss hier immer die Gefahr von Verzerrungen und die nicht vorgegebene Maßhaltigkeit kompensiert werden (Innerhofer et al., 2010).

1.1 Hardware

Mit der Anschaffung des Laserscanners Konica Minolta VI-910 erfolgte 2005 der Beginn der kontinuierlichen 3D-Erfassung archäologischer Funde und die Entwicklung eines effizienten Arbeitsablaufs. Darüber hinaus wurde mit einem Lichtzelt, Fotobeleuchtung und Platz für eine geeignete Arbeitsumgebung gesorgt. Der Aufgabenschwerpunkt lag

zunächst auf dem Scannen großer Mengen von Keramik, wobei das Potential des zerstörungsfreien und effizienten Verfahrens mit wachsender Erfahrung schnell bestätigt wurde. Bis Ende 2012 wurden etwa 8000 Fundobjekte, aus zahlreichen Materialgruppen, mit dem Minolta-Scanner aufgenommen. In den darauffolgenden Jahren konnten die Fähigkeiten mit der Inbetriebnahme zweier Streifenlichtscanner (Breuckmann/AICON SmartScan-HE R5 und R8) erheblich verbessert werden, zumal der Fachbereich als 3D-Labor im LfA verstetigt wurde.



Abbildung 1 Die zur Verfügung stehenden 3D-Scanner für unterschiedliche Anforderungen und Anwendungen.

Um auch flexibel auf Ausgrabungen bzw. unter schwierigen Einsatzbedingungen arbeiten zu können, wurde

¹ Landesamt für Archäologie Sachsen, Zur Wetterwarte 7, 01109 Dresden, Deutschland, E-Mail: thomas.reuter@lfa.sachsen.de

die Ausstattung mit mobilen Handscannern (ARTEC EVA und LEO) vervollständigt (Abb. 1). Structure-from-Motion wird im LfA vor allem bei Ausgrabungen verwendet bzw. nur in Ausnahmefällen, wenn die 3D-Scanner nicht zum gewünschten Ergebnis kommen. In den vergangenen 20 Jahren wurden etwa 25000 Fundobjekte gescannt und stehen der Weiterverarbeitung orts- und zeitungebunden zur Verfügung.

1.2 TroveSketch

Von Anfang an war es das Ziel, die Qualität und den Informationsgehalt traditioneller, technischer Fundzeichnungen auf Grundlage der 3D-Modelle maßgeblich weiterzuentwickeln. Dazu wurde ab 2006 die Anwendung TroveSketch in Kooperation mit dem Institut Graphische Datenverarbeitung und Visualisierung der TU Chemnitz entwickelt, die seit vielen Jahren als Standardanwendung für die 3D-Funddokumentation im LfA zu sehen ist (Lindinger et al., 2008).

Mit wenigen intuitiven Arbeitsschritten können 3D-Modelle, insbesondere von archäologischen Funden, ausgerichtet und ausgewertet werden (Abb. 2). Mit teilautomatisierten Funktionen werden ein oder mehrere 3D-Modelle im Raum orientiert und vermessen. Neben den üblichen Werten wie Höhe, Breite und Tiefe oder Volumen, werden auch Größenverhältnisse bestimmt, die wichtige Kriterien für die Klassifizierung von Gefäßformen darstellen.

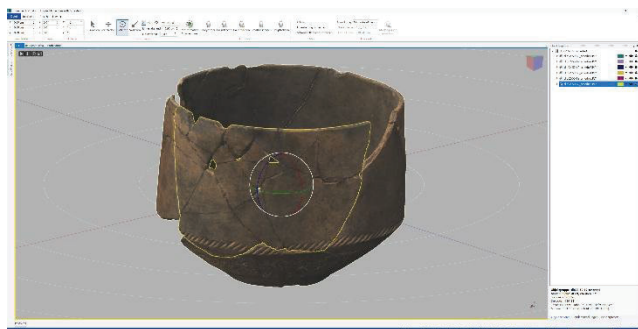


Abbildung 2 Ein bronzezeitliches Gefäß aus 6 Scherben wird in TroveSketch 2 ausgerichtet und rekonstruiert.

Nach wie vor ist die zweidimensionale Grafik der Standard in archäologischen Publikationen. Traditionell wurden diese von technischen Zeichnern in aufwendiger Handarbeit erstellt. TroveSketch bietet einen leistungsfähigen Renderer, der verschiedene Shader zur Verfügung stellt um standardisierte, maßstäbliche und damit direkt publikationsreife Grafiken mit wenigen Mausklicks zu exportieren (Abb. 3). Vervollständigt wird die

Funddokumentation mit einem Profileditor, mit dem an beliebigen Positionen Schnittebenen erzeugt und die Schnitte als Kurven extrahiert werden. Die Vektordaten können in allen Grafikprogrammen weiterverarbeitet werden.

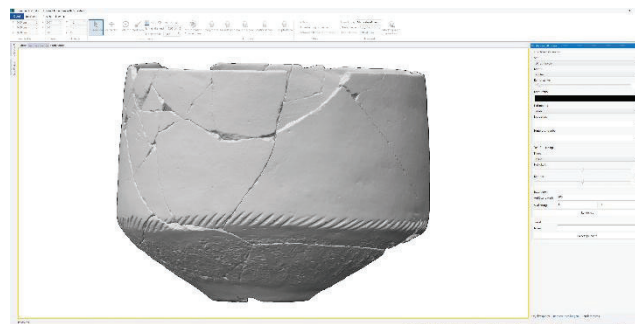


Abbildung 3 Der Renderer in TroveSketch 2 bietet verschiedene 3D-Shader für den standardisierten Export.

Zurzeit wird TroveSketch modernisiert um in aktuellen MS Windows-Umgebungen und mit moderner Hardware lauffähig zu bleiben. Die Anwendung hat im LfA einen In-House-Standard gesetzt und wird auch in anderen Einrichtungen genutzt.

2 Anwendungsbeispiele

2.1 Automatisierte Klassifikation

Mit Beginn der Massendigitalisierung 2006 wurde sich damit auseinandersetzt wie die aufwendige Arbeit der archäologischen Gefäßklassifikation mit 3D-Daten unterstützt werden kann. Von 2007 bis 2009 wurde dies im DFG-geförderten Projekt „Automatisierte Klassifikation bronzezeitlicher Gefäßkeramik“ untersucht und diskutiert. In dem Projekt wurden über 2000 Gefäße des bronzezeitlichen Gräberfeldes Kötitz (Coswig/Sachsen) gescannt und mit TroveSketch dokumentiert. Die exportierten Metadaten stellten die Datenbasis u.a. für das Training von neuronalen Netzen dar. Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigten sich identische Fragen und Probleme, die in der derzeitigen Diskussion um KI nach wie vor anzutreffen sind. Es wurden große Mengen an hochwertigen 3D-Daten benötigt, die teils vollautomatisiert aber auch manuell unterstützt für das Training verwendet wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass neuronale Netze das Potential haben die Klassifikation archäologischer Formen erheblich zu unterstützen (Hörr et al. 2011). Ein breiter Einsatz konnte jedoch nicht umgesetzt werden, weil die Gewinnung einer ausreichend hohen Anzahl weiterer 3D-Trainingsdaten für

andere Zeitstellungen mit großem Aufwand verbunden war und nach wie vor ist.

2.2 Organik und Restaurierung

Neben der 3D-Dokumentation von Keramik, zeigten sich schnell die Vorteile der 3D-Scanner im Bereich der Nassholzkonservierung und der virtuellen Rekonstruktion komplexer Befunde. Die geborgenen Hölzer müssen stets nass gehalten werden. Bei Austrocknung setzen umgehend unwiderrufliche Prozesse der Zersetzung ein, z. B. das Aufreißen bzw. der Abbau der Zellstruktur. Damit zeigt sich, dass es nach Möglichkeit schnelle Verfahren zur Dokumentation benötigt um die Hölzer nur kurze Zeit der Luft auszusetzen. Im Rahmen verschiedener Projekte wurden Abläufe zwischen Grabungsteam, 3D-Labor und Restaurierung etabliert, um effizient aber hochgenau die empfindlichen Hölzer dreidimensional dokumentieren zu können.

2.2.1 Der neolithische Brunnen von Altscherbitz

Bei dem Ausbau des Leipziger Flughafens zum Frachtdrehkreuz wurde auf dem Baufeld u. a. eine hölzerne Brunnenkonstruktion entdeckt, die mittels der Dendrochronologie in die Jungsteinzeit (~ 5100 v. Ch.) datiert wurde. Der Brunnen wurde eingeschalt, als Block geborgen und mit einem Schwertransport nach Dresden transportiert. Dort wurde der Befund von 2008 bis 2010 unter kontrollierten Bedingungen ausgegraben (Elburg 2010).

Von Anfang an bestand der Wunsch die damals noch neue Technik der Nahbereichsscanner zu nutzen um die Konstruktion virtuell zu rekonstruieren. Die bis zu 2 m langen, massiven Spaltbohlen aus Eiche wurden mit farbigen Stecknadeln bestückt und mittels Tachymeter eingemessen. Nach der darauffolgenden Bergung folgte eine Reinigung der Oberflächen durch die Restaurierung und direkt im Anschluss der 3D-Scan mit dem Minolta-3D-Scanner.

Damit ist ein derartiger Brunnenbefund erstmals dreidimensional auf Objektebene, d. h. jedes Holz einzeln, sowie auch auf Befundebene umfassend dokumentiert. Weitere 150 Funde aus der Füllung wurden gescannt und lagerichtig in die Rekonstruktion eingefügt. Damit konnten sowohl Nutzungszeiträume und Verfüllprozesse rekonstruiert werden als auch Rückschlüsse auf die Fähigkeiten der Holzbearbeitung in der Jungsteinzeit in Sachsen gezogen werden (Tegel et al. 2012).

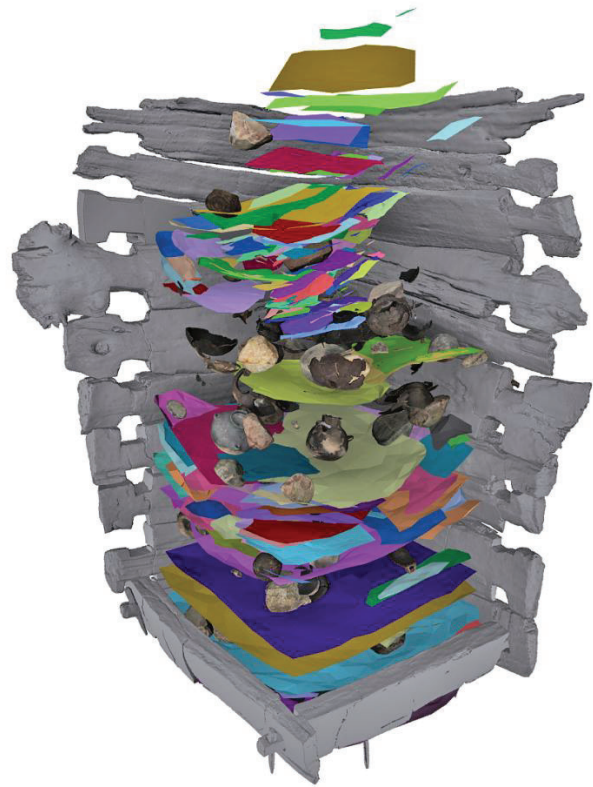


Abbildung 4 Die virtuelle Rekonstruktion des Brunnen von Altscherbitz als Schnittmodell, mit Funden und stratigrafischen Daten.

2.2.2 Schwierigste Bedingungen – Der mittelalterliche Altbergbau

Aufbauend auf den Erfahrungen und erarbeiteten Handlungsabläufen stellte die 3D-Funddokumentation ab 2012 einen wichtigen Arbeitsschritt dar, um mittels Funden und Befunden im Rahmen mehrerer EU-geförderter Forschungsprojekte, gemeinsam mit internationalen Partnern, den Bergbau des Mittelalters im Erzgebirge zu untersuchen (<https://archaeomontan.eu>).

Die Bedingungen in den Bergwerken unterschieden sich grundlegend von der Dokumentation unter Laborbedingungen. Sehr enge Stollen, Wasser und Schmutz stellten schnell klar, dass hier kein Streifenlichtscanner eingesetzt werden kann. Neben Structure-from-Motion kam vor Ort der mobile Handscanner ARTEC EVA zum Einsatz. Damit konnten umfassend Stollen, Einbauten und Bearbeitungsspuren dokumentiert werden (Göttlich et al., 2013).

Aufgrund der aufkommenden Fundmassen mussten die Arbeitsabläufe verändert werden, so dass über 2.000 Funde dennoch effizient und genau erfasst werden konnte. Neben der Dokumentation in situ wurden alle Hölzer nach Reinigung im LfA mit dem zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Streifenlichtscanner Breuckmann Smartscan R5 gescannt. Während sich die Hölzer in der Konservierung befanden, konnte die Grabungsauswertung anhand der 3D-Modelle fortgesetzt werden.

Darüber hinaus bilden die Daten die Grundlage um die Qualität des Konservierungsprozesses bewerten zu können. Nach dem Prozess der Tränkung und der Trocknung in der Gefriertrocknungsanlage werden stichprobenartig weitere 3D-Scans durchgeführt um Veränderungen des Volumens sowie auch Deformationen untersuchen zu können (Schmidt-Reimann et al. 2015).

Derzeit werden die Wiederholungsmessungen wieder aufgenommen um weitere Daten zu sammeln und um zukünftig nach Holz- und Bearbeitungsart bzw. Abbaugrad Vorhersagen zum Konservierungsprozess machen zu können.

2.3 Kleinfunde

Gefäße aus Keramik, Hölzer oder Werkzeuge aus Stein und Metall sind ein Teil des gesamten Aufkommens von Funden, für die 3D-Daten benötigt werden. Münzen und Schmuckstücke stellen Objektgruppen dar, bei denen die Anforderungen darin bestehen, dass die Größe im Zentimeterbereich oder kleiner liegt und die Oberflächen häufig stark glänzend sind.

Die Bestimmung erfolgt in der Regel anhand der Münzprägung. Eine schlechte Erhaltung kann jedoch die visuelle Identifizierung erheblich erschweren und ggf. auch unmöglich machen. Hochauflösende 3D-Daten können die Lösung sein, vor allem wenn man die Daten ohne Farbinformationen betrachtet. Im Allgemeinen überdeckt die Objektfarbe wichtige Oberflächendetails, wobei dies unabhängig der Objektgröße ist und bei allen Objekt- und Materialgruppen so zu sehen ist.

Das EU-geförderte Projekt „1000 Jahre Oberlausitz“ (<https://www.1000lusatia.de/>) beschäftigte sich u.a. mit dem hochmittelalterlichen Hacksilberschatz von Cortnitz aus Ostsachsen. Dieser Fund beinhaltet über 1000 Münzen und Schmuckstücke, die teilweise zerteilt sind. Die Münzen wurden zerteilt um kleine Zahlungsbeträge begleichen zu können, vergleichbar zu dem heute üblichen Kleingeld. Im Rahmen des Projektes wurden nahezu alle Objekte gescannt und zusätzlich mit Makrofotos texturiert. Dieser Arbeitsschritt wurde gewählt, weil die Auflösung der

externen Fotos erheblich besser ist als die des AICON Smartscans. Im Ergebnis liegt nun erstmals der gesamte Silberschatz in einer einheitlichen Datenqualität vor.

Neben der Analyse und Detektion von Prägungen ist es auch möglich, Merkmale der Prägungen teilautomatisiert klassifizieren zu lassen um eine Chronologie aufstellen zu können. 2015 beteiligte sich das LfA mit einer Bewerbung im Rahmen des Breuckmann Award. In der Studie sollte untersucht werden, ob es möglich ist, Abnutzungerscheinungen römischer Münzstempel mithilfe von 3D-Daten zu detektieren und so ein Bewegungsprofil des Feldherren Varus aufzustellen. Im römischen Reich war es üblich Münzen mit einem Gegenstempel der eigenen Initialen zu versehen. In der Fallstudie sollte es sich um die Münzen mit dem Gegenstempel „VAR“ handeln (Tolksdorf et al., 2017). Die Fallstudie zeigte, dass es möglich ist wenn hochauflösende 3D-Daten vorhanden sind. Auf Grund der geringen Stichprobenanzahl von nur 37 Münzen kann dies jedoch nur als Prototyp verstanden werden und es wäre wünschenswert, wenn in der Numismatik der Ansatz mit einer deutlich größeren Datenmenge wiederholt werden könnte.

3 Wissensvermittlung

3.1 Im Internet: Archaeo|3D und Archaeo|SN

Seit dem Einstieg in die massenhafte 3D-Dokumentation von Funden 2006 gab es den Wunsch, die Daten auch nach außen hin für die Wissensvermittlung zu nutzen. Aber erst 2020 konnte das LfA-eigene Internetportal Archaeo|3D (<https://archaeo3d.de/>) online gehen. Das Layout wurde im Rahmen einer Semesterarbeit des Studiengangs Design der FH Dresden entwickelt (Kim et al., 2018).

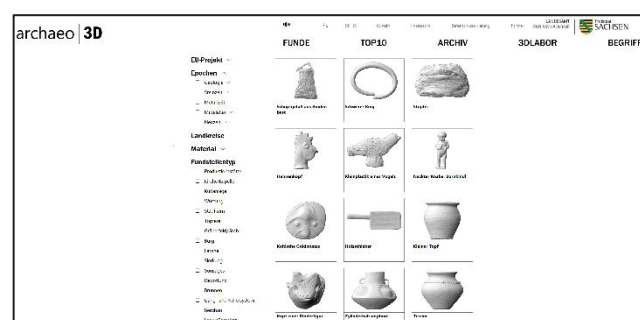


Abbildung 5 Archaeo|3D. Über Filter und Kartendarstellungen können derzeit etwa 800 Funde durchsucht und in 3D betrachtet werden.

Ziel war es, eine Publikationsplattform bereitzustellen um Erkenntnisse der Öffentlichkeit zu präsentieren. Neben

den Objekten können sich die Besucher auch über die 3D-Scanner und deren Nutzung im LfA informieren (Innerhofer et al., 2024).

Die konsequent responsive Programmierung ermöglicht es sowohl von mobilen als auch von Desktopgeräten die Inhalte zu durchsuchen. Die präsentierten 3D-Modelle werden mit Hilfe von Nexus3D visualisiert. Mit dem streamingfähigen Format können auch sehr große 3D-Modelle stark komprimiert und flüssig dargestellt werden. In den hauseigenen Publikationen werden QR-Codes eingesetzt um Fachartikel mit dem erweiterten Informationsgehalt der 3D-Modelle anzureichern. Alle Objektseiten sind als Permanentlinks zu sehen, so dass die Modelle in Veröffentlichungen als Zitate eingebunden werden können (Coburger et al. 2020).

Das Gegenstück zum objektbezogenen Archaeo|3D stellt die Partnerseite Archaeo|SN (<https://archaeo-sn.de/>) dar. Hier werden ausgewählte Bodendenkmäler vorgestellt. Durch die beidseitige Verlinkung zwischen Objekten und dazugehörigen Fundstellen, kann sich ein kurzer Überblick über wichtige Bodendenkmäler in Sachsen verschafft werden. Darüber hinaus ist es möglich sich den Standort der jeweiligen Funde im Landesmuseum für Archäologie Chemnitz (smac) über Links zum 360°-Rundgang (<https://www.360.de/smac/>) anzusehen um vielleicht beim nächsten Besuch Exponate gezielt im Museum zu betrachten.

3.2 Museum und Ausstellungen

Für den Ausstellungsbetrieb stellen 3D-Daten eine wichtige Komponente dar. Neben einfachen Rekonstruktionen und Animationen, werden in Ausstellungen Inhalte von Archaeo|3D direkt auf interaktiven Medienstationen eingebunden. Diese Lösung wurde auch in kleineren Regionalmuseen genutzt, um dort eine gezielte Auswahl von Funden dreidimensional den Besuchern präsentieren zu können. Ein großer Vorteil ist es, dass nur eine geeignete Medienstation benötigt wird auf der browsergestützt Archaeo|3D läuft. Mithilfe eines Kioskmodus wird das „Ausbrechen“ auf die Systemebene unterbunden. Mit der Offline-Version kann auch auf eine permanente Internetverbindung verzichtet werden.

Das Thema 3D-Druck hat sich erheblich weiterentwickelt und wird an verschiedenen Stellen im Museum genutzt. Neben Repliken, die das Original ersetzen, weil dieses nicht ausstellbar ist, sind 3D-Drucke nunmehr ein wichtiger Bestandteil um Tastmodelle herzustellen und sehbehinderten Besuchern Inhalte zu vermitteln. Darüber hinaus werden anhand von Objektscans Montagehilfen entworfen und hergestellt. Aber auch im Bereich des Merchandisings werden 3D-Drucke genutzt.

3.3 Ausbildung und Lehre

Das LfA unterhält seit Einführung der 3D-Scanner gute Verbindungen zu den Hochschulen in Sachsen, insbesondere der HTW Dresden, an der in einer Diplomarbeit der Grundstein für den jetzigen Stand des 3D-Labors gelegt wurde (Kießling, 2006).

Neben zahlreichen Abschlussarbeiten, bietet das LfA regelmäßig Studenten die Möglichkeit ein Betriebspraktikum im 3D-Labor zu absolvieren und den Umgang mit den verschiedenen 3D-Scannern und 3D-Programmen sowie deren Anwendung im archäologischen Kontext zu erlernen. Exkursionen in das LfA sowie auch Gastbeiträge im Rahmen von Lehrveranstaltungen vermitteln einen Einblick über die Nutzung moderner 3D-Messtechnik über die übliche Nutzung in der Industrie.

4 Diskussion

Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz von 3D-Scannern im Nahbereich den Bereich der Funddokumentation erheblich unterstützt. Nicht unterschlagen werden darf, dass dieser Weg mit hohen Investitions- und Unterhaltskosten verbunden ist. Darüber hinaus spielt ausgebildetes Fachpersonal eine wichtige Rolle um das Potential der Geräte voll auszuschöpfen und Abläufe weiterzuentwickeln.

Neben der regelmäßigen Geräte- und Softwarewartung, muss für entsprechende, leistungsfähige Workstations gesorgt werden. Insbesondere mit den hochauflösenden Streifenlichtscannern HEXAGON Smartsan R8 und Stereoscan neo R16 fallen große Datenmengen an, die zügig verarbeitet werden müssen. In den 20 Jahren beläuft sich die gesamte Datenmenge des 3D-Labors im LfA auf etwa 30 TB. Darin enthalten sind alle Rohdaten, prozessierte 3D-Modelle als auch deren Versionen, sowie weiterverarbeitete Daten wie z. B. Renderprojekte usw. Hier zeigt es sich, dass auch die hauseigene IT für den dauerhaften Einsatz solcher Scanner ausgelegt und geplant werden muss.

Derzeit ist es möglich alle vorhandenen, proprietären Rohdaten zu öffnen und verarbeiten zu können. Es ist jedoch klar, dass dies in Zukunft nicht mehr der Fall sein wird, sobald die dazugehörige Auswertesoftware nicht mehr lauffähig gehalten werden kann. Die 3D-Modelle werden in den gut dokumentierten, offenen Formaten PLY und OBJ gespeichert. Diese Formate sind jedoch nicht archivfähig, so dass wahrscheinlich in Zukunft das Format glTF genutzt werden wird.

Archäologische Funde umfassen ein großes Spektrum an Größen und Materialien. Die resultierende Qualität der 3D-Daten ist maßgeblich von den Oberflächeneigenschaften des

Fundes abhängig. Ein großes Thema sind dabei reflektierende Oberflächen wie sie bei Metall und auch Nasshölzern auftreten. Im Ergebnis erhält man stets Daten in denen ein starkes Rauschen auftritt. Üblicherweise würden diese unkooperativen Oberflächen mit einem geeigneten Mattierungsspray behandelt werden (Reuter et al., 2020). Die Nutzung der Sprays ist jedoch aus restauratorischen Gründen untersagt, so dass zum einen die Bearbeitung der Scans aufwendiger wird und zum anderen ein Verlust an Auflösung und Detailwiedergabe akzeptiert werden muss.

Vergleichbar dazu ist das Problem instabiler Geometrie. Dies ist vor allem bei schlecht erhaltenen Nasshölzern zutreffend, d. h. die Hölzer verformen sich unter dem Eigengewicht, so dass Ober- und Unterseite nur schlecht registriert werden können. Nach umfangreicher Diskussion wurde sich im LfA auf eine Vorgehensweise geeinigt, bei der vollständige 3D-Modelle am Ende stehen. Die Scans der Oberseite werden als stabil angesehen, während die Daten der gedrehten Rückseite beschnitten und stückweise an die Oberseite registriert werden. Es ist einzusehen, dass dies einen massiven Eingriff in die Messdaten darstellt, jedoch die einzige Möglichkeit ist, die Funde überhaupt dokumentieren zu können. Häufig sind diese schlecht erhaltenen Hölzer nicht konservierungswürdig und werden beprobt, d. h. zerstört.

Im Gegensatz zu Anwendungen im Industriesektor müssen bei der Dokumentation von einigen archäologischen Fundgruppen Zugeständnisse an Genauigkeit und Qualität gemacht werden. Der Mehrwert, den die hochauflösenden Daten bieten, wiegt dabei die Kompromisse jedoch auf.

5 Fazit & Ausblick

Die systematische Einführung industrieller Messsysteme hat die Möglichkeiten der archäologischen Dokumentation im LfA Sachsen erheblich erweitert. Vor allem die Verstetigung aus dem Projektstatus heraus in einen festen Fachbereich gewährleistet Kontinuität und letztlich den Erhalt des technischen Fachwissens. Es ist einzusehen, dass die Anschaffung mehrerer moderner 3D-Scanner und der dauerhafte Betrieb der Scanner-Arbeitsplätze erhebliche finanzielle Mittel erfordern. Die hohe, gleichbleibende Qualität und Effizienz generiert jedoch hochwertige Daten, die auf zahlreichen Wegen die wissenschaftliche Bearbeitung und Wissensvermittlung unterstützen. So liegen Daten vor, die erstmals nicht von den Fähigkeiten technischer Zeichner abhängig sind, sondern vergleichbar sind. Mit TroveSketch steht ein Werkzeug zur Verfügung, dass es intuitiv ermöglicht zügig 3D-Modelle hinsichtlich

archäologischer Richtlinien zu orientieren und publikationsreife Grafiken zu exportieren und damit die LfA-eigene Redaktion zu entlasten.

Bereits das DFG-Projekt zur automatisierten Klassifikation zeigte das Potential auf, das in neuronalen Netzen für die wissenschaftliche Bearbeitung von Fundmassen steckt. Es stellte sich heraus, dass die Qualität der zu Grunde liegenden Trainingsdaten von hoher Bedeutung ist. Auch wenn derzeit kein Einsatz von KI zur 3D-Fundbearbeitung im LfA stattfindet, stellen die vorhandenen 3D-Daten eine verlässliche Grundlage dar.

Bei der Ausgrabung des neolithischen Brunnens von Altscherbitz 2008 – 2010 wurden effiziente Arbeitsabläufe entwickelt, um große, wassergesättigte Hölzer innerhalb kurzer Zeit zu bergen, zu reinigen und genau zu digitalisieren. Diese Erfahrungen wurden im Rahmen der EU-geförderten Projekte zum mittelalterlichen Bergbau im Erzgebirge optimiert, um die Fundmassen von mehreren tausend zu scannenden Holzobjekten bewältigen zu können. Mit ihrer sehr hohen Auflösung haben die Streifenlichtscanner die Einsatzmöglichkeiten sowohl im archäologischen als auch im konservatorischen Kontext weiterentwickelt, z. B. bei der Erkennung von Abnutzungsspuren und der Überwachung empfindlicher und sich verändernder Fundklassen.

Moderne Webtechnologien sowie VR/AR-Anwendungen machen die gewonnenen Informationen und Erkenntnisse der Öffentlichkeit zugänglich und können den Wissenstransfer erheblich unterstützen. Die Internetseiten Archaeo3D und ArchaeoSN haben sich zu Publikationsplattformen mit großer Reichweite entwickelt. Die Verlinkung in traditionellen, gedruckten Veröffentlichungen zu Archaeo3D, unterstützen die Beschreibung archäologischer Erkenntnisse in großem Maße. Insbesondere die Verknüpfung mit dem smac stellte während der durch die Corona-Pandemie geschlossenen Museen, das Schaufenster in die Archäologie Sachsens dar. Es ist geplant Archaeo3D auch mit überregionalen Inhalten anzureichern.

Die Verwaltung der Datenmengen und letztlich die Lesbarkeit der proprietären Rohdaten stellen eine große Herausforderung für die Zukunft dar. Die Messdaten der 3D-Scanner von HEXAGON, ARTEC und Konica Minolta unterscheiden sich in Struktur und Formaten völlig voneinander. Um diese Daten so lange wie möglich lesbar zu halten, müssen geeignete Lösungen und Verfahren entwickelt werden, denn die Erfahrung zeigt, dass auch nach mehr als 10 Jahren neue Fragestellungen zu einer Nachfrage nach den alten Rohdaten führen können. Durch die

konsequente Verwendung offener Datenformate (PLY, OBJ) ist es möglich, alle 3D-Modelle der letzten 15 Jahre ohne Einschränkungen zu verarbeiten.

HEXAGON wird in 2026 den Vertrieb, die Entwicklung und den Support der Streifenlichtscanner weitgehend einstellen. Die Instrumente sind robust und werden sicherlich noch lange Zeit funktionsfähig sein. Das schwerwiegendste Problem stellt dabei die dazugehörige Steuerungssoftware OptoCat dar, die weiterhin lauffähig gehalten werden muss.

Literaturverzeichnis

- Coburger, C., Innerhofer, F. & Reuter, T. (2020). archaeo3D – eine innovative Plattform zur Präsentation archäologischer Fundobjekte im Internet. *Ausgrabungen in Sachsen 7. Arbeits- u. Forschungsberichte sächsische Bodendenkmalpflege Beiheft 34*, 2020, 383–392.
- Elburg, R. (2010). Der bandkeramische Brunnen von Altscherbitz – Eine Kurzbiografie. *Ausgrabungen in Sachsen 2. Arbeits- u. Forschungsberichte sächsische Bodendenkmalpflege Beiheft 2*, 2010, 231–234.
- Göttlich, F. & Reuter, T. (2013). Methoden der grabungsbegleitenden 3D-Dokumentation im Altbergbau. *ArchaeoMontan 2012. Erkunden – Erfassen – Erforschen. Arbeits- u. Forschungsberichte sächsische Bodendenkmalpflege Beiheft 26*, 2013, 209–223.
- Hörr, C., Lindinger, E. & Brunnett, G. (2011). New Paradigms for Automated Classification of Pottery. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 36th International Conference*, 2011, 268–277.
- Innerhofer, F. & Lindinger, E. (2010). Die Funddokumentation – Von der Bleistiftskizze zum 3D-Scan. *Ausgrabungen in Sachsen 2. Arbeits- u. Forschungsberichte sächsische Bodendenkmalpflege Beiheft 2*, 2010, 179–183.
- Innerhofer, F., Coburger, C. & Reuter, T. (2024). More Than Just Documenting the Past: 15 Years of 3D Scanning at the Archaeological Heritage Office of Saxony. *The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology*, 2024, 27–26. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-53032-6>
- Kießling, H. (2006). 3D-Datenerfassung archäologischer Funde mit dem Laserscanner Konica Minolta VI-910 und Test der darauf aufbauenden Auswertesoftware. Ungedr. Diplomarbeit Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Vermessungswesen/Kartografie, 2006.
- Kim, H., Matthes, P. & Wahlter, C. (2018). archaeo | 3D. Website für das Landesamt für Archäologie. Ungedr. Seminararbeit Fachhochschule Dresden, 2018.
- Lindinger, E. & Hörr, C. (2008). Ein neu entwickeltes 3D-Scanverfahren für archäologische Objekte. *Ausgrabungen in Sachsen 2. Arbeits- u. Forschungsberichte sächsische Bodendenkmalpflege 48/49*, 2008, 9–18.
- Reuter, T., Böttcher, K. & Burghardt, M. (2020). Untersuchungen zu Mattierungsmitteln für die 3D-Digitalisierung von archäologischen Kleinfunden mit optisch schwierigen Oberflächeneigenschaften. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2020*, 2020, 277–287.
- Schmidt-Reimann, P. & Reuter, T. (2015). Conservation and 3D-Documentation of Waterlogged Wood from Medieval Mining. *Condition.2015 – Conservation and Digitalization. Conference Proceedings*, 2015, 125–130.
- Tegel, W., Elburg, R., Hakelberg, D., Stäuble, H. & Büntgen, U. (2012). Early Neolithic Water Wells Reveal the World's Oldest Wood Architecture. *PLoS One* 7, 2012, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051374>
- Tolksdorf, J.-F., Elburg, R. & Reuter, T. (2017). Can 3D Scanning of Countermarks on Roman Coins Help to Reconstruct the Movement of Varus and his Legions? *Journal of Archeological Science. Reports* 11, 2017, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.005>

Untersuchungen zum Einsatz von Low-Cost-3D-Handscannern für archäologische sabäische Fundstücke

Leonie Schröder¹, Thomas P. Kersten¹ & Klaus Mechelke¹

Zusammenfassung

Die Digitalisierung archäologischer Objekte gewinnt zunehmend an Bedeutung, da traditionelle Dokumentationsmethoden wie Zeichnungen oder Fotografien sehr zeit- und personalintensiv sind und empfindliche Fundstücke belasten können. Low-Cost-3D-Handscanner stellen hierbei eine vielversprechende Alternative dar, da sie eine berührungslose, flexible und vergleichsweise einfache Erfassung ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz der Revopoint-Scanner POP 3 Plus und MetroX zur Dokumentation sabäischer Fundstücke untersucht und ihre Leistungsfähigkeit mit der Photogrammetrie verglichen. Die Ergebnisse werden anhand der Kriterien geometrische Genauigkeit, Wiederholbarkeit, Material- und Lichteinflüsse sowie Bedienfreundlichkeit bewertet. Die im Labor für Photogrammetrie und Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg durchgeführten geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen zeigen, dass Low-Cost-Scanner eine praktikable Alternative und Ergänzung zur Photogrammetrie darstellen. Sie bieten Vorteile in Bezug auf Geschwindigkeit, Mobilität und Nutzerfreundlichkeit und liefern reproduzierbare, geometrisch verlässliche Ergebnisse. Einschränkungen bestehen jedoch bei Farbtreue, Oberflächenbeschaffenheit und Softwarestabilität. Die Photogrammetrie bleibt das Referenzverfahren für publikationstaugliche Ergebnisse, während sich 3D-Handscanner besonders für die mobile, objektnahe Dokumentation sowie für interne Arbeitsprozesse in Museen eignen. Zukünftig könnten technologische Verbesserungen, hybride Arbeitsabläufe sowie Cloud- und Datenbanklösungen den Nutzen dieser Scanner weiter steigern. Damit leisten sie bereits heute einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Digitalisierung beweglicher Kulturgüter.

Schlagwörter 3D · Dreiecksvermaschung · Genauigkeit · handgeführte Systeme · Low-Cost · Scannen · Vergleich

1 Einführung

Archäologische Sammlungen umfassen heute eine enorme Anzahl an Objekten, deren Dokumentation eine zentrale Aufgabe von Archiven darstellt. Traditionelle Methoden wie zweidimensionale Zeichnungen oder Fotografien sind jedoch zeitaufwendig, personalintensiv und stark von subjektiven Faktoren geprägt.

Vor diesem Hintergrund gewinnen berührungslose, zerstörungsfreie und digitale Dokumentationen zunehmend an Bedeutung. Das 3D-Scanning ermöglicht die detailgenaue Erfassung von Oberflächen, die durch konventionelle Fotografie oftmals nicht sichtbar werden, beispielsweise Bearbeitungsspuren auf verschiedenen Oberflächen. Für diese Aufgaben werden häufig Laserscanner oder Streifenprojektionssysteme eingesetzt. Diese liefern zwar eine hohe Genauigkeit, sind jedoch kostspielig, unhandlich und erfordern erhebliches Expertenwissen. Seit einiger Zeit erweitern

insbesondere tragbare Low-Cost-Scanner das Anwendungsspektrum, da sie insbesondere für die Archäologie und den Erhalt beweglicher Kulturgüter eine vielversprechende Alternative darstellen. Sie können flexibel sowohl im Freien als auch in Museen eingesetzt werden, um die Erhaltung und wissenschaftliche Dokumentation von Kulturgütern sicherzustellen.

In geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen wird der Einsatz von zwei Low-Cost-3D-Scannern der Firma Revopoint zur Dokumentation sabäischer archäologischer Funde anhand verschiedener Kriterien getestet. Dabei werden der Einfluss von Material, Textur und Farbe, die Wiederholbarkeit, die Umgebungsbeleuchtung sowie die Handhabbarkeit untersucht. Auf dieser Grundlage werden die Einsatzmöglichkeiten, Grenzen und praktischen Vorteile der untersuchten Low-Cost-3D-Handscanner in der archäologischen Dokumentation aufgezeigt und diskutiert.

¹ HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg
E-Mail: [Leonie.Schroeder, Thomas.Kersten, Klaus.Mechelke]@hcu-hamburg.de

2 Ähnliche Arbeiten

Bereits früh wurden automatische 3D-Erfassungsgeräte entwickelt, die es ermöglichen, reale Objekte schnell und kostengünstig in digitale Modelle umzuwandeln. Rocchini et al. (2001) beschreiben beispielsweise einen solchen 3D-Scanner, der auf strukturiertem Licht basiert und kostengünstig ist. Dieser verwendet farbige Streifenmuster, um Artefakte des Kulturerbes zu erfassen. Der Fokus lag dabei auf mittlerer bis hoher Genauigkeit, einfacher Bedienbarkeit, Betriebssicherheit und der selbstregistrierenden Erfassung von Form- und Farbdaten. Erste Anwendungserfahrungen zeigten, dass sich archäologische Objekte wie Statuen mit dieser Technologie detailgetreu erfassen lassen.

Handscanner werden zunehmend für die Dokumentation kleiner und mittelgroßer Objekte eingesetzt. Patrucco et al. (2019) evaluierten beispielsweise den Handscanner Stonex F6, der mit strukturiertem Lichtlaser arbeitet und eine Vollformatkamera zur Texturierung nutzt. In einer Fallstudie mit einer architektonischen Maquette des Museo Egizio in Turin erwies sich der Scanner in Bezug auf Erfassungszeit, Vollständigkeit und Auflösung als konkurrenzfähig, während die Texturierung noch Optimierungspotenzial aufwies.

In institutionellen Einrichtungen wie dem 3D-Labor des Landesamtes für Archäologie Sachsen (LfA) kommen sowohl stationäre als auch mobile Nahbereichsscanner zum Einsatz. Reuter et al. (2014) berichten über die Nutzung des Triangulationsscanners Konica-Minolta-Modells VI-910 und des Breuckmann-Modells smartSCAN-HE für Laborscans sowie des Handscanners Artec EVA für Feldaufnahmen. Ergänzend wird die Methode „Structure from Motion“ (SfM) für die In-situ-Dokumentation verwendet. Mithilfe der speziell an archäologische Anforderungen angepassten Software „TroveSketch“ werden unter anderem automatische Ausrichtungen, Vermessungen und virtuelle Rekonstruktionen von Scherben durchgeführt. So konnten bereits über 9.000 Fundobjekte digitalisiert werden. Dabei wird die Kombination der verschiedenen Messmethoden deutlich.

Die Genauigkeit von handgeführten Scannern wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht. Während Kersten et al. (2016, 2018) geometrische Genauigkeitsuntersuchungen mit verschiedenen 3D-Handscannern durchführten, entwickelten González-Merino et al. (2021) zudem einen flexiblen Prototyp für archäologische Anwendungen. Dieser nutzt Scanner oder Kameras in Kombination mit rotierenden Tisch- und Neigungsmechanismen, um vollständige 3D-Modelle zu erzeugen.

Auch der Einsatz im Feld wurde untersucht. McPherron et al. (2009) verwendeten einen Streifenlichtscanner, um

mittelpaläolithische Fundstellen in Südwestfrankreich zu dokumentieren. Trotz logistischer Herausforderungen wie der Beleuchtung und der Positionierung der Kamera konnten submillimetergenaue 3D-Modelle über mehrere Quadratmeter erstellt werden. Dies zeigt, dass ein hochpräzises Scannen von Fundstellen auch außerhalb des Labors möglich ist.

Die bisherigen Forschungen zeigen, dass 3D-Scanning in der Archäologie ein etabliertes Werkzeug ist, das sich sowohl für kleine Artefakte als auch für größere Fundstellen eignet. Dabei kommen verschiedene Technologien zum Einsatz: von kostengünstigen strukturierten Lichtscannern und spezialisierten 3D-Handscannern bis hin zu Labor-Setups mit hochauflösenden stationären Geräten. Dabei ist es wichtig, verschiedene Methoden und Systeme zu kombinieren, die an die Objektgröße, die Fragestellung und die Anforderungen der Weiterverarbeitung angepasst sind.

3 Untersuchte handgeführte 3D-Scanning-Systeme und verwendete Referenzobjekte

3.1 Handgeführte 3D-Scanning-Systeme

Für diese Studie wurden die beiden handgeführten low-cost 3D-Scannern von Revopoint (POP 3 Plus und MetroX, siehe Abb. 1) getestet.



Abbildung 1 Handgeführte 3D-Scanner der Firma Revopoint: POP 3 Plus (links) und MetroX (rechts) (Darstellung nicht maßstabsgetreu)

Der POP 3 Plus ist ein mobiles und vielseitig einsetzbares Handscanner-System. Dank seiner 9-Achsen-IMU, gelingen auch im Handbetrieb stabile Scans. Mithilfe der integrierten RGB-Kamera und des LED-Blitzes lassen sich Farbscans erstellen und die Modelle mit einer Textur versehen. Da er mit Infrarotlicht der augensicheren Klasse 1 arbeitet, kann er sowohl im Innen- als auch im Außenbereich genutzt werden.

Der MetroX ist hingegen klar auf höchste Präzision und industrielle Anforderungen ausgerichtet. Ein Alleinstellungsmerkmal sind seine vier Scanmodi (Kreuzlinien, Parallel, Vollfeld und Drehteller), mit denen sich selbst glänzende oder schwarze Oberflächen scannen lassen. Besonders im Vollfeld-Modus erreicht er extreme Scangeschwindigkeiten von bis zu sieben Millionen Punkten pro Sekunde (GPU-beschleunigt). Einschränkend ist jedoch, dass der MetroX nicht im Außenbereich eingesetzt werden kann und stärker auf einen stationären Workflow ausgelegt ist.

Die technischen Daten der beiden 3D-Handscanner sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

3.2 Referenzobjekte

Die archäologische Stätte Yeha im Norden Äthiopiens gilt als das bedeutendste Zentrum des äthio-sabäischen Gemeinwesens. Sie liefert wichtige Hinweise auf frühe transkulturelle Kontakte zwischen Südarabien und dem Horn von Afrika. Bereits im 1. Jahrtausend v. Chr. ließen sich hier Sabäer nieder, ein aus dem heutigen Jemen stammendes Volk, dessen Kultur sich mit der lokalen Tradition verschmolz.

Um die Scanner hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten in der Archäologie und als Messsystem für Archäologen zu testen, wurden verschiedene Testobjekte im Rahmen einer Grabungskampagne mit sabäischem Kontext ausgewählt. Zunächst standen dafür Funde der oben genannten Grabungsstätte des Deutschen Archäologischen Instituts in Yeha im Norden Äthiopiens zur Verfügung. Erfasst wurden drei Sandsteinfragmente aus dem Umfeld des Palasts Grat Be' al Gibri, die in die Bauzeit des Palasts um etwa 800 v.

Chr. datiert werden können (siehe Abb. 2 oben). Das erste Fragment stellt ein altsüdarabisches Scheinfenster mit horizontalen Lamellen und Zahnschnittfries dar. Es gibt eine miniaturisierte Architekturform wieder und lässt durch seine sorgfältig geschliffenen Oberflächen eine hohe handwerkliche Qualität erkennen. Das zweite Fragment ist Teil einer Lisene mit unterschiedlich fein bearbeiteten Oberflächen. Es weist sowohl deutliche Bearbeitungsspuren von Spitzseisen und Steinhacken als auch geglättete, teilweise möglicherweise übergeschliffene Bereiche auf. Das dritte Fragment lässt sich bislang nicht eindeutig einem Bauteil zuordnen, stammt jedoch vermutlich ebenfalls aus dem Umfeld des Palasts. Es besitzt eine winkelig ausgespitzte Seite sowie eine geebnete Frontfläche mit Bearbeitungsspuren eines Flächenwerkzeugs. Aufgrund stilistischer Merkmale wird es in das 8.–7. Jahrhundert v. Chr. datiert.

Nach einem unvorhersehbaren vorzeitigen Abbruch der Grabungskampagne in Yeha wurden zusätzlich weitere sabäische Objekte aus dem Jemen (siehe Abb. 2 unten) im Hamburger Museum am Rothenbaum, Kulturen und Künste der Welt (MARKK) aufgenommen. Die Stücke stammen aus der Region um Marib, dem Kerngebiet des antiken sabäischen Reiches. Das Konvolut umfasst eine Stele aus graugelbem Kalksandstein mit einem stilisierten Gesicht und der Inschrift „Lab'ān“, auf deren Oberfläche sich noch Reste roter Farbfassung befinden. Hinzu kommt ein Porträtkopf aus Alabaster, dessen Augenfüllungen verloren sind und dessen Bartdarstellung nur flach ausgearbeitete Bohrungen aufweist. Das dritte Objekt ist eine aus dunkelgrünem Nephrit gefertigte Steinbeilklinge mit glatt geschliffener Oberfläche. Sie ist längs gesplittert und an der Schneide stark abgenutzt.

Tabelle 1 Technische Spezifikationen (der Hersteller) für die untersuchten handgeführten 3D-Scanner

	POP 3 Plus	MetroX
Scan-Technologie	Strukturiertes Licht	Blauer Multilinielaser + vollflächiges blaues strukturiertes Licht, Tiefenkamera
Lichtquelle	Strukturiertes Infrarotlicht	14 gekreuzte Laserlinien, 7 parallele Laserlinien, 62 Linien Vollfeld, strukturiertes blaues Licht
Einzelbildgenauigkeit	bis zu 0,08 mm	bis zu 0,02 mm
Einzelbildpräzision	bis zu 0,04 mm	bis zu 0,01 mm
Scan-Volumen	20 × 20 × 20 mm - 2 × 2 × 2 m	10 × 10 × 10 mm - 1 × 1 × 1 m
Scan-Geschwindigkeit	bis zu 18 fps	bis zu 7.000.000 Punkte/s
Arbeitsabstand	150 mm – 400 mm	200 mm – 400 mm
Farbscannen	Ja	Nein, nur mit kleinem Drehteller
Kalibrierung durch Benutzer	Ja	Ja
Scan-Umgebung	Im Innen- und Außenbereich	nicht im Freien
Preis	ca. € 600.-	ca. € 1200.-



Abbildung 2 Übersicht über die verwendeten Referenzobjekte (von links nach rechts): oben: Stein 1, Stein 2, Stein 3, unten: Inschriftenstein, Kopf, Steinbeilklinge (Darstellung nicht maßstabsgetreu)

4 Datenerfassung und -verarbeitung

Um die Einsatzmöglichkeiten der beiden Aufnahmesysteme im Feld zu testen, wurden die zuvor vorgestellten Objekte damit gescannt. Aufgrund des frühzeitigen Abbruchs der Messkampagne in Yeha konnten die Steine 1–3 nicht mehr vor Ort mit dem MetroX aufgenommen werden. Außerdem konnte das Steinbeil aufgrund seiner Oberflächeneigenschaften nicht mit dem POP 3 Plus erfasst werden.

4.1 Handgeführte 3D-Scanner

Der Scanvorgang verläuft bei beiden Handscannern grundsätzlich ähnlich. Zunächst wird der Scanner mit dem PC verbunden. Während hierfür beim POP 3 Plus ein einfaches USB-Kabel genügt, muss der MetroX zusätzlich an eine Steckdose angeschlossen werden, da er kontinuierlich Strom benötigt. Vor dem eigentlichen Scannen kann eine Kalibrierung erforderlich sein. In der Revopoint-Software lässt sich auf einen Blick erkennen, ob eine IMU-Kalibrierung nötig ist. Dieser Test nimmt nur wenige Sekunden in Anspruch, eine vollständige Kalibrierung mithilfe einer Kalibriertafel dauert nur wenige Minuten. Vor jedem Aufnahmetag wurde überprüft, ob eine Kalibrierung erforderlich ist. Falls ja, wurde diese durchgeführt, um optimale Scanergebnisse zu gewährleisten. Bei jedem Scan wurde der kontinuierliche Aufnahmemodus gewählt, der mehrere Frames pro Sekunde (fps) aufnimmt. Ebenso wurden alle Scans mit der Einstellung „hohe Genauigkeit“ aufgenommen. Die Wahl des

Verfolgungsmodus hängt von der Beschaffenheit des Objekts ab. Objekte mit vielen Oberflächenmerkmalen wurden mit Feature Tracking aufgenommen, detailarme oder flache Objekte mit Marker Tracking. Dafür wurden entweder selbstklebende Marker verwendet oder die mitgelieferte Unterlage, auf der sich bereits Marker befinden. In diesem Modus müssen immer mindestens fünf Marker pro Aufnahme sichtbar sein.

Das Farbscannen hat nur beim POP 3 Plus funktioniert, da der MetroX dafür mit dem automatischen Drehteller verbunden sein muss. Da dieser allerdings nur für kleinere Objekte geeignet ist, eine kontinuierliche Stromversorgung benötigt und keine stabile Verbindung zur Software aufweist, wurde er in dieser Arbeit außer Acht gelassen. In der Praxis, vor allem im Feldeinsatz, könnte der Drehteller aufgrund dieser Schwierigkeiten kaum zum Einsatz kommen.

Während des Scanvorgangs zeigt die Software dem Anwender an, ob die Tiefenkameras über- oder unterbelichtet sind und ob der Aufnahmeabstand passend ist oder angepasst werden muss. Sowohl die Belichtung der Tiefenkameras als auch die Helligkeit des Lasers werden während des Scanvorgangs automatisch von der Software angepasst. Dies ist auch bei den Farbeinstellungen möglich, die jedoch auch manuell reguliert werden können. Um die optimalen Parameter für Farbaufnahmen zu ermitteln, wurden die einzelnen Einstellungen getestet. Belichtung, Weißabgleich und Blitz können reguliert bzw. eingeschaltet werden. Generell sollte darauf geachtet werden, nicht im direkten Sonnenlicht zu scannen, sondern an sehr bewölkten Tagen oder vor Sonnenaufgang bzw. nach Sonnenuntergang. Ebenso wird empfohlen, nicht zu häufig über die gleichen Stellen zu scannen, da dies zu Rauschen führen kann.

Die Auswertung der Scans erfolgt mit der von Revopoint bereitgestellten Software Revo Scan 5 (Version 5.5.3) bzw. Revo Scan 5 Metro X (Version 5.6.6). Die Benutzeroberflächen sind hier sehr intuitiv bedienbar und fast identisch.

Zunächst wurden die einzelnen Frames zu einer dichten Punktwolke fusioniert. Ein wichtiger Parameter ist dabei der Punktabstand, also die durchschnittliche Distanz zwischen benachbarten Punkten der fusionierten Punktwolke. Objekte mit vielen feinen Details profitieren von einem geringeren Punktabstand, während bei flachen, strukturlosen Oberflächen ein größerer Punktabstand genügt, um die Dateigröße und Rechenlast zu reduzieren. Die erzeugte Punktwolke wurde mithilfe von Bearbeitungstools bereinigt. Dabei wurden beispielsweise Ausreißer gefiltert, Überlappungen erkannt oder Reduzierungen durchgeführt. Anschließend wurden die Scans der einzelnen Objektseiten zu einem Gesamtmodell manuell über drei identische Referenzpunkte oder

automatisch zusammengeführt, worauf die Berechnung eines Volumenkörpers mithilfe der Dreiecksvermaschung folgte. Danach wurde das Mesh bearbeitet, indem beispielsweise Löcher gefüllt oder Glättungen vorgenommen wurden. Zum Schluss wurde beim POP 3 Plus eine Texturierung durchgeführt, da dieser Scanner über eine RGB-Kamera verfügt und somit Farbinformationen erfasst. Dadurch entsteht ein farbiges und realitätsnahes 3D-Modell. Die Arbeitsschritte waren mit dem MetroX fast identisch, außer dass die Objektfarbe durch die handgeführte Aufnahme nicht erfasst wurde.

4.2 Photogrammetrische Aufnahmen

Da keine hochauflösenden Referenzdaten von präzisen Messsystemen, wie beispielsweise High-End-Streifenprojektionssystemen, zur Verfügung standen, wurden die Objekte mit der Photogrammetrie-Methode „Structure from Motion“ als Vergleichsverfahren aufgenommen. So konnte die Plausibilität überprüft und eine geometrische Analyse der Handscanner-Aufnahmen durchgeführt werden.

Ähnlich wie bei vietnamesischen archäologischen Objekten (Kersten & Lindstaedt, 2017) wurden alle Testobjekte mit verschiedenen digitalen Kameras aufgenommen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 Eingesetzte digitale Kameras für die Aufnahme der Testobjekte

Kamera	MPix	Sensor [mm]	Objektiv [mm]	Objekte
Nikon D7000	16,2	23,6×15,6	Nikkor Zoom 35	Kopf
Nikon D7500	20,9	23,5×15,6	Nikkor 18	Stein 3
Sony α 7	24,0	36×24	Zeiss 24	Stein 1+2, Inschrift

Um bei den kurzen Aufnahmeentfernungen scharfe Bilder zu erhalten, wurde für die Aufnahmen der Autofokus eingestellt. Alle Objekte wurden von zwei bis vier Seiten aus jeweils mit 144 bis 399 Bildern aufgenommen. Die Auswertung der Bildverbände erfolgte mit Agisoft Metashape (Version 1.8.4). Zur Skalierung der Bildverbände wurden kalibrierte Maßstäbe mit den Längen 13 cm, 29 cm und 45 cm um das Objekt gelegt. Diese wurden automatisch in den Bildern gemessen. Anschließend wurden die Kamerakalibrierungen und die Bildorientierungen in einer Bündelblockausgleichung berechnet. Nach der Bereinigung der Messfehler

wurde für jeden Bildverband eine dichte Punktwolke mit der Qualität „low“ gemessen. Um die Bildverbände für das jeweilige Objekt zusammenzuführen, wurde eine Dreiecksvermaschung mit geringer Auflösung berechnet, mit der anschließend die Objektflächen im Bildraum maskiert wurden. Nach der Verschmelzung der jeweiligen Bildverbände über die Masken wurden eine neue Kamerakalibrierung und die Bildorientierungen in einer Bündelblockausgleichung berechnet. Mit den aktualisierten Parametern der inneren und äußeren Orientierungen wurden für die „gemergten“ Chunks die 3D-Modelle mithilfe der Tiefenkarten (Depth Maps) und dem Qualitätsparameter „high“ berechnet.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Testobjekte aus dem Museum am Rothenbaum in Hamburg (MARKK) dargestellt. Für die geometrischen 3D-Vergleiche wurde die Software CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2016) verwendet.

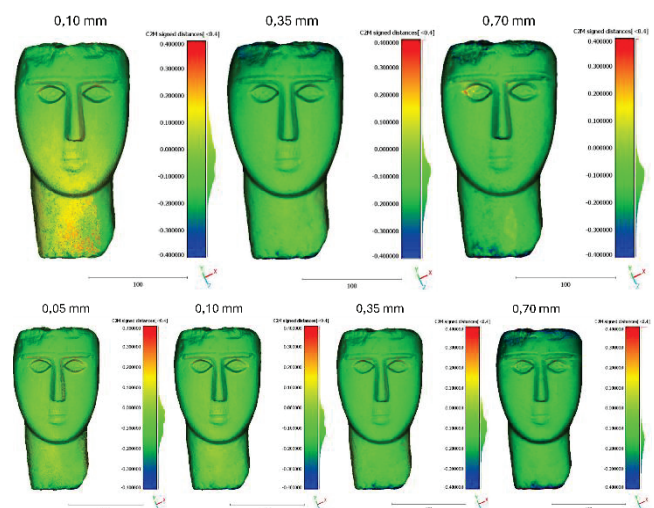


Abbildung 3 3D-Vergleiche in CloudCompare für den Kopf in verschiedenen Auflösungen vs. Nikon D7000: oben: POP 3 Plus, unten: MetroX. (Farbskala der Abweichungen von -0,4 mm (blau) bis +0,4 mm (rot), grün 0,1 mm)

Der Porträtkopf aus Alabaster weist bei beiden 3D-Handscannern nur geringe Abweichungen gegenüber der „Referenz“ Nikon D7000 auf (siehe Abb. 3). Die grüne Farbe zeigt Abweichungen im Bereich von 0 bis -0,2 mm. Nur bei der sehr hohen Auflösung des POP 3 Plus sind geringe systematische Abweichungen dokumentiert.

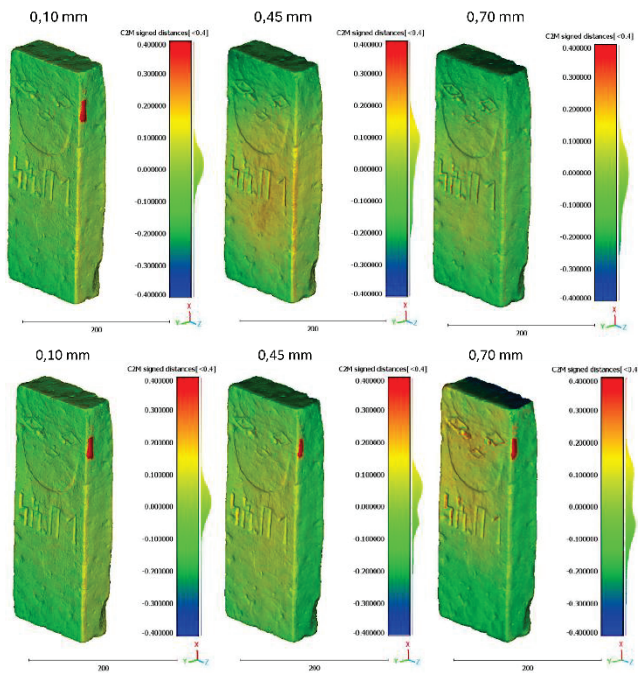


Abbildung 4 3D-Vergleiche in CloudCompare für den Inschriftenstein in verschiedenen Auflösungen vs. Sony $\alpha 7$: oben: POP 3 Plus, unten: MetroX. (Farbskala der Abweichungen von -0,4 mm (blau) bis +0,4 mm (rot), grün 0,1 mm)

Auch bei dem Inschriftenstein zeigen sich für beide 3D-Handscanner nur geringe Abweichungen gegenüber der „Referenz“ Sony $\alpha 7$ (siehe Abb. 4). Die grüne Farbe zeigt Abweichungen im Bereich von $-0,2$ mm bis $+0,1$ mm. Bei den reduzierten Auflösungen des POP 3 Plus und des MetroX sind geringe systematische Abweichungen sichtbar. Die rote Stelle am Rand des Inschriftensteins resultiert aus hohen Abweichungen an der sehr reflektierenden Inventarnummer, was besonders die Resultate des MetroX-Scanners beeinflusste.

In den 3D-Modellen ist bei höheren Auflösungen ein leichtes Rauschen erkennbar (siehe Abb. 5 und 6). Bei geringen Auflösungen zeigt sich dagegen ein leichter Glättingseffekt.

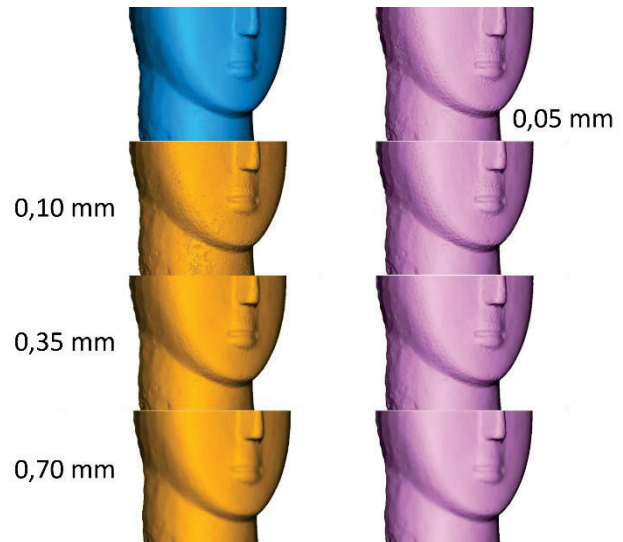


Abbildung 5 3D-Modelle vom Porträtkopf: Nikon D7000 (blau), POP 3 Plus (orange) und MetroX (pink)

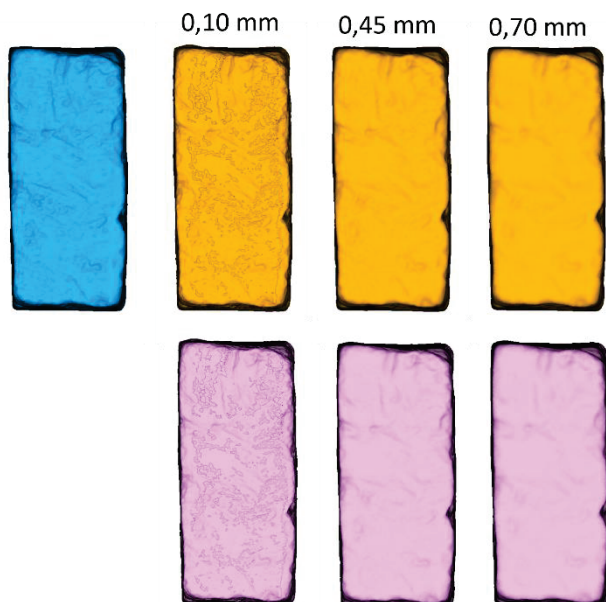


Abbildung 6 3D-Modelle vom Inschriftenstein: Nikon D7000 (blau), POP 3 Plus (orange) und MetroX (pink)

In weiteren geometrischen Untersuchungen wurde die Wiederholgenauigkeit der Aufnahmen getestet, um sicherzustellen, dass die gleichen Ergebnisse reproduziert werden können. In Abb. 7 wurde Stein 2 vier Mal mit dem 3D-Handscanner POP 3 Plus aufgenommen und mit dem 3D-Modell verglichen, das aus Aufnahmen mit der Sony $\alpha 7$ abgeleitet wurde. Für alle vier 3D-Modelle wurden durchschnittliche Abweichungen von jeweils 0,3 mm erreicht.

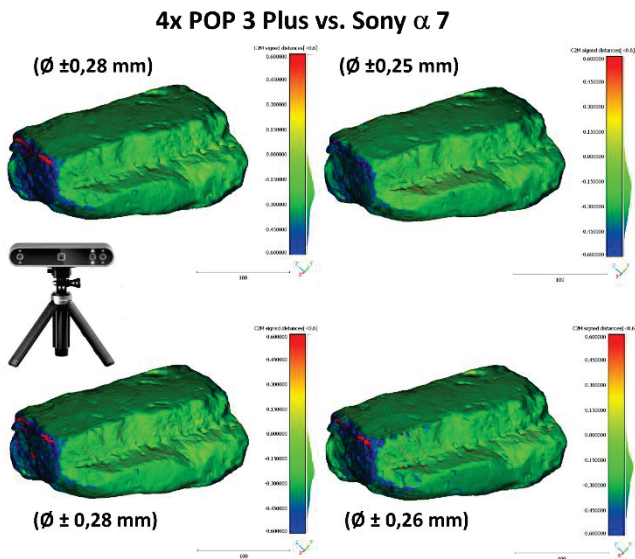


Abbildung 7 3D-Vergleiche in CloudCompare für den Stein 2 vs. Sony $\alpha 7$, der vier Mal mit dem POP 3 Plus aufgenommen wurde (Test auf Wiederholbarkeit)

In Abb. 8 sind die Abweichungen der beiden mit dem 3D-Handscanner MetroX aufgenommenen 3D-Modelle vom Inschriftenstein dargestellt und mit dem Ergebnis der Sony $\alpha 7$ verglichen. Die durchschnittlichen Abweichungen gegenüber dem „Referenzmodell“ betragen $\pm 0,1$ mm, allerdings sind die farblich dargestellten Abweichungen leicht unterschiedlich.

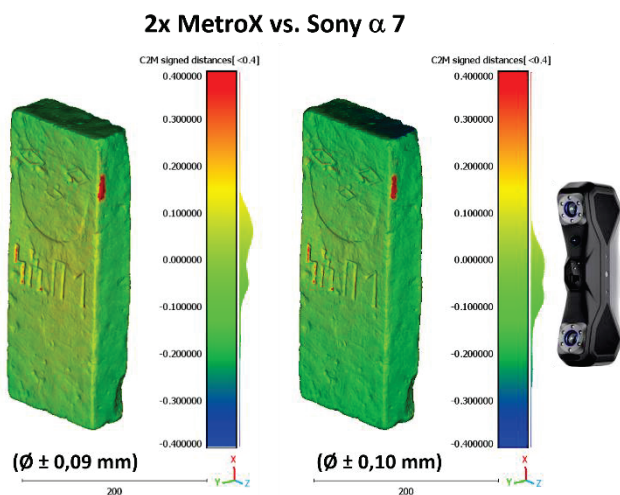


Abbildung 8 3D-Vergleiche in CloudCompare für den Inschriftenstein vs. Sony $\alpha 7$, der zwei Mal mit dem MetroX Scanner aufgenommen wurde (Test auf Wiederholbarkeit)

Die dunkle und glänzende Steinbeilklinge stellte sich aufgrund ihres Materials und ihrer Textur als schwierig aufzunehmendes Objekt heraus (siehe Abb. 9). Während der 3D-Scanner POP 3 Plus und die photogrammetrischen

Aufnahmen kein Ergebnis lieferten, stellte das Objekt für den MetroX-Scanner mit Blaulicht kein Problem dar. Ein 3D-Modell konnte problemlos generiert werden, jedoch konnte mangels Referenzmodell kein 3D-Vergleich durchgeführt werden.



Abbildung 9 Foto (oben) und 3D-Modell der Steinbeilklinge (unten), die mit dem MetroX Scanner aufgenommen wurde

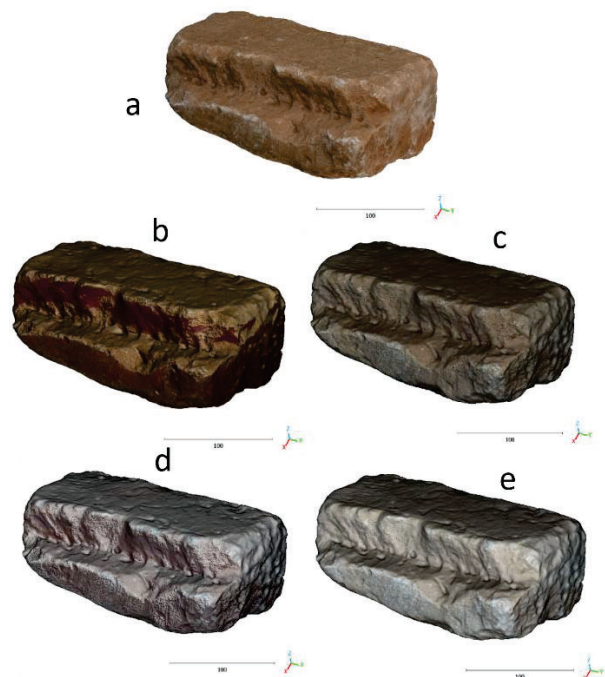


Abbildung 10 3D-Modelle vom Stein 3 mit verschiedenen aufgenommenen Farbmodi mit dem POP 3 Plus: (a) Sony $\alpha 7$, (b) manuelle Belichtung ohne Blitz, (c) manuelle Belichtung mit Blitz, (d) automatische Belichtung ohne Blitz und (e) automatische Belichtung mit Blitz

Der 3D-Scanner POP 3 Plus verfügt über verschiedene Farbmodi für die Aufnahme von Objekten, darunter manuelle und automatische Belichtung mit und ohne Blitz. Diese Farbmodi wurden bei der Aufnahme des Objekts „Stein 3“ getestet und mit dem eingefärbten Modell der Sony $\alpha 7$ verglichen. Abb. 10 zeigt die unterschiedlichen Resultate der Farbwiedergabe des Scanners POP 3 Plus. Alle Ergebnisse weichen farblich stark vom „Referenzmodell“ der Sony $\alpha 7$ ab. Daraus lässt sich ableiten, dass neben einer geometrischen auch eine Farbkalibrierung erforderlich ist, wenn eine farbtreue Wiedergabe der 3D-Modelle wichtig ist.

6 Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die beiden untersuchten 3D-Handscanner für die präzise Erfassung archäologischer und musealer Objekte eignen. Photogrammetrische Verfahren können aufgrund der erreichbaren Genauigkeit im Submillimeterbereich als Vergleichs- und Referenzverfahren im Objektraum dienen.

Beim geometrischen Vergleich der beiden eingesetzten 3D-Handscanner POP 3 Plus und MetroX zeigte sich, dass die Punktdistanz einen entscheidenden Einfluss auf die Modellqualität hat. Zwar führen kleinere Punktdistanzen zu geringeren RMS-Werten und somit zu einer höheren geometrischen Genauigkeit (siehe Tabelle 3), gleichzeitig nimmt jedoch das Rauschen deutlich zu (siehe Abb. 5 und 6). Aufgrund der höheren Auflösung der 3D-Modelle ergibt sich eine sehr große Anzahl von Polygonen (siehe Tabelle 3), was zu erhöhten Speicheranforderungen sowie längeren Lade- und Verarbeitungszeiten führt. Eine zu geringe Punktdichte glättet dagegen die Modelle und lässt feine Details verschwinden. Daher haben sich Punktdistanzen zwischen 0,3 mm und 0,5 mm als optimal erwiesen. In diesem Bereich konnten rauschfreie, detailgetreue Modelle erstellt werden. Daher wird empfohlen, grundsätzlich mit einem Punktabstand im Bereich von 0,3–0,5 mm zu arbeiten und die Distanz bei auftretendem Rauschen gegebenenfalls leicht zu erhöhen.

Insgesamt ähneln sich die Ergebnisse der beiden Scanner stark, was nicht überrascht, da sie vom selben Hersteller stammen und die Software mit wenigen Änderungen identisch ist. Wird der RMS als Qualitätsmerkmal betrachtet, dann sind die Ergebnisse bis auf geringe Abweichungen nahezu identisch (siehe Tabelle 3). Die Qualität der Scans wurde maßgeblich durch die Materialeigenschaften, die Oberflächentexturen, die Farbgebung und die Beleuchtungssituation beeinflusst. Sowohl glatte als auch unebene Flächen konnten mit beiden Scannern zuverlässig erfasst

werden (siehe beispielsweise den Kopf in Abb. 5). Dabei wurden sowohl die glatte Vorderseite als auch die unebene Rückseite zuverlässig erfasst und modelliert. Auffällig waren jedoch die größeren Abweichungen, die insbesondere in vertieften Bereichen sowie in den seitlichen Bereichen von Modellen auftraten, die aus Ober- und Unterseite zusammengeführt wurden. Dies wird in Abb. 7 deutlich.

Tabelle 3 Qualitätsmerkmale der berechneten 3D-Modelle des Kopfes und des Inschriftensteines

Objekt	Scanner	Abstand	RMS	Polygone
		[mm]	[mm]	
Kopf	POP 3	0,10	0,10	21.947.949
	POP 3	0,35	0,15	933.744
	POP 3	0,70	0,16	245.226
	MetroX	0,05	0,10	36.183.113
	MetroX	0,10	0,12	21.780.724
	MetroX	0,35	0,13	1.703.412
	MetroX	0,70	0,21	262.010
In-schriftenstein	POP 3	0,10	0,07	24.936.260
	POP 3	0,45	0,11	1.382.010
	POP 3	0,70	0,10	547.916
	MetroX	0,10	0,07	18.635.142
	MetroX	0,45	0,09	1.566.364
	MetroX	0,70	0,12	647.020

Auch bei der Aufnahme dunkler oder glänzender Oberflächen zeigten sich Schwierigkeiten. Während der POP 3 Plus die Inventarnummern auf den Museumsobjekten problemlos erfassen konnte, versagte der MetroX in diesem Punkt (siehe Abb. 4). Die Inventarnummern bestehen aus einer Grundierung mit Harz, einer Beschriftung mit Tinte oder Acryl sowie einer glänzenden Lackschicht. Dieser Aufbau war für den MetroX offenbar zu dunkel oder zu reflektierend. Hierbei entstanden stets Löcher, die softwareseitig interpoliert werden mussten. Während dies bei manchen Objekten (z. B. am Kopf) unauffällig gelang, war bei der Inschrift aufgrund der besonders dunklen Lackierung keine Geometrie rekonstruierbar (siehe rote Markierung in den Abb. 4 und 8).

Dem MetroX gelang es hingegen, eine sehr dunkle und glatte Steinbeilklinge erfolgreich zu digitalisieren, indem der passende Aufnahmemodus für schwarze Objekte eingestellt wurde (siehe Abb. 9). Sowohl der POP 3 Plus als auch die Photogrammetrie scheiterten an dem Objekt. Dieses Problem ließe sich beim POP 3 Plus möglicherweise durch Mattierungsspray beheben, was jedoch aus konservatorischen Gründen bei Museumsobjekten in der Regel nicht erlaubt ist. Insgesamt konnten die untersuchten Materialien –

Alabaster, Kalkstein und Sandstein – mit beiden Geräten zuverlässig erfasst werden. Lediglich die Steinbeilklinge aus Nephrit und die Inventarnummern mit glänzendem Lackfinish bereiteten Probleme.

Insgesamt stellten sich die Belichtung der Objekte und die Farbwiedergabe als Schwachpunkte der Systeme heraus. Zwar erzielte der POP 3 Plus mit manueller Belichtung und Blitz die besten Ergebnisse (siehe Abb. 10), allerdings waren diese farblich verfälscht im Vergleich zum 3D-Modell von der Sony $\alpha 7$. Ein weiterer Nachteil war, dass nach einem Softwareabsturz dieselbe Belichtungseinstellung leicht abweichende Farbwerte erzeugte. Somit war auch innerhalb eines Projekts keine konsistente Farbwiedergabe möglich. Um die tatsächliche Farbgebung der Objekte originalgetreu wiederzugeben, ist daher eine Farbkalibrierung erforderlich, die allerdings noch in die Software integriert werden müsste.

Die Abhängigkeit der Tiefenkamera von den Lichtverhältnissen führte dazu, dass Aufnahmen im Außenbereich nahezu unmöglich waren, da die Kamera bereits bei diffussem Tageslicht überbelichtete. Daher sind Innenaufnahmen zwingend erforderlich, was jedoch durch einseitige Lichtquellen und Schattenwurf die Texturqualität beeinträchtigt. Beim MetroX sind Farbaufnahmen ohne Drehteller nicht möglich, wodurch sich die Einsatzoptionen für archäologische Dokumentationen stark einschränken.

Auch die technische Stabilität beider Systeme stellte eine Einschränkung dar: Bei langen oder komplexen Aufnahmen kam es wiederholt zu Softwareabstürzen oder starken Verzögerungen, was den Arbeitsprozess erschwerte. Somit sind die Scanner eher für mittelgroße bis kleine Objekte geeignet, während großformatige Aufnahmen noch erhebliche Schwierigkeiten bereiten.

Die Wiederholgenauigkeit war bei beiden Scannern hoch. Es konnten vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, unabhängig davon, ob die Modelle mit dem Merkmals- oder dem Referenzpunktverfahren erstellt wurden (siehe Abb. 7 und 8). Die Abweichungen zwischen wiederholt gescannten und modellierten Datensätzen lagen im Bereich von 0,04–0,08 mm, wobei die RMS-Werte in allen Wiederholungen nahezu konstant blieben. Lediglich die Abweichungen zur photogrammetrischen Referenz waren mit 0,3 mm beim POP 3 Plus und 0,1 mm beim MetroX etwas höher. Bei allen Modellen wird jeweils eine vergleichbare Anzahl an Polygonen berechnet. Es kann von einer konsistenten Stabilität der Verfahren ausgegangen werden. Dies verdeutlicht, dass beide Systeme stabile und zuverlässig reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Hinsichtlich der Handhabung konnten beide Scanner bei der Anwendung durch zwei Testpersonen (eine Archäologin

und eine Restauratorin) überzeugen. Sowohl die Archäologin als auch die Restauratorin gaben an, dass sie nach einer Einarbeitung von einem Tag den sicheren Umgang mit den Geräten beherrschten. Die Benutzeroberflächen wurden als verständlich empfunden, wenn auch Schwierigkeiten bei der gleichzeitigen Beobachtung mehrerer Anzeigen sowie bei der Wahl der Scangeschwindigkeit während des Scanvorgangs auftraten. Unterschiede zeigten sich bei der Ergonomie und Stabilität: Probandin 1 bevorzugte den MetroX, Probandin 2 den POP 3 Plus. In der Nachbearbeitung ließen sich die Modelle beider Scanner relativ einfach weiterverarbeiten. Dabei wurden die einfache Benutzeroberfläche und die wenigen Bearbeitungsschritte als vorteilhaft genannt. Auch wenn die Gesamtqualität der Modelle Unterschiede aufwies – der POP 3 Plus wies teilweise stärkeres Rauschen auf, der MetroX hingegen stabilere und sehr genaue Ergebnisse lieferte – wurden beide Systeme als praktikabel beschrieben.

Ein Vergleich mit der Photogrammetrie macht die jeweiligen Stärken und Schwächen von Handscannern deutlich. Die Photogrammetrie ist insbesondere in Bezug auf Farbtreue und Texturqualität weiterhin überlegen und bleibt daher für Ausstellungen oder Publikationen die erste Wahl. Handscanner bieten hingegen erhebliche Vorteile in Bezug auf Geschwindigkeit und Handhabbarkeit. Für schnelle Dokumentationen im Außeneinsatz in abgedunkelten Bereichen sind sie eine sinnvolle Ergänzung, auch wenn Abstriche bei der Farbqualität und teilweise bei der Detailtiefe gemacht werden müssen. Diese Einschätzung wird durch Literaturquellen (siehe Kapitel 2) gestützt, in denen Handscanner als praxistaugliche, jedoch nicht vollwertige Alternative zur Photogrammetrie beschrieben werden.

7 Fazit & Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass Low-Cost-3D-Handscanner wie der Revopoint POP 3 Plus und der MetroX großes Potenzial für die geometrische Dokumentation archäologischer Objekte besitzen. Beide Systeme lieferten reproduzierbare, geometrisch verlässliche Ergebnisse und konnten auch von Personen ohne tiefgehendes technisches Vorwissen nach kurzer Einarbeitung erfolgreich verwendet werden. Damit stellen sie eine praktikable Ergänzung zu etablierten Verfahren wie der Photogrammetrie und dem Laserscanning dar, insbesondere bei der schnellen, unkomplizierten und berührungslosen Erfassung kleiner bis mittelgroßer Objekte.

Gleichzeitig traten deutliche Einschränkungen zutage. Die Materialeigenschaften der Objekte, ihre Oberflächen-

texturen sowie die Beleuchtungssituation beeinflussten die Qualität der Modelle erheblich. Besonders problematisch waren dunkle oder glänzende Oberflächen sowie die Farbtreue und die Belichtungskonsistenz. Auch die Softwarestabilität und die Handhabbarkeit bei großformatigen Objekten stellen nach wie vor eine zentrale Herausforderung dar und begrenzen den Einsatzbereich aktuell noch. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz solcher Scanner stets anwendungsabhängig ist und die hier erzielten Ergebnisse nicht ohne Weiteres übertragbar sind. Sie gelten spezifisch für die untersuchten Objekte, Bedingungen und Gerätekonfigurationen.

In der archäologischen Praxis ergibt sich daraus ein differenziertes Bild: Die Photogrammetrie bleibt das Referenzverfahren für farbtreue und publikationstaugliche Ergebnisse. Low-Cost-Handscanner bieten dagegen entscheidende Vorteile in Bezug auf Geschwindigkeit, Mobilität und Benutzerfreundlichkeit. Sie eignen sich somit insbesondere für die feldarchäologische Dokumentation, für interne Arbeitsprozesse in Museen sowie für den schnellen Zugriff auf digitale Referenzdaten.

Im Vergleich zu früheren Systemen, die von Kersten et al. (2016 und 2018) getestet wurden, haben sich die 3D-Handscanner technologisch deutlich verbessert, da sie eine wichtige Systemkalibrierung vor den Aufnahmen ermöglichen. Ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen verdeutlicht, dass die Bedeutung kostengünstiger Handscanner in der Archäologie mit einer weiteren Verbesserung der Sensortechnologie, der Softwarestabilität und der Farbkalibrierung weiter zunehmen wird. Perspektivisch könnten sie in hybride Workflows eingebunden werden, in denen Photogrammetrie und 3D-Scanning gezielt kombiniert werden, um sowohl Farbtreue als auch geometrische Präzision zu gewährleisten. Ebenso erscheinen Cloud-basierte Lösungen zur Datensicherung und -verarbeitung sowie eine stärkere Integration in museale Datenbanken als relevante Zukunftsfelder. Darüber hinaus sollten künftige Arbeiten die Langzeitstabilität der Scanner kritisch hinterfragen, zusätzliche Materialien systematisch testen und den MetroX verstärkt in Kombination mit einem Drehteller zur Farberfassung einsetzen. Zu berücksichtigen ist auch, dass bereits neue Revopoint-Modelle auf dem Markt verfügbar sind, die möglicherweise bessere Ergebnisse erzielen und die hier gewonnenen Erkenntnisse ergänzen oder relativieren könnten. Ein Beispiel ist die neue MetroY-Serie, die mit neuen Funktionen wie integrierten Temperatursensoren oder einem Einzellinien-Modus noch bessere Ergebnisse erzielen soll (Revopoint 3D, 2025).

Low-Cost-3D-Handscanner leisten bereits heute einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung beweglicher Kulturgüter. Ihre Weiterentwicklung verspricht, die digitale Dokumentation noch effizienter, zugänglicher und nachhaltiger zu gestalten und somit neue Impulse für Forschung, Lehre und Vermittlung im archäologischen Kontext zu setzen.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei Marta Kaminska (ehemals Deutsches Archäologisches Institut, Berlin) sowie bei Susanne Harbach (MARKK, Hamburg) für die erfolgreichen Tests mit den beiden 3D-Handscannern von Revopoint.

Literaturverzeichnis

- Girardeau-Montaut, D. (2016). CloudCompare. France: EDF R&D Telecom ParisTech, 11(5), 2016
- González-Merino, R., Sánchez-López, E., Romero, P. E., Rodero, J., & Hidalgo-Fernández, R. E. (2021). Low-Cost Prototype to Automate the 3D Digitization of Pieces: An Application Example and Comparison. *Sensors*, 21(8), 2580, <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2580>, letzter Zugriff 1. April 2026
- Kersten, T., & Lindstaedt, M. (2017). Mit Kamera, Maßstab und Laptop - Best Practice zur Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 26, Tagungsband der 37. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, 8.-10. März 2017 in Würzburg, 35–44. http://www.dgpf.de/src/tagung/jt2017/proceedings/proceedings/papers/04_DGPF2017_Kersten_Lindstaedt.pdf, letzter Zugriff 1. April 2026
- Kersten, T., Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Tschirschwitz, F., & Misgaiski-Hass, M. (2016). Genauigkeitsuntersuchungen handgeführter Scannersysteme. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25, Tagungsband der 36. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, Dreiländertagung vom 7.-9. Juni 2016 in Bern, 271–287, https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2016/proceedings/papers/26_DLT2016_Kersten_et_al.pdf, letzter Zugriff 3. April 2026
- Kersten, T., Starosta, D., & Lindstaedt, M. (2018). Zum Genauigkeitspotenzial aktueller handgeführter 3D-Scanner. *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018* Luhmann, T. & Schumacher, C. (Hrsg.), Berlin, Offenbach, Wichmann, 114–128. https://3dtage.services.fbbgg.hs-woe.de/tagungsbaende/3D-Tage_2018_E-Book.pdf, letzter Zugriff 1. April 2026

- McPherron, S. P., Gernat, T., & Hublin, J.-J. (2009). Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds. *Journal of Archaeological Science*, Elsevier, 19–24, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.06.028>
- Patrucco, G., Rinaudo, F., & Spreafico, A. (2019). A new handheld scanner for 3D survey of small artifacts: The Stonex F6. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, 895–901, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-895-2019>, letzter Zugriff 1. April 2026
- Reuter, T., Elburg, R., & Innerhofer, F. (2014). 3D-Funddokumentation – Ein Anwendungsbericht aus dem Landesamt für Archäologie Sachsen. *Staatliche Museen zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz (Hrsg.), Konferenzband EVA Berlin: Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie*, 127–135. https://www.researchgate.net/publication/272162414_3D-Funddokumentation_-_Ein_Anwendungsbericht_aus_dem_Landesamt_fur_Archaeologie_Sachsen, letzter Zugriff 2. April 2026
- Revopoint 3D (2025). Revopoint MetroY & MetroY Pro 3D Scanners: Drahtlose blaue Laser-3D-Scanner. <https://global.revopoint3d.com/de-de/pages/metroy-3d-laser-scanner>, letzter Zugriff 2. April 2026
- Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C., Pingi, P., & Scopigno, R. (2002). A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, 20(3), 299–308, <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>

Bildgestützte Lokalisierung von Zielkörpern in der Strahlentherapie

Cyrril Milkau¹, Sebastian Preußel², Hans-Gerd Maas², Danilo Schneider¹

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt den konkreten Ablauf einer Transformationskette, durch die ein modellierter Zielkörper indirekt lokalisiert werden kann. Am Beispiel einer Puppe demonstriert, wird durch direkte Beobachtung von Kugelmarkern auf ein innenliegendes Zielvolumen geschlossen. Hierzu werden Marker verwendet, die sowohl in CT- als auch in RGB-Bildern sichtbar sind. Zusätzlich wird eine Methode zur sinnvollen Modellierung des Zielvolumens präsentiert. Bewegungen im Millimeterbereich können durch das entwickelte System sicher erfasst und mittels Oberflächenverschiebungen relativ zu Referenzposen quantifiziert sowie für medizinische Anwendungen visualisiert werden.

Schlagwörter 3D-Positionsbestimmung · 2D-RGB-CT-Datenfusion · Medizintechnik

1 Einführung

1.1 Motivation

Zur effektiven Behandlung von Tumorerkrankungen im Kopfbereich werden in der Strahlentherapie Immobilisierungswerkzeuge (u.a. Stabilisatoren, Nackenkissen, Kopfmasken) verwendet, die am Patienten angebracht werden, um eine stabile, initiale Position des zu bestrahlenden Zielvolumens während der Bestrahlungssitzung zu gewährleisten. Diese verursachen mitunter ein hohes Maß an Stress am Patienten, an Zeitaufwand im Behandlungsablauf und zuletzt an Materialverschleiß im Kontext der Nachhaltigkeit. Bei unbeabsichtigter Positionsabweichung des Zielvolumens während der Behandlung, kann es zur ungewollten Bestrahlung gesunden Gewebes kommen. Eine kontinuierliche, statistisch quantifizierte Lokalisierung des Zielvolumens während der gesamten Behandlungsdauer ist daher wünschenswert. Zudem könnte eine Reduzierung oder komplette Entfernung der Maske ermöglicht werden.

In dieser Arbeit wird eine indirekte Lokalisierungsmethode beschrieben, die es ermöglicht, auf Basis von RGB-Bildern und vorliegenden Daten aus anderen bildgebenden Verfahren (z.B. Computertomographie (CT)) mit Hilfe von Markern die Lage und Orientierung eines Zielvolumens innerhalb eines umschließenden Puppenkopfes zu bestimmen.

Der Kopf soll durch Kameras erfasst werden, wobei die Kugelmarken sichtbar, das Zielvolumen jedoch nicht sichtbar ist.

1.2 Begriffe und Konventionen

In der Strahlentherapie und Radioonkologie spielen verschiedene Volumina-Konzepte eine Rolle bei der Behandlung von Tumorerkrankungen: das Gross Tumor Volume (GTV; eigentlicher Primärtumor), das Clinical Target Volume (CTV; Zielgebiet plus potentiell Ausbreitungsgebiet), das Planning Target Volume (PTV; Sicherheitssaum unter Berücksichtigung von Lageungenauigkeiten und Organbewegungen) sowie das Internal Target Volume (ITV; Atemkurve berücksichtigt) (ICRU, 2010). Alle Volumina werden in einem Planungs-CT bestimmt und gehen in die Bestrahlungsplanung ein, um die optimale Abdeckung im Rahmen der verordneten Strahlendosis zu gewährleisten. Entscheidend ist daher neben dem eigentlichen Volumen noch dessen Pose (Lage und Orientierung) im Raum. Diese wird unter anderem durch das Isozentrum realisiert, welches den Mittelpunkt der beiden beteiligten Bestrahlungsfelder (i.d.R. Protonen

strahler) darstellt – das Zielvolumen wird praktisch mit dem Isozentrum in Übereinstimmung gebracht. Weiterhin werden bei der Einrichtung des Patienten gewisse Abstände betrachtet – hauptsächlich hier der Fokus-Achs-Abstand (FAA) der zwischen Isozentrum und Beschleuniger definiert ist. Relevant ist auch der Fokus-Tisch-Abstand, da dieser

¹ HTW Dresden, Fakultät Geoinformation, E-Mail: [cyrril.milkau, danilo.schneider]@htw-dresden.de

² TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, E-Mail: [sebastian.preussell, hans-gerd.maas]@tu-dresden.de

den Bezug zum Behandlungstisch herstellt. Dieser dient auch der Übertragung der geometrischen Information (z.B. Nullpunkt) vom Zeitpunkt des Planungs-CTs (Tag A, Ort X) hin zum Einrichten des Patienten am Bestrahlungsgerät (Tag B, Ort Y; mehrere Tage Zeitunterschied und wechselnde Behandlungsorte möglich). Zur allgemeinen Beschreibung der Orientierung werden in der Medizin meist drei Patientenebenen (coronar, sagittal, transversal) mit Ursprung im Beckenbereich sowie drei Richtungspaare (medial/ lateral, ventral/dorsal, cranial/caudal) verwendet (Betts et al., 2022). Weiterhin existieren zahlreiche Lagebezeichnungen (ipsi/contra, sinister/dexter, proximal/distal) und Konventionen (z.B. Visualisierung CT transversal in craniale Richtung in der Strahlentherapie).

In der Photogrammetrie werden hingegen die bekannten Konventionen zur Definition von Koordinatensystemen (z.B. Lage Ursprung Bildkoordinatensystem in Bildmitte) verwendet. Zur Modellierung von Volumina existieren unterschiedliche Möglichkeiten (Primitive, Vermaschung, Interpolationen), wobei eine Visualisierung meist auf eine Darstellung des Volumens als Vermaschung zurückgreift. Eine Diskrepanz zwischen numerischer visueller Darstellung und analytischer rechnerischer Behandlung ist daher unvermeidbar. Für diesen Ansatz wurde auf eine Modellierung durch Zernike Polynome zurückgegriffen, welche gleichermaßen eine gute numerische Approximation ermöglicht, jedoch auf eine streng mathematische (teils physikalische) Parametrisierung zurückgreift.

1.3 Software/Hardware

In dieser Arbeit wurde hauptsächlich auf quelloffene Software zurückgegriffen. Die Verarbeitung der Daten erfolgte in selbst entwickelten Anwendungen, die sowohl die Schnittstelle zum verwendeten Mehrkamerasystem (MKS, Kamera-Applikation), als auch Auswerte- und Visualisierungsmöglichkeiten für den Anwender bereitstellen (Analyse-Applikation). Das MKS besteht aus vier RGB-Industriekameras die mittels Ethernets an eine Workstation angeschlossen sind (s. Tab. 1 und Abb. 1). Die Kameras wurden für diese Tests ausschließlich Softwaresynchron verwendet, ohne einen externen Hardware-Trigger. Aufnahme und Verarbeitung der RGB-Bilder sind von deren Analyse und eventueller 3D-Visualisierung entkoppelt, um ein möglichst flexibles und kompaktes Systemdesign zu ermöglichen. Datenaustausch zwischen den einzelnen Softwarepaketen erfolgt

über eine *Publisher-Broker-Subscriber* Architektur, bei der Informationen als Pakete (Nachrichten) zwischen den beteiligten Anwendungen ausgetauscht und abgefragt werden. Eine Übersicht ist in Abbildung 2 gegeben. Dieser Ansatz ermöglicht zukünftig auch die konzeptionelle Trennung zwischen Aufnahmeeinheit (Kameras) und Auswerteeinheit (Lokalisierung Zielvolumen) auf verschiedene Recheneinheiten bzw. räumliche Separation in Behandlungs- und Überwachungsraum. Über das TCP/IP werden standardisierte Formate verwendet, um die Nachrichten zwischen dem Sender (*Publisher*) und Empfänger (*Subscriber*) auszutauschen.

Tabelle 1 Technische Daten Hardware

MARS-2440	
Sensortyp	IMX540 (25MP, RGB)
Bildrate	35 FPS (max.)
VA-LCM	
Brennweite	25 mm
Blendenzahl	F2.4
Workstation	
CPU	Intel® Xeon® w3-2525 3.50 GHz
GPU	NVIDIA RTX 2000 Ada
RAM	128 GB
NIC	Intel® X710-T4L



Abbildung 1 Mehrkamerasystem und Messaufbau

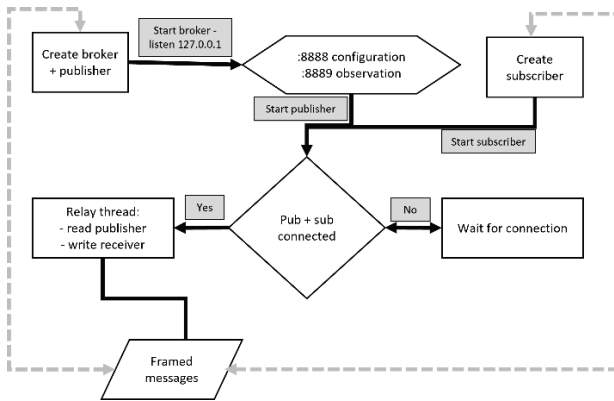


Abbildung 2 Publisher-Broker-Subscriber Architektur

2 Methoden

Die Lokalisierung des Zielvolumens beinhaltet mehrere Teilaspekte, von denen die wesentlichen im Folgenden beschrieben werden.

2.1 Modellierung Zielvolumen

Durch semi-automatische Segmentierung des GTV (manuelles Einzeichnen durch Radiologen, dann Verschneiden in Slicer) wird das Zielvolumen extrahiert. Es liegt zunächst als *Nearly Raw Raster Data* (NRRD) als Labelmap vor und wird durch ein Skript in eine gelabelte Punktwolke umgewandelt (s. Abb. 3). Anschließend erfolgt die Modellierung des Zielvolumens durch 3D Zernike Polynome. Diese eignen sich gut zur Modellierung einer Dichteverteilung, da sie eine vollständige orthogonale Basis auf dem Einheitsball darstellen (Canterakis, 1999). Durch den dabei fest definierten orthogonalen Radialanteil lassen sich z.B. die innere Masseverteilung und Trägheitsmomente berechnen – was bei einer freien Parametrisierung dessen (z.B. bei Kugelfunktionen) nicht eindeutig gegeben wäre.

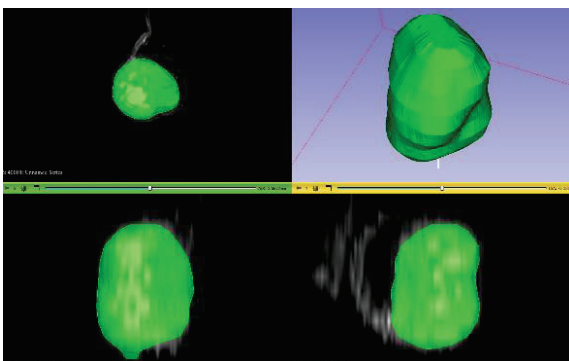


Abbildung 3 Segmentierung GTV

Der Ablauf ist wie folgt: Für ein beliebiges Skalarfeld f auf einem kompakten Volumen („Hülle“) wird eine Darstellung als Linearkombination der 3D-Zernike Basisfunktionen angestrebt. Die Funktion wird über alle gültigen Indextripel (n, l, m) entwickelt und lautet daher:

$$f(r, \theta, \varphi) \approx \sum_{n,l,m} c_{nlm} Z_{nlm}(r, \theta, \varphi) \quad (1)$$

Das in Z_{nlm} enthaltene normierte Radialpolynom R_{nl} ist direkt abhängig von r und die ebenfalls enthaltenen normierten reellen Kugelflächenfunktionen Y_l^m von θ und φ . Zu bestimmen sind lediglich die Zernike-Koeffizienten c_{nlm} nach dem folgenden vereinfachten Ablaufschema, basierend auf Ansätzen aus (Novotni and Klein, 2004) und (Houdayer and Koehl, 2022):

1	Punktwolke P mit Skalarfeld eingeben (Voxel-Gitter aus NRRD-Labelmap-Segmentierung) und Zentrierung um Mittelpunkt
2	Normierung auf Einheitskugel; Skalierung und Mittelpunkt erhalten für Rekonstruktion
3	Umwandlung in Kugelkoordinaten
4	Aufbau der Design-Matrix (Funktionswerte der Basisfunktionen an Messpunkten)
5	Überbestimmte lineare Regression; Minimierung Residuen in Least-Squares-Fit

Sind die Koeffizienten bestimmt, können sie für eine volumetrische Rekonstruktion (als Mesh) verwendet werden. Zur Vereinfachung wird diese nachfolgend als das zu betrachtende Zielvolumen (quasi ohne Dichte) betrachtet, um die für diese Arbeit zentrale grundlegende Transformationskette zu beschreiben, ohne weitere physikalische Eigenschaften zu berücksichtigen. Das rekonstruierte Mesh (s. Abb. 4) wird im Folgenden zur Darstellung und Differenzanalyse verwendet, um die Auswirkung der Re-Lokalisierung des Zielvolumens metrisch quantifizieren zu können.

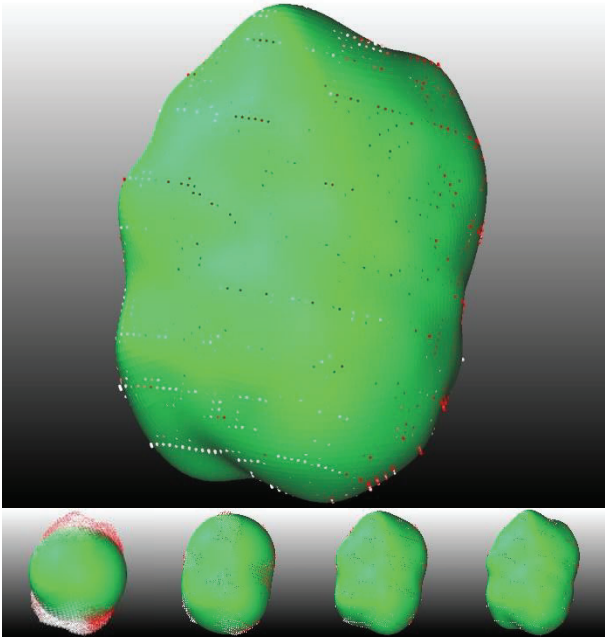


Abbildung 4 Rekonstruiertes Mesh aus Polynomen aufsteigender maximaler Ordnung (0, 4, 8, 12, 15)

2.2 Detektion Kugelmarken

Essenziell für die indirekte Lokalisierung des Zielvolumens ist die direkte Lokalisierung von geeigneten Marken. In dieser Arbeit werden kugelförmige Marken verwendet, deren Oberfläche sowohl in RGB-, als auch in CT-Bildern gut erkennbar ist. Zur Detektion der Kugelmarker im RGB-Bild werden deren kreisförmige Abbildungen segmentiert. Dies geschieht durch einen Hough-basierten Ansatz, bei dem zunächst die Grauwerte im relevanten Bildbereich normiert und anschließend Kandidaten für Kreise basierend auf zwei einfachen Schwellwerten für Kantendetektion und Sensitivität gefunden werden. Die Pixel der Kandidaten werden dann auf den absoluten Anteil an weißen Pixeln (Schwellwertbasiert) und Kontrast gegenüber dem Außenbereich gefiltert. Die vereinfachte Annahme einer zirkulären Abbildung der Kugelmarker im Bild bedeutet, dass Kreismittelpunkt (u, v) , Projektionszentrum und Kugelmittelpunkt auf einem Strahl liegen und somit durch Detektion in mindestens 2 Bildern der Kugelmarker bestimmt wird. Im Sinne einer zweckmäßigen Vereinfachung wird bei der Detektion unter anderem von einer kreisförmigen Projektion der Kugeln ausgegangen. Da die Optimierung der einzelnen Teilschritte nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, wird eine hinreichend robuste Umsetzung als ausreichend betrachtet.

Es werden nicht-kodierte Kugelmarker verwendet, weshalb im Bild eine *Region of Interest* (ROI) pro sichtbarem

Kugelmarker definiert werden muss, welche dessen Abbildung zunächst visuell minimal umschließt. Diese ROI wird dann über ein nichtlineares Kalman-Filter in jedem neuen RGB-Bild neu positioniert, um eine Verfolgung und Indizierung der Kugelmarker zu ermöglichen (s. Abb. 5).

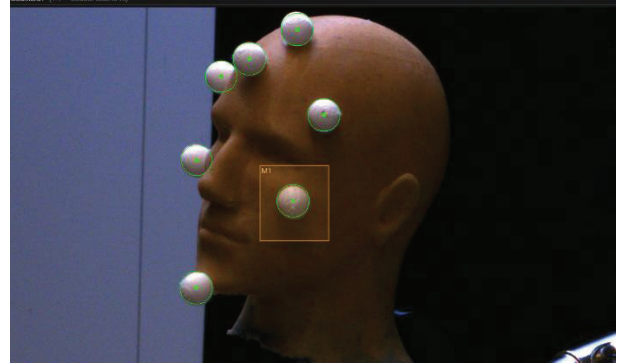


Abbildung 5 Detektion Kugelmarken im Bild innerhalb ROI (orange) durch Position und Radius (grün)

Im Folgenden wird das hier implementierte Filter kurz skizziert: Sei $\mathbf{s}_k = (u_k, v_k, \dot{u}_k, \dot{v}_k, \ddot{u}_k, \ddot{v}_k)$ der Zustandsvektor des Markers in Schritt k , initialisiert mit $\mathbf{s}_0 = (u_0, v_0, 0, 0, 0, 0)$. Um die Prädiktion für den Zustand $k + 1$ zu erhalten, wird eine Transitionsmatrix \mathbf{F} auf den aktuellen Zustand angewendet:

$$\mathbf{s}_{k+1|k} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}_{k|k} \quad (4)$$

mit der entsprechenden Prädiktions-Kovarianzmatrix $\mathbf{P}_{k+1|k}$. Die Innovation \mathbf{d}_{k+1} entspricht demnach der Diskrepanz zwischen prädizierter und tatsächlicher Beobachtung und die Innovations-Kovarianzmatrix \mathbf{S}_{k+1} kombiniert die Unsicherheit des prädizierten Zustands (durch Marker-Bewegung) mit Messunsicherheit (durch Marker-Detektion). Die Kalman-Verstärkung \mathbf{K}_{k+1} kombiniert die Prädiktion und Messung basierend auf den jeweiligen Unsicherheiten. Das Zustands-Update ergibt sich demnach zu

$$\mathbf{s}_{k+1|k+1} = \mathbf{s}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} \cdot \mathbf{d}_{k+1} \quad (5)$$

mit Update-Kovarianzmatrix $\mathbf{P}_{k+1|k+1}$, woraus sich der neue Zustand ergibt:

$$\mathbf{s}_{k+1} = (u_{k+1}, v_{k+1}, \dot{u}_{k+1}, \dot{v}_{k+1}, \ddot{u}_{k+1}, \ddot{v}_{k+1}) \quad (6)$$

Durch Anwendung dieses Filters können die Marker im Bild zuverlässig erkannt werden, auch wenn sie sich aus ihrer initialen Position fortbewegen. Durch eine Mehrbildauswertung identischer Marker können mittels eines implementierten räumlichen Vorwärtsschnittes 3D-Koordinaten für diesen Marker bestimmt werden.

2.3 Transformationskette

Die Transformation findet über mehrere Koordinatensysteme hinweg statt. Eine Prinzip-Skizze für den räumlichen Zusammenhang der Kugelmarker über verschiedene Systeme KS hinweg ist in Abbildung 6 gezeigt. Durch räumlichen Vorwärtsschnitt der Marker-Bildkoordinaten entstehen Objektpunkte P_i^A im System KS^A . Diesen werden Objektpunkte P_i^B aus dem CT-Koordinatensystem KS^B zugeordnet. In diesen ist der eigentliche Zielpunkt P_Z^B bekannt. Da P_i^A und P_i^B den gleichen Punkt in unterschiedlichen Systemen darstellen, besteht eine zeitinvariante Starrkörpertransformation T_{KS}^{AB} , die nur einmal bestimmt und anschließend berücksichtigt werden muss. Durch die Verkettung kann anschließend direkt von P_i^A auf den Zielpunkt P_Z^A im System KS^A geschlossen werden.

Das für die Ausgleichung verwendete funktionale Modell stellt demnach eine leicht modifizierte Form der Kollinearitätsgleichungen dar, bei der die Starrkörpertransformation des Zielvolumens durch Pose ($\boldsymbol{x} = (t_x, t_y, t_z, \alpha, \beta, \gamma)$) und Objektpunkte (S^A) berücksichtigt werden muss:

$$\hat{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{\pi}(\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \mathbf{S}_i^A + \mathbf{t}(t_x, t_y, t_z), \mathbf{e}_k, \mathbf{c}_k) \quad (7)$$

Der Einfluss von Messunsicherheiten innerhalb der Transformationskette wird durch die allgemeine Fehlerfortpflanzung berücksichtigt (Niemeier, 2008). Es ergeben sich die Kovarianzmatrizen

$$\mathbf{J}_{\hat{\boldsymbol{x}}, \Pi} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \frac{\partial \hat{\boldsymbol{l}}}{\partial \Pi} \quad (8)$$

$$\Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{\Pi} = \sum \mathbf{J}_{\hat{\boldsymbol{x}}, \Pi} \cdot \Sigma_{\Pi} \cdot \mathbf{J}_{\hat{\boldsymbol{x}}, \Pi}^T \quad (9)$$

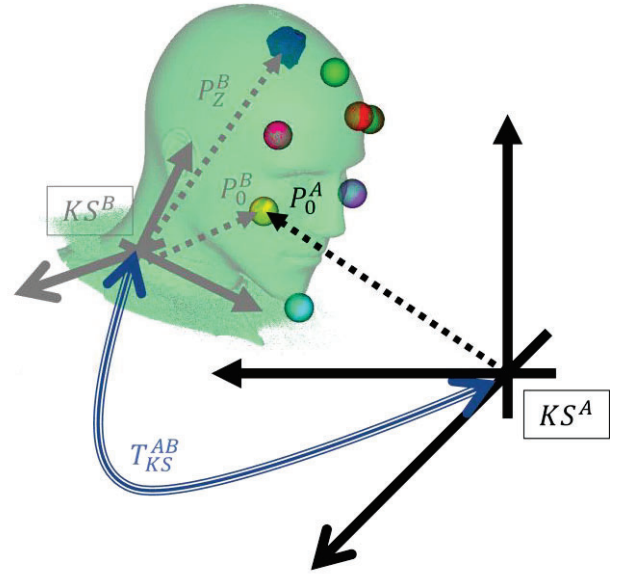


Abbildung 6 Objektpunkte (z.B. P_0) liegen sowohl in KS^A (schwarz) als auch KS^B (grau) vor; das Zielvolumen ist hingegen nur in KS^B bekannt und muss durch die Transformation T_{KS}^{AB} in das System KS^A gebracht werden

wobei Π jeweils die Parameter für innere Orientierung, äußere Orientierung und CT-Marker-Koordinaten symbolisiert. Mit der Kovarianz der Bildmessung $\Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(img)} = \sigma_0^2 \mathbf{N}^{-1}$, wird die Gesamtvarianz in diesem Ansatz wie folgt bestimmt:

$$\Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}} = \Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(img)} + \Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(int)} + \Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(ext)} + \Sigma_{\hat{\boldsymbol{x}}}^{(ctr)} \quad (10)$$

3 Praktischer Lokalisierungsablauf

3.1 Untersuchungsgegenstand

Zur Demonstration des Ablaufs wird ein Miniaturkopf (Höhe ca. 6 cm) verwendet (s. Abb. 7, links). An diesem sind 3D-gedruckte Kugeln befestigt, die als Kugelmarker dienen. Diese sind sowohl im RGB-Bild als auch im CT-Bild sichtbar. Im Inneren des Kopfes befindet sich ein Stück Hartgummi, das als Zielvolumen dient - dieses ist nur im CT-Bild ersichtlich.

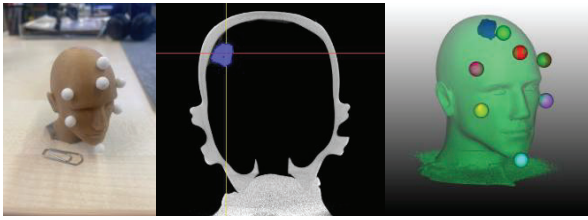


Abbildung 7 Links: Puppenkopf mit Kugelmarkern; Mitte: CT-Scan Schnitt mit Zielvolumen und Markern; Rechts: Segmentierte Kugeln aus STL-Punktwolke

3.2 Pre-Processing (Vorbereitung)

Die innere und äußere Orientierung wurde daher zunächst bestimmt und durch das in Kapitel 2.2 beschriebene Verfahren werden im weiteren Ablauf die Bildkoordinaten der Zielmarker-Zentren im Bild als Beobachtungen ermittelt und als Objektpunkte S^A gemäß der Transformationskette aus Kapitel 2.3 berechnet. Der Kopf wurde zusätzlich als CT-Scan (s. Abb. 7, Mitte). In diesem sind die Zielmarken ebenfalls sichtbar, da sie sich materialbedingt von dem Testobjekt sichtbar abheben. Als Qualitätsmaß für die Detektierbarkeit der Oberfläche dient dabei die Hounsfield-Skala, welche die Abschwächung der Röntgenstrahlung im Gewebe quantifiziert. Nach dieser lässt sich in der quelloffenen Anwendung Slicer (Fedorov et al., 2012) filtern, um eine Attribut-basierte Segmentierung vornehmen zu können. Aus dem CT-Scan entsteht eine TIF-Datei, welche in Slicer weiterverarbeitet wird. In dieser sind nun sowohl die Zielmarken als auch das Zielvolumen enthalten. Erstere stellen dabei die Objektpunkte S^B der in Kapitel 2.3 beschriebenen Transformationskette dar. Um deren Koordinaten zu bestimmen, wurde aus dem TIF in Slicer ein vollständiges Voxelgitter (Voxelgröße ca. 0.03 mm) erzeugt und als skaliertes STL-Mesh (Voxelgröße als Skalierungsfaktor) exportiert. Aus den STL-Vertices wurden anschließend einzelne Marker-Punktcluster der 7 Kugelmarker manuell segmentiert. In diese wurde eine optimale Kugel pro Cluster eingepasst und die entsprechenden Kugelzentren als Objektpunkte S^B definiert (s. Abb. 7, rechts). Das Zielvolumen wurde mit der in Kapitel 2.1 beschriebenen Methode modelliert. Ein mittlerer Cloud-to-Cloud-Abstand von ca. 0.05 mm zwischen Mesh-Vertices des ursprünglichen und des modellierten Oberflächenmodells bestätigt die hinreichend genaue Abstraktion (s. Abb. 8).

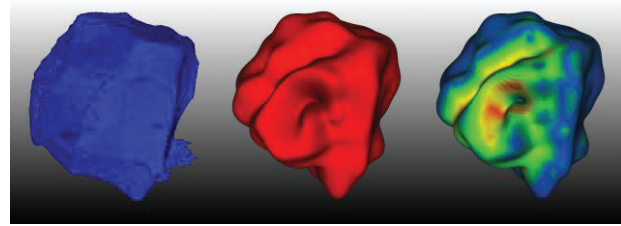


Abbildung 8 Modellierung des segmentierten Zielvolumens (links) durch Zernike Polynom bzw. dessen Rekonstruktion (mittig) und Abstandsanalyse (rechts)

Eine Voruntersuchung hinsichtlich der Performanz (s. Abb. 9) bei der Anwendung von Transformationen auf das modellierte Volumen zeigt die Vorteile bei Verwendung der Zernike Polynome gegenüber einer ausschließlichen Parametrisierung als Vermaschung – Rotationen im Parameterraum (unter Verwendung entsprechender Rotationsmatrizen (Ivanic and Ruedenberg, 1996)) gelangen mitunter mit einer Größenordnung schneller bei moderater Entwicklungsstufe (10^{-1} s gegenüber 10^0 s). Je höher der Detailgrad (Grad und Ordnung), desto geringer wird dieser Vorteil jedoch. Da die Translation beim Mesh auf alle Vertices, bei der Parametrisierung jedoch nur auf den Schwerpunkt angewendet werden muss, lassen sich auch hier deutliche Unterschiede in der Performanz erkennen (10^{-5} s gegenüber 10^{-1} s). Diese Untersuchung ist aufgrund der geringen Stichprobengröße und eingeschränkten Variation der Testparameter zwar nur bedingt aussagekräftig, soll jedoch die Verwendung der Parametrisierung im Kontext der angestrebten Anwendung hervorheben und motivieren.

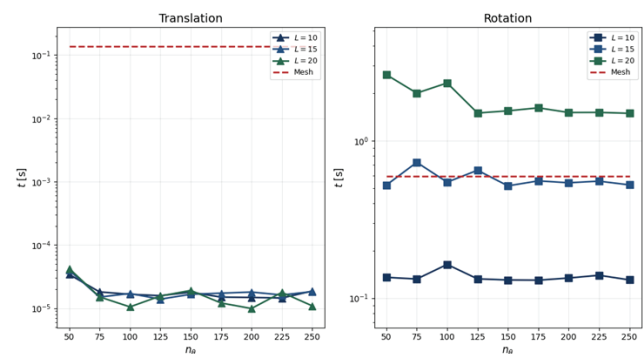


Abbildung 9 Vergleich Dauer von Translation (links) bzw. Rotation (rechts) des segmentierten Zielvolumens im Vergleich zu modellierten Zernike Polynomen unterschiedlichen Grades L und Ordnungen η

3.3 Processing (Messablauf)

Für die experimentelle Untersuchung wurden zuerst die Bildsequenzen aufgezeichnet und diese anschließend im Post-Processing als Replay abgespielt und verarbeitet. Obwohl das System grundsätzlich echtzeitfähig ist, ist eine von der Akquise getrennte Analyse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit für diesen Ansatz vorteilhaft. Die Detektion der Kugeln in der Kamera-Applikation erfolgt, sobald der Miniatürkopf im Zielbereich eingesetzt und die entsprechenden ROIs in der Kamera-Anwendung (s. Abb. 10) festgelegt wurden. Anschließend triggert ein Mechanismus die TCP/IP Schnittstelle, um die detektierten Bildkoordinaten an die Analyse-Applikation (s. Abb. 11) zu schicken und auszuwerten. Durch eine gemeinsame Bündelblockausgleichung aller Beobachtungen lassen sich festzulegende Parameter als Zielgrößen bestimmen. Zielgrößen sind neben den 7×3 3D-Koordinaten der Beobachtungen hauptsächlich die 6 Parameter der Zielkörper-Pose. Das System ist aufgrund der vorhandenen Anzahl an Kameras und Objektpunkten nur schwach überbestimmt ($r = (4 \times 7 \times 2) - (7 \times 3) - 6 = 29$), lässt sich jedoch numerisch lösen. Die Eulerwinkel folgen dabei dem bekannten ZYZ-Schema (Rotation von α um Z , Rotation von β um Y' , Rotation von γ um Z''). Im Verlauf der Messung kann zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Referenz-Pose des Zielvolumens gesetzt werden (s. Abb. 12). Anschließend erfolgt eine Abweichungsanalyse zur aktuellen Pose im Parameterraum ($\Delta x = (\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z)$) als normierte Translation

$$\|\Delta \mathbf{t}\| = \sqrt{\Delta t_x^2 + \Delta t_y^2 + \Delta t_z^2} \quad (11)$$

und als Rotationswinkel der Orientierungen (Murray et al., 2017)

$$\theta = \arccos\left(\frac{\text{tr}(\mathbf{R}_{ref}^T \mathbf{R}_{akt}) - 1}{2}\right) \quad (12)$$

und im globalen Koordinatensystem C^A , welche zum Beispiel durch eine Oberflächenverschiebung \mathbf{d}_j der beteiligten Vertices \mathbf{s}_j quantifiziert werden kann:

$$\mathbf{d}_j = \mathbf{R}_{akt} \mathbf{R}_{ref}^T \mathbf{s}_j + (\mathbf{t}_{akt} - \mathbf{R}_{akt} \mathbf{R}_{ref}^T \mathbf{t}_{ref}) - \mathbf{s}_j \quad (13)$$

$$\|\mathbf{d}_j\| = \sqrt{d_{j,x}^2 + d_{j,y}^2 + d_{j,z}^2} \quad (14)$$

Dieser Wert lässt sich als Mittelwert oder anteilig in jede Koordinatenrichtung bestimmen und bildet ein gutes Maß für die aktuelle Abweichung des Zielvolumens.

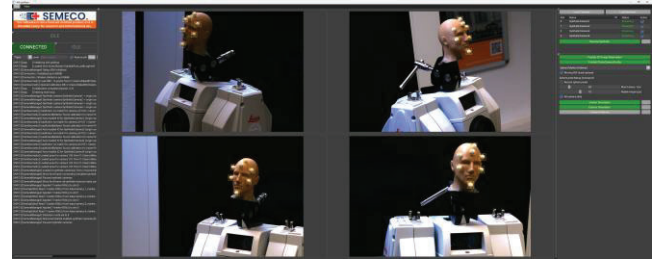


Abbildung 10 Kamera-Applikation

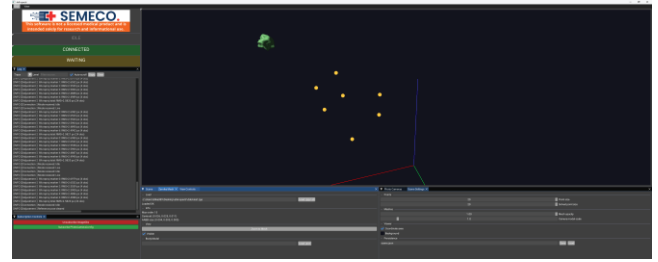


Abbildung 11 Analyse-Applikation

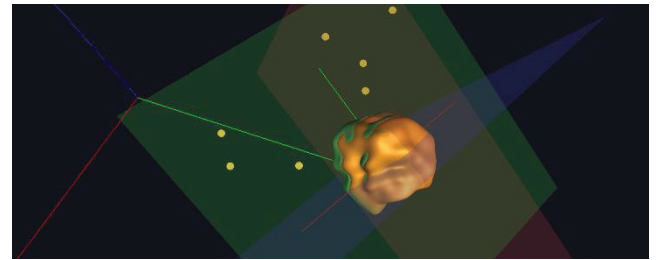


Abbildung 12 Referenzpose (orange) und aktuelle ausgeglichene Pose (grün) mit lokalem Medizinischen Koordinatensystem in Isozentrum (sagittal, coronal, transversal)

3.4 Post-Processing (Auswertung)

Zu Demonstrationszwecken wurde eine kleine vertikale Verschiebung und Rotation der Kugelmarker vorgenommen, die durch eine kontinuierliche Lokalisierung erfasst und in den entsprechenden Metriken aus den vorherigen Kapiteln quantifiziert wurde.

Abbildung 13 zeigt die Oberflächenverschiebung des aktuellen, als Mesh rekonstruierten Zielkörpers gegenüber einem Referenz-Zustand. Diese ist hier definiert als Mittelwert aller Vertex-Verschiebungen und stabilisiert sich nach ca. 200 Iterationen (ca. 18 mm). Zusätzlich dargestellt ist der Root Mean Square (RMS) der Verschiebung (welcher nahezu identisch mit dem Mittelwert ist), was für eine gleichförmige Starrkörperbewegung typisch ist. Alle Vertices wer-

den um nahezu den gleichen Betrag verschoben. Die Bewegung findet hauptsächlich entlang der x-Achse von statt (RMS_x ca. 17.8 mm gegenüber RMS_y ca. 0.26 mm und RMS_z ca. 1.0 mm).

Im medizinischen Koordinatensystem, das lokal im Isozentrum der Referenzpose definiert ist, verteilt sich dieselbe Gesamtverschiebung gleichmäßiger auf die drei Achsen (s. Abb. 14) (RMS_{sag} ca. 14.3 mm, RMS_{tra} ca. 8.0 mm, RMS_{cor} ca. 6.3 mm).

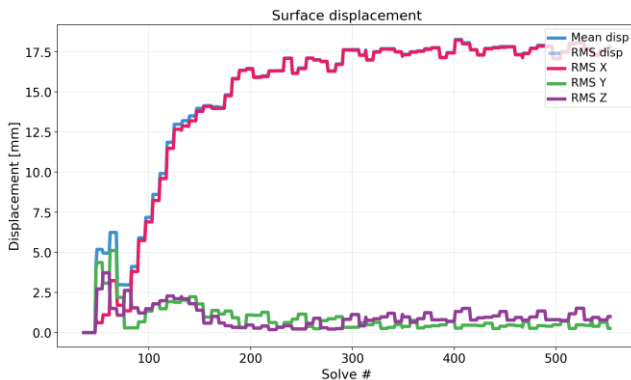


Abbildung 13 Oberflächenverschiebung des Zielvolumens gegenüber Referenzpose als Mittelwert und RMS pro Lokalisierungszeitpunkt

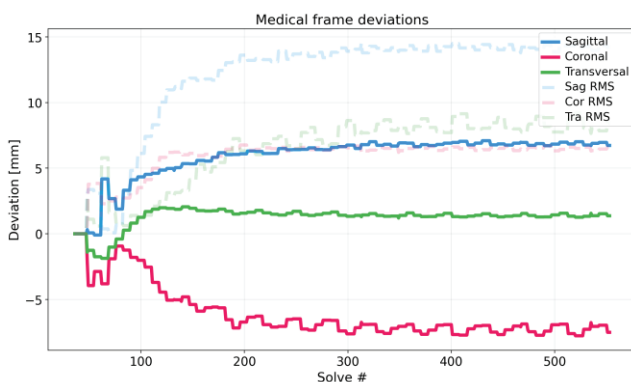


Abbildung 14 Verschiebung des Zielvolumens im lokalen Medizinischen Koordinatensystem der Referenzpose im Parameterraum ($\Delta t_x, \Delta t_y, \Delta t_z$) und RMS der Oberflächenverschiebung aller Vertices – jeweils projiziert auf sagittale, coronale und transversale Ebene

4 Diskussion und Ausblick

Die Transformationskette ist unter gemeinsamer Verwendung aller hier beschriebenen Methoden nachvollziehbar

dargestellt worden. Einzelne Aspekte wurden unter vereinfachten Annahmen rudimentär implementiert und können ggf. durch geeigneteren Verfahren ersetzt werden. Um den Ansatz auf reale Personen zu erweitern, müssen weitere Aspekte berücksichtigt werden (dynamische Bewegungen, Unsicherheiten durch Marker auf weicher Masse). Ein weiterer Punkt ist die Abschätzung der Messgenauigkeit. Dafür wurden bislang nur einzelne Ansätze gemacht, wie eine entsprechende Fehlerfortpflanzung im System berücksichtigt werden sollte. Allerdings dominierten in den Versuchen bislang einzelne Terme, sodass eine differenzierte Betrachtung der Einflüsse derzeit leider nicht möglich ist. Der Haupteinflussfaktor ist die unzureichende Kugeldetektion, welche jedoch für eine Anwendung am Patienten sowieso obsolet ist. Weiterhin ist die Stabilität des Kamerasystems durch eine geeignete Aufhängung sicherzustellen, damit nicht (wie in diesem Fall), Abweichungen von der äußeren Orientierung des Gesamtsystems zwischen Bestimmung dieser und dem eigentlichen Messvorgang auftreten (Vibrationen, Verschiebungen). Abgesehen davon ist das Gesamtergebnis jedoch äußerst zufriedenstellend – Lokalisierungsergebnisse im Millimeter-Bereich zeigen das Potential der Arbeit. Durch geeignete Optimierung einzelner Komponenten der Transformationskette sind Ergebnisse im sub-Millimeter Bereich erreichbar. Eine Anwendung der entwickelten Komponenten im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes SEMECO-B6 ist daher vorgesehen.

Literaturverzeichnis

- Betts, J.G., Desaix, P., Johnson, E., Johnson, J.E., Korol, O., Kruse, D., Poe, B., Wise, J., Womble, M.D., Young, K.A., 2022. Anatomy and physiology, 2e ed. OpenStax, Rice University, Houston, Texas.
- Canterakis, N., 1999. 3D Zernike Moments and Zernike Affine Invariants for 3D Image Analysis and Recognition.
- Fedorov, A., Beichel, R., Kalpathy-Cramer, J., Finet, J., Fillion-Robin, J.-C., Pujol, S., Bauer, C., Jennings, D., Fennessy, F., Sonka, M., Buatti, J., Aylward, S., Miller, J.V., Pieper, S., Kikinis, R., 2012. 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magn. Reson. Imaging* 30, 1323–1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Houdayer, J., Koehl, P., 2022. Stable Evaluation of 3D Zernike Moments for Surface Meshes. *Algorithms* 15, 406. <https://doi.org/10.3390/a15110406>
- ICRU, 2010. The International Commission on Radiation Units and Measurements. *J. ICRU* 10, NP.2-NP. <https://doi.org/10.1093/jicru/ndq001>

- Ivanic, J., Ruedenberg, K., 1996. Rotation Matrices for Real Spherical Harmonics. Direct Determination by Recursion. *J. Phys. Chem.* 100, 6342–6347. <https://doi.org/10.1021/jp953350u>
- Murray, R.M., Li, Z., Sastry, S.S., 2017. A mathematical introduction to robotic manipulation. CRC Press.
- Niemeier, W., 2008. Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. ed. Walter de Gruyter, Berlin.
- Novotni, M., Klein, R., 2004. Shape retrieval using 3D Zernike descriptors. *Comput.-Aided Des.* 36, 1047–1062. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.01.005>

Stereophotogrammetrische Messung von Schaumhöhen in Flotationsprozessen

Tine Marquardt^{1,2}, Tobias Lappan^{1,2}, Kerstin Eckert^{1,2} & Sascha Heitkam^{1,2}

Zusammenfassung

Bei der Aufbereitung von Rohstoffen mittels Schaumflotation spielen die Stabilität und das Fließverhalten partikelbeladener Schäume eine entscheidende Rolle. Die Ermittlung dieser Schaumeigenschaften kann durch orts aufgelöste Höhenmessungen verbessert werden. Wir stellen ein berührungsloses photogrammetrisches Messverfahren vor, das die Oberflächenstruktur von Flotationsschäumen aus kalibrierten, synchronisierten Stereoaufnahmen mittels semi-globalem Matching und Triangulation bestimmt. Die Methode wurde in einem Modell-Flotationsexperiment im Labormaßstab demonstriert und ermöglichte die Charakterisierung eines überfließenden Schaums hinsichtlich Fließverhalten und Schaumstabilität.

Schlagwörter Verfahrenstechnik · Schaumflotation · Stereophotogrammetrie · Höhenprofil · Semi-globales Matching

1 Einführung

Die Schaumflotation ist ein wichtiges Trennverfahren bei der Aufbereitung kritischer Ressourcen wie Basismetallen und seltenen Erden, die für die Energiewende unverzichtbar sind. So werden beispielsweise für die Kupfergewinnung jährlich mehrere Milliarden Tonnen kupferhaltiger Erze in Flotationsanlagen aufbereitet. Das Prinzip der Schaumflotation ist in Abb. 1 dargestellt. Erz wird zu Partikeln im Submillimeterbereich zermahlen und in bis zu 800 m³ großen Flotationszellen suspendiert. Die Wertminerale werden durch die Zugabe von Tensiden hydrophobisiert und haften an der Oberfläche millimetergroßer Luftblasen, die durch einen Rotor am Boden der Zelle eingebracht werden. Die Partikel-Blasen-Aggregate steigen an die Oberfläche der Zelle und bilden dort einen Schaum, der die Mineralien in hoher Reinheit enthält. Die wertlosen Bestandteile des Erzes verbleiben in der Flotationszelle. Der Schaum fließt über den Rand aus der Flotationszelle, wird gesammelt, und die darin enthaltenen Wertstoffpartikel können weiterverarbeitet werden.

Die Schaumzone spielt im Flotationsprozess eine entscheidende Rolle, da die Schaumeigenschaften die Menge und Reinheit der gewonnenen Wertstoffpartikel beeinflussen. Daher sind das Fließverhalten und die Stabilität des Schaums essentiell für die Optimierung von Flotationsprozessen und die Auslegung industrieller Flotationszellen (Mesa & Brito-Parada, 2019). Durch die Messung und

Regelung von Schaumeigenschaften kann die Effizienz von Flotationsprozessen erheblich gesteigert und Wasser und Energie eingespart werden.

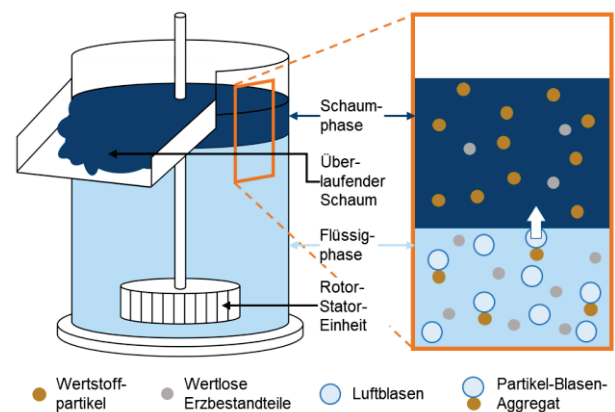


Abbildung 1 Verfahrensprinzip der Schaumflotation.

Aufgrund der Eigenschaften des partikelbeladenen Schaums und des Aufbaus industrieller Flotationszellen sind für das Monitoring der Schaumzone nicht-invasive, oberflächenbasierte Messtechniken erforderlich. Üblich sind optische Messungen, die physikalische Merkmale wie Blasengröße, Form, Farbe, Schaumgeschwindigkeit und Stabilität aus zweidimensionalen (2D) Schaumbildern gewinnen. Dafür werden etablierte Bildverarbeitungstechniken wie verschiedene Methoden zur Bildsegmentierung, aber auch statistische Methoden wie Fourier-Transformationen und Machine-Learning-Algorithmen genutzt (Aldrich et al., 2010,

¹ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Institut für Fluidodynamik, Bautzner Landstr. 400, 01328 Dresden, Deutschland, E-Mail: t.marquardt@hzdr.de

² Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrens- und Umwelttechnik, Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden, Deutschland

2022). Diese Messverfahren können jedoch nicht die Höhe und die dreidimensionale (3D) Form der Schaumoberfläche erfassen.

Die Höhe des überfließenden Schaums ist ein wichtiger Prozessparameter, da sie stark mit der Menge und Qualität des Wertstoffkonzentrats zusammenhängt. Üblicherweise wird diese Höhe durch eine berührungslose, punktweise Messung mit einem Time-of-Flight-Sensor (LiDAR) ermittelt. Solche Messungen können jedoch aufgrund der optischen Eigenschaften von Schäumen fehlerbehaftet sein (Marquardt et al., 2024; Shean et al., 2017). Eine Alternative ist die Nutzung industrieller Laser-Linienscanner, die ein Höhenprofil entlang einer Linie mittels Triangulation ermitteln und zur Charakterisierung von Höhenprofilen von überlaufendem Schaum genutzt werden können (Marquardt et al., 2025). Beide Sensortypen erfassen jedoch keine flächenhaften Informationen, die für eine detaillierte Analyse des Fließverhaltens und der Stabilität erforderlich sind.

Daher nutzen neuere Studien zunehmend photogrammetrische Messverfahren, um die 3D-Struktur der Schaumoberfläche zu erfassen. Beispielsweise schlagen Zhao et al. (2019) eine Methode zur 3D-Schaumrekonstruktion mit einer einzelnen Kamera vor, die auf Unschärfe und Beleuchtung der Schaumblasen basiert. Hu et al. (2024) verwenden einen Deep-Learning-basierten Ansatz mit Stereobildgebung durch zwei Kameras für eine 3D-Schaumrekonstruktion. Zhong et al. (2024) messen die Schaumhöhe mit einem Stereokamerasystem unter Nutzung der hellen Reflexionspunkte auf der Oberseite der Blasen. Auch Zheng et al. (2024) verwenden Stereokameras, um die Schaumhöhe über Stereodisparität und Deep Learning vorherzusagen. Zusätzlich schlagen Luo et al. (2024) eine spezielle Kalibrierungsmethode für binokulare Bildgebungssysteme in Schaumflotationszellen vor.

In der vorliegenden Arbeit nutzen wir für die Messung von Schaumhöhen ein photogrammetrisches Verfahren zur dichten 3D-Rekonstruktion der Schaumoberfläche aus orientierten Stereoaufnahmen mittels semi-globalem Matching und Triangulation. Ziel ist es, eine robuste Messmethode zu entwickeln, die unabhängig vom Aussehen und den physikalischen Eigenschaften des Schaumes funktioniert und in industriellen Flotationszellen eingesetzt werden kann. Das Verfahren wird an einer Flotationszelle im Labormaßstab mit überlaufendem Schaum demonstriert. Aus der resultierenden 3D-Struktur der Schaumoberfläche werden räumlich aufgelöste Höhenprofile am Überlauf der Zelle extrahiert. Beispielhaft wird gezeigt, wie diese genutzt werden können, um das Fließverhalten und die Stabilität von

Flotationsschäumen zu charakterisieren. Abschließend werden Messunsicherheiten diskutiert.

2 Methoden

2.1 3D-Rekonstruktion der Schaumoberfläche mittels Stereophotogrammetrie

Zur Rekonstruktion der Schaumoberfläche wurden stereoskopische Messungen mit zwei zeitlich synchronisierten Kameras durchgeführt und mittels MATLAB Version R2024b ausgewertet. Das Vorgehen ist in Abb. 2 schematisch dargestellt. Abb. 2a zeigt die verwendeten Koordinatensysteme. Die 3D-Form der Schaumoberfläche im Objektkoordinatensystem (X, Y, Z) wird aus einem Stereobildpaar (Bildkoordinatensysteme (x_1, y_1) , (x_2, y_2)) ermittelt.

Vor Beginn der Messungen wird eine Systemkalibrierung beider Kameras mit einem Kalibrierobjekt zur Bestimmung ihrer inneren und relativen Orientierung durchgeführt. Die absolute Orientierung im Objektkoordinatensystem wird über Referenzpunkte mit bekannter Position am oberen Rand der Flotationszelle ermittelt.

Anschließend werden konvergente Stereobildpaare der Schaumoberfläche aufgenommen und mithilfe der bekannten Kameraorientierung in Normalbilder umgewandelt (Abb. 2b). Dadurch wird der Suchbereich für die Zuordnung homologer Bildpunkte und damit der Rechenaufwand deutlich reduziert. Für die Bestimmung homologer Punkte wird semi-globales Matching verwendet (Hirschmüller, 2005). Diese Methode ist für die Anwendung auf Schaumbildern besonders geeignet, da auch eventuell vorhandene texturarme Bereiche robust verarbeitet werden (Luhmann, 2018). Somit kann der Großteil der Bildinformationen für die Auswertung genutzt werden. Pixel, für die aufgrund mangelnder Textur oder starker lokaler Reflexionen in den Schaumbildern keine Berechnung möglich ist, sind in Abb. 2c grau dargestellt.

Die x-Parallaxe (Disparität) der homologen Punkte variiert mit der Entfernung von der Schaumoberfläche. Die 3D-Koordinaten (X_C, Y_C, Z_C) werden rekonstruiert und in das Objektkoordinatensystem der Flotationszelle transformiert. Punkte, die außerhalb des durch den Versuchsaufbau definierten Bereichs liegen, werden aus der Punktwolke entfernt. Anschließend werden die Punkte mittels einer Delaunay-Triangulierung auf ein regelmäßiges Gitter interpoliert. Die Oberfläche wird mit einem Gauß-Filter geglättet (Abb. 2d). Diese 3D-Rekonstruktion wird dann zur Visualisierung der 3D-Struktur der Schaumoberfläche und zur Analyse verschiedener Schaumeigenschaften verwendet.

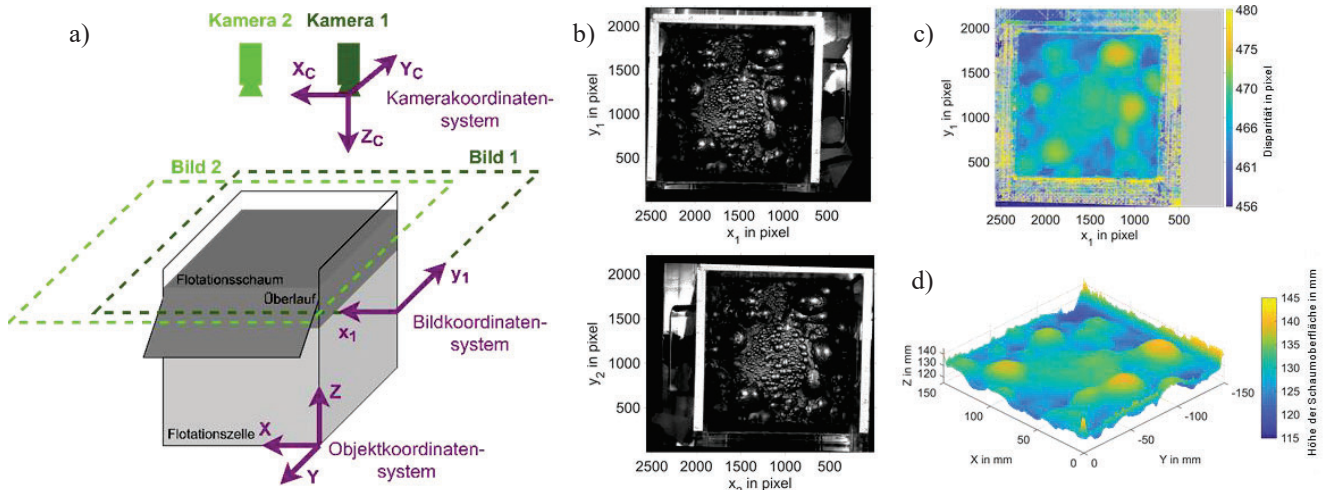


Abbildung 2 Stereophotogrammetrie zur Ermittlung der Oberflächenstruktur eines Flotationsschaums. a) Messsystem mit verwendeten Koordinatensystemen. b) Normalbilder der Schaumoberfläche. c) Berechnete Disparitäten. d) Ermittelte 3D-Struktur der Schaumoberfläche.

2.2 Versuchsaufbau und Bildaufnahme

Zur Demonstration der stereophotogrammetrischen Oberflächenrekonstruktion für die Schaumflotation wurde eine mechanische Flotationszelle im Labormaßstab (Firma Magotteaux) mit einem Volumen von 2,5 Liter und einer Querschnittsfläche von $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ verwendet. Das Rührwerk befindet sich unterhalb der Zelle, sodass die Schaumoberfläche sehr gut zugänglich für die optische Messtechnik ist. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3 gezeigt.

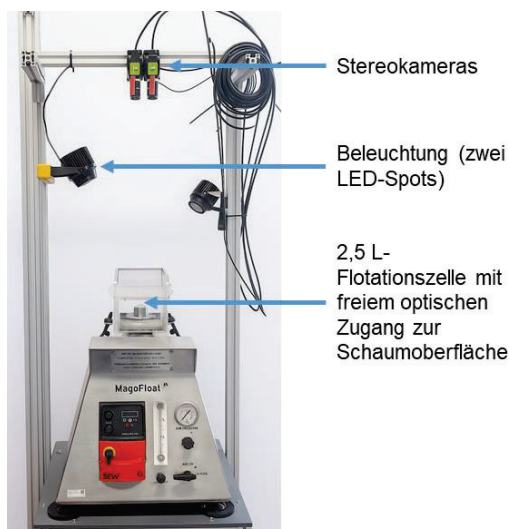


Abbildung 3 Versuchsaufbau für die Demonstration der stereophotogrammetrischen Oberflächenmessung von Flotationsschäumen im Labormaßstab.

Zur optischen Messung wurden zwei monochromatische CMOS-Kameras (JAI GO-5100M) verwendet, die durch

einen Hardware-Trigger zeitlich synchronisiert waren und mit einer Bildrate von 50 Hz aufnahmen. Die Bildgröße betrug jeweils $2464\text{ Pixel} \times 1028\text{ Pixel}$. Um ein großes überlappendes Sichtfeld zu erzielen, wurden die Kameras etwa 69 cm über dem Schaum befestigt. Die Basislänge betrug 4,5 cm. Der überlappende Bildbereich von ca. 70 % deckte die gesamte Breite des vorderen Abschnitts der Flotationszelle und des Überlaufs ab. Die Anordnung der Kameras war näherungsweise parallel zueinander und senkrecht zur Schaumoberfläche. Die genaue innere und relative Orientierung der Kameras wurde durch eine Kalibrierung ermittelt. Dafür wurden 128 konvergente Bildpaare eines 6×7 -Schachbrettmusters in verschiedenen räumlichen Positionen und Orientierungen aufgenommen. Es wurde ein mittlerer Reprojektionsfehler von 0,27 Pixel erzielt. Die ermittelte Höhe der Schaumoberfläche an jedem Pixel wurde auf ein Gitter mit einer Auflösung von 10 mm^{-1} interpoliert. Die daraus resultierende 3D-Punktwolke diente als Grundlage für die anschließende Analyse der Schaumoberfläche.

Um die Anwendbarkeit der photogrammetrischen Methode auf überlaufenden Flotationsschaum zu demonstrieren, wurde ein repräsentatives binäres Partikelsystem aus 10 % Magnetit und 90 % Quarz verwendet. Diese wurden nach Zugabe der Tenside Natriumoleat ($0,027\text{ g L}^{-1}$) und MIBC (Methylisobutylcarbinol, $0,0045\text{ g L}^{-1}$) bei einer Rotordrehzahl von 800 min^{-1} und einem Luftvolumenstrom von 5 L min^{-1} flotiert. Mit diesen Parametern konnte ein Überlaufen des Schaums für eine Dauer von ca. 20 s erreicht werden. Für zukünftige Studien würde eine kontinuierlich betriebene Flotationszelle eine längere Messdauer ermöglichen.

3 Ergebnisse

3.1 Rekonstruktion von Schaumoberflächen

Als Beispiel für die Rekonstruktion von Schaumoberflächen wurde eine Bildreihe ausgewertet, die überfließenden Schaum am Überlauf der Flotationszelle zeigt. Abb. 4a ist ein Beispielbild von Kamera 1, in dem der Bereich der Auswertung (region of interest, ROI) markiert ist. Im Bereich des Überlaufs sind zwei unterschiedliche Schaumeigenschaften zu erkennen: eine einzelne große Schaumblase und ein schaumfreier Bereich oben rechts.

Abb. 4b stellt die mittels Stereophotogrammetrie rekonstruierte Form der Schaumoberfläche dar. Die Z-Achse gibt die Höhe der Schaumoberfläche über dem Boden der Zelle an (siehe Abb. 2a). Sowohl die große Blase ($X = 70 \text{ mm}$, $Y = 15 \text{ mm}$) als auch die schaumfreie Zone ($X = 120 \text{ mm}$, $Y = 30 \text{ mm}$) werden korrekt rekonstruiert. Der Höhenanstieg an den Rändern der ROI ($X = 0 \text{ mm}$ und $X = 150 \text{ mm}$) ist auf Schaum zurückzuführen, der an der Seitenwand der Zelle haftet. Außerdem ist ein Blasenagglomerat an der unteren Kante der ROI ($X = 60 \text{ mm}$, $Y = -30 \text{ mm}$) sichtbar.

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie die 3D-Rekonstruktion genutzt werden kann, um das Fließverhalten und die Stabilität von überlaufenden Flotationsschäumen zu charakterisieren.

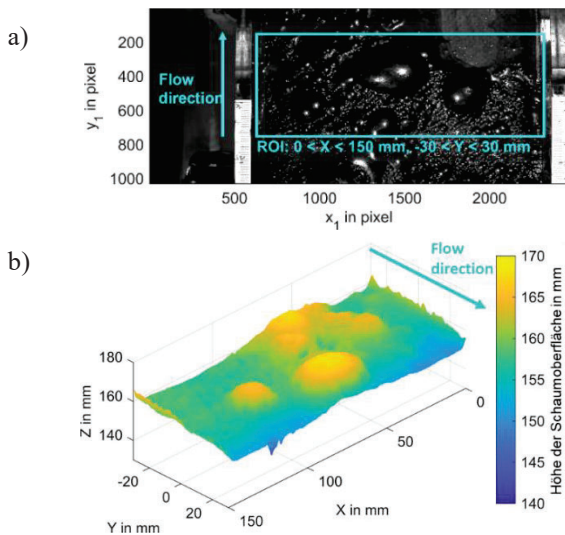


Abbildung 4 Beispiel für die stereophotogrammetrische Ermittlung der Oberflächenstruktur eines überfließenden Flotationsschaums. a) Bild von Kamera 1 mit markiertem Auswertebereich. b) Rekonstruiertes 3D-Form der Schaumoberfläche.

3.2 Höhenprofile des überlaufenden Schaums

Um das Fließverhalten des Schaums am Überlauf zu charakterisieren, wurden Höhenprofile in Y-Richtung ausgewertet. Abb. 5a zeigt die über eine Messdauer von 0,5 s gemittelte Schaumhöhe am Überlauf der Laborflotationszelle. Für die weitere Betrachtung wurden zwei ROIs mit je 20 mm Breite 80 mm Höhe definiert. Abb. 5b zeigt Schaumhöhenprofile in Y-Richtung, die über die jeweiligen X-Koordinaten der ROIs gemittelt sind. Für beide ROIs sind die Profile für 5 einzelne Aufnahmen und das über die gesamte Messdauer zeitlich gemittelte Höhenprofil dargestellt. Im Vergleich der ROIs ist ein Unterschied im Schaumüberlauf erkennbar. Auf der linken Seite (ROI 1) ist der Schaum im Bereich des Überlaufs ($Y > 0 \text{ mm}$) und innerhalb der Flotationszelle ($Y < 0 \text{ mm}$) höher aus auf der rechten Seite (ROI 2). Hier fließt kein Schaum über, da die geringe Schaumhöhe innerhalb der Flotationszelle ein Überlaufen verhindert.

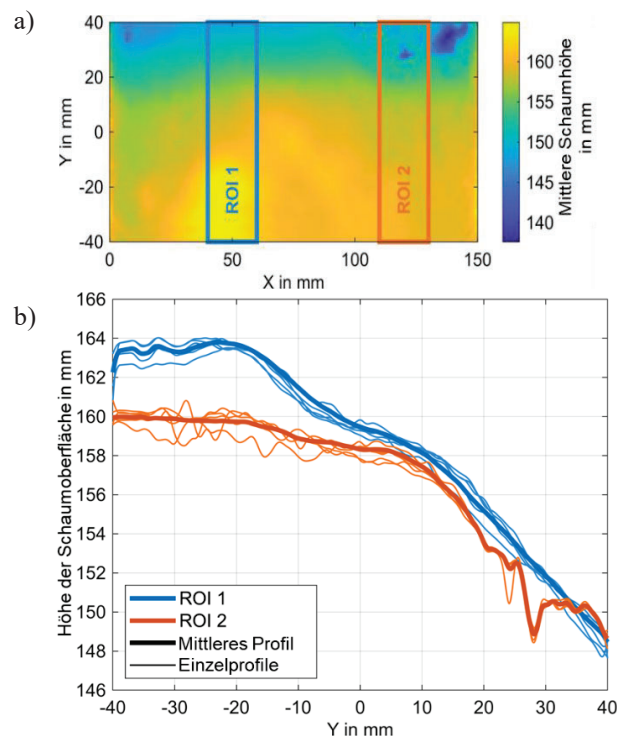


Abbildung 5 Höhenprofile eines überfließenden Flotationsschaums bei $Y = 0$, gemittelt. a) 3D-Struktur der Schaumoberfläche, gemittelt über 0,5 s. b) Schaumhöhenprofile.

Die Höhenprofile lassen Rückschlüsse auf die Strömungsverhältnisse innerhalb der Flotationszelle zu. Beispielsweise könnte die lokal unterschiedliche Schaumhöhe durch die Drehrichtung des Rotors verursacht sein, die sich auf die Schaumphase überträgt. Dieses Beispiel demonstriert die Fähigkeit der 3D-Rekonstruktionsmethode, lokale Unterschiede des Schaumüberlaufs zu detektieren, die über mit 2D-Bildern mögliche Beobachtungen hinausgehen.

3.3 Schaumstabilität

Neben der Analyse von Schaumhöhenprofilen kann die 3D-Rekonstruktion der Schaumoberfläche auch für die Messung der Schaumstabilität genutzt werden. Die Stabilität eines Schaums wird über Höhenänderungen und die Frequenz des Platzens von Blasen an der Schaumoberfläche quantifiziert. Diese Größen können anhand der Schaumhöhenmessungen ermittelt werden.

Abb. 6 zeigt eine Folge von drei aufeinanderfolgenden Bildern, die mit 50 Hz aufgenommen wurden und das Platzen einer großen Blase veranschaulichen. Abb. 6a zeigt die intakte Blase vor dem Zerplatzen und Abb. 6b zeigt den Moment des Zerplatzens. In Abb. 6c ist die Blase vollständig verschwunden und legt die darunter liegenden feineren

Blasen frei. Die 3D-Rekonstruktion belegt eine deutliche Verringerung der Höhe der Schaumoberfläche an der Stelle der ehemaligen Blase. Vor dem Zerplatzen betrug die Schaumhöhe bei $X = 45$ mm, $Y = 5$ mm etwa 167 mm über dem Boden der Flotationszelle (Abb. 6a). Nach dem Zerplatzen hat sich die Schaumhöhe an dieser Stelle um 13 mm auf 154 mm verringert (Abb. 6c). Im Gegensatz dazu blieb die Höhe des stabileren Schaums, der in Abb. 7 gezeigt wird, während der drei aufeinanderfolgenden Bilder nahezu konstant.

Diese beiden Beispiele in Abb. 6 und 7 demonstrieren, dass die mit dem Platzen von Schaumblasen verbundene sprunghafte lokale Verringerung der Schaumhöhe anhand der Höhenmessungen detektiert werden kann. Stabilitätsmessungen mittels Stereophotogrammetrie könnten somit die etablierten Stabilitätsmessungen ersetzen, die auf der Erkennung von Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden 2D-Bildern beruhen (Morar et al., 2012). Diese Ansätze erfordern eine Blasensegmentierung, die jedoch nur aufwendig umzusetzen ist, da der Algorithmus auf das spezifische Aussehen des Flotationsschaums zugeschnitten sein muss. 3D-Messungen können wertvolle Informationen zur Schaumstabilität liefern, ohne dass eine Bildsegmentierung notwendig ist.

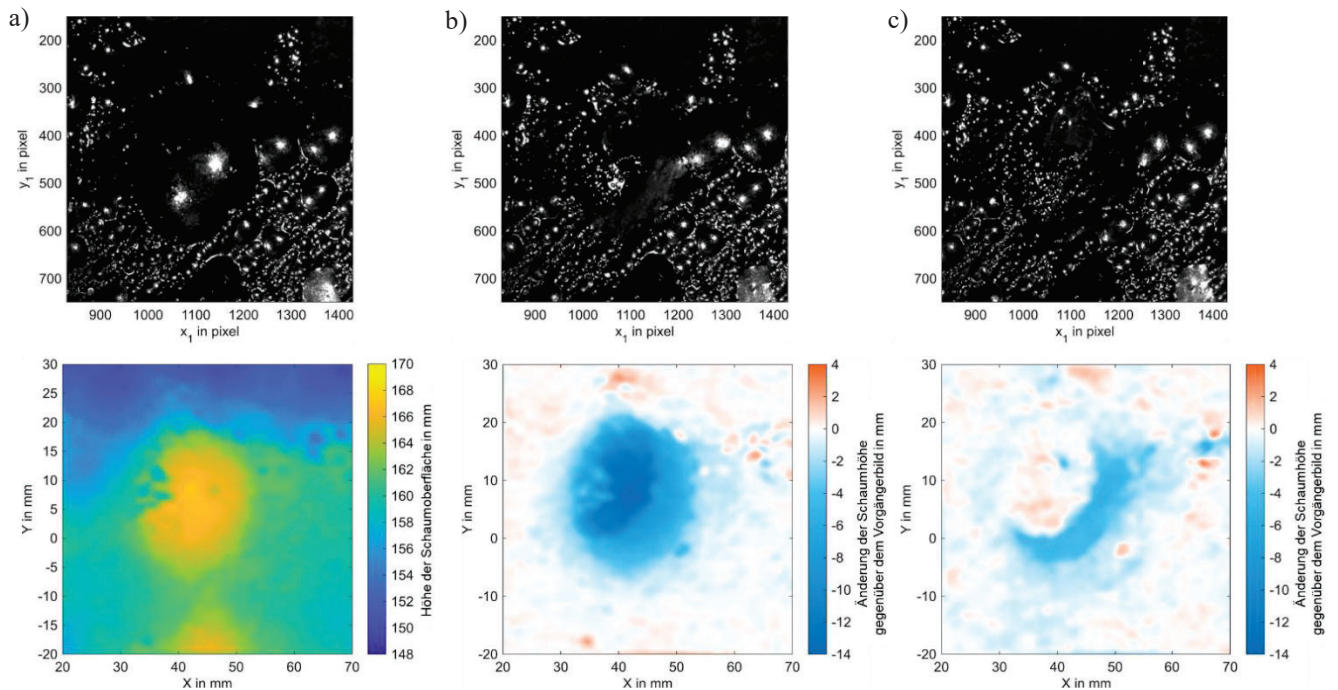


Abbildung 6 Detektion einer großen platzenden Blase in der 3D-Struktur der Schaumoberfläche. a) Bei $t = 0,00$ s ist die Blase vollständig intakt. b) Bei $t = 0,02$ s platzt die Blase. c) Bei $t = 0,04$ s ist die Blase vollständig verschwunden. Die Änderung der gemessenen Höhenwerte zeigt, dass sich durch das Zerplatzen die Höhe der Schaumoberfläche sprunghaft verringert.

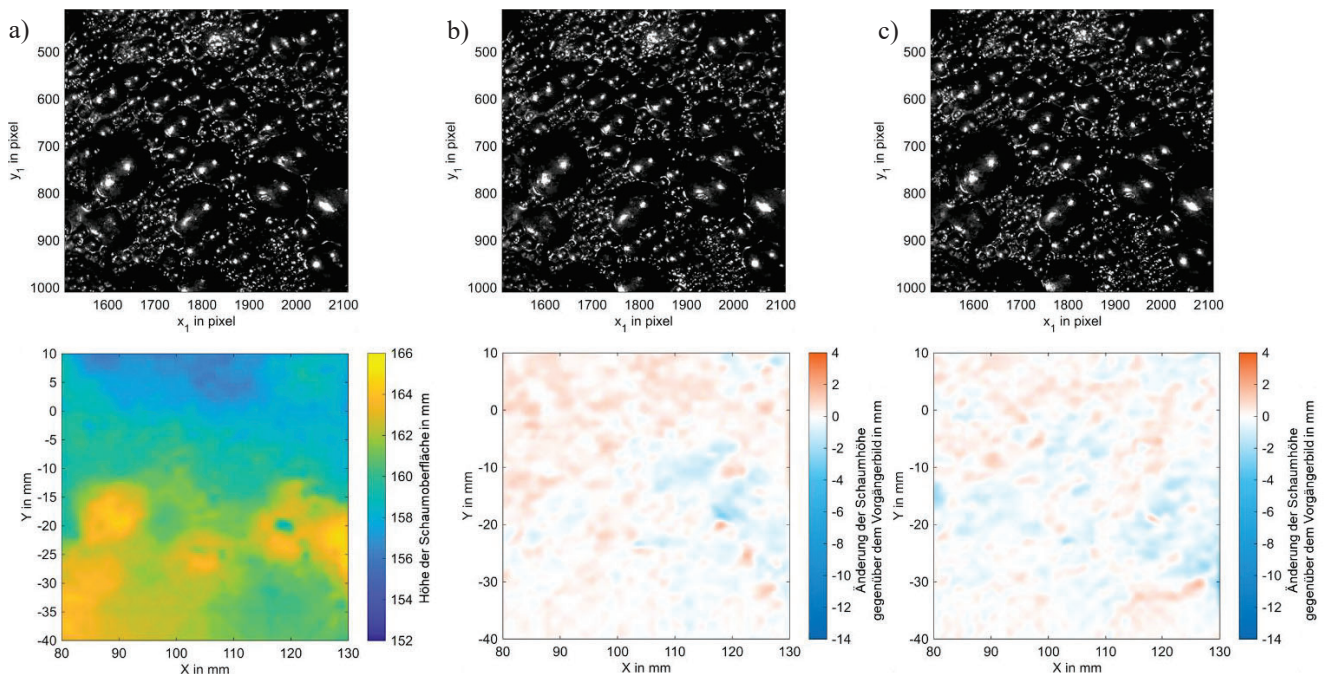


Abbildung 7 Stabiler Schaum mit geringer Schwankung der Oberflächenhöhe in drei aufeinanderfolgenden Aufnahmen ($t = 0,00; 0,02; 0,04$ s). Die fast unveränderte Schaumoberfläche spiegelt sich in geringen Differenzen der gemessenen Schaumhöhen wider.

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenstruktur von Flotationsschäumen mittels Stereophotogrammetrie qualitativ korrekt erfasst werden kann. Die erreichbare Genauigkeit in Z -Richtung s_Z kann quantitativ abgeschätzt werden. Sie ist abhängig vom Bildmaßstab h/c , dem Höhen-Basis-Verhältnis h/b und der Parallaxengenauigkeit s_{px} (Luhmann, 2018):

$$s_Z = \frac{h^2}{b \cdot c} \cdot s_{px}$$

Für das verwendete Messsystem ergibt sich daraus eine theoretische Genauigkeit von $s_Z = 0,27$ mm. Diese Messgenauigkeit ist kleiner als die mittlere Blasengröße im Schaum und somit für die industrielle Überwachung von Flotationsschäumen ausreichend, kann aber durch eine optimierte Aufnahmegeometrie und Belichtung verbessert werden.

Die dominierende Fehlerquelle im verwendeten Messsystem ist das große Höhen-Basis-Verhältnis von 15,3. Da Objektive mit einer vergleichsweise großen Brennweite von 25 mm verwendet wurden, war diese Messanordnung erforderlich, um mit beiden Kameras die gesamte Oberfläche der Flotationzelle zu erfassen. Für zukünftige Messungen kann durch den Einsatz von Objektiven mit kleinerer Brennweite

eine geringere Aufnahmeentfernung bei größerer Basislänge realisiert werden. Dies führt zu einer höheren Auflösung der gemessenen Z -Koordinaten, die insbesondere aufgrund der geringen Höhenvariation innerhalb der Schaumoberfläche von Vorteil ist.

Ein weiterer, nicht quantitativ abschätzbarer Messfehler ergibt sich aus der Ermittlung der Disparitäten. Bei falscher Zuordnung der homologen Punkte ist die gemessene x -Parallaxe fehlerbehaftet. Zur Reduktion solcher Zuordnungsfehler ist auf die Aufnahme gleichmäßig ausgeleuchtete, kontrastreicher Bilder zu achten. Dadurch entstehen weniger texturarme Bereiche, in denen trotz der Verwendung von semi-globalem Matching keine korrekte Zuordnung homologer Punkte möglich ist. Beispielsweise können diffuse Lichtquellen wie LED-Panels oder ein Polarisationsfilter die Größe der hellen Glanzpunkte auf der Blasenoberfläche verringern, die aktuell durch die Belichtung mit zwei LED-Spots entstehen. Gleichzeitig ist auf eine ausreichend starke Ausleuchtung der gesamten Schaumoberfläche zu achten, um sowohl große Blendenzahlen für eine hohe Schärfentiefe als auch kurze Belichtungszeiten für geringe Bewegungsunschärfe realisieren zu können.

Für zukünftige industrielle Messungen ist vor allem zu beachten, dass die Genauigkeit der Messung stark von einer genauen Kamerakalibrierung abhängt. Eine mechanisch stabile Kamerabefestigung ist entscheidend, um auch bei eventuellen Vibrationen eine reproduzierbare innere und

absolute Orientierung zu erzielen. Zudem ist nur eine markierungsfreie Messung möglich, da auf der bewegten Schaumoberfläche und im umgebenden Bereich der Flotationszelle keine Referenzpunkte fest positioniert werden können.

5 Fazit & Ausblick

In dieser Arbeit nutzen wir Stereophotogrammetrie zur Messung der 3D-Oberflächenstruktur von partikelbeladenen Flotationschäumen. Aus Bildaufnahmen von zwei monochromatischen Kameras mit bekannter Orientierung werden mittels semi-globalem Matching Disparitäten berechnet und daraus eine 3D-Punktwolke rekonstruiert. Im Gegensatz zu herkömmlichen Schaumbildgebungsverfahren, die auf 2D-Bildgebung basieren, ermöglicht unser Ansatz die örtlich aufgelöste Messung der Schaumhöhe. Dadurch wird die Charakterisierung von Fließverhalten und Schaumstabilität verbessert. Die Methode wurde mittels Messungen in einer Flotationszelle im Labormaßstab demonstriert. Die Oberflächenstruktur des Schaumes einschließlich großer Blasen wird in für industrielle Anwendungen ausreichender Genauigkeit aufgelöst, die jedoch durch weitere Optimierungen des Messaufbaus erhöht werden kann. Anhand extrahierte Höhenprofile können schaumfreie Bereiche des Überlaufs erkannt und Informationen über die Stabilität und Beweglichkeit des Schaums am Rand der Zelle abgeleitet werden. Solche Messdaten haben ein großes Potential für die automatisierte Steuerung und Optimierung von industriellen Flotationsprozessen.

Danksagung

Wir danken der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts „Sicherung der Rohstoffversorgung durch flexible und nachhaltige Schließung von Stoffkreisläufen“. Wir danken Peggy Jähnigen (Institut für Fluidodynamik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf) für ihre Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Laborversuche.

Literaturverzeichnis

- Aldrich, C., Avelar, E., & Liu, X. (2022). Recent advances in flotation froth image analysis. *Minerals Engineering*, 188, 107823. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107823>
- Aldrich, C., Marais, C., Shean, B. J., & Cilliers, J. J. (2010). Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review. *International Journal of Mineral Processing*, 96(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.04.005>
- Hirschmüller, H. (2005). Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2, 807–814. <https://doi.org/10.1109/cvpr.2005.56>
- Hu, F., Fan, Y., Ma, X., Dong, X., Feng, Z., Sun, Y., & Niu, J. (2024). 3D feature characterization of flotation froth based on a dual-attention encoding volume stereo matching model and binocular stereo vision extraction. *Minerals Engineering*, 217, 108903. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108903>
- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen—Methoden—Beispiele* (4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Wichmann.
- Luo, J., Fan, Y., & Zhang, H. (2024). Binocular Camera Synchronization Calibration Based on Composite Image Correction for Froth Flotation. 2024 8th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT), 491–495. <https://doi.org/10.1109/ACAIT63902.2024.11021939>
- Marquardt, T., Naumann, P., Lappan, T., Sommer, A.-E., Eckert, K., & Heitkam, S. (2024). Laserbasierte Methoden zur Messung von Schaumhöhen. Proceedings of the 31. Fachtagung “Experimentelle Strömungsmechanik”. <https://www.gala-ev.org/images/Beitraege/Beitraege2024/pdf/05.pdf>
- Marquardt, T., Naumann, P., Lappan, T., Ziauddin, M., Sommer, A.-E., Eckert, K., & Heitkam, S. (2025). Laser-Based Measurement of Overflowing Foam Height Profiles. Poster presented at the Jahrestagung DE-CHEMA/VDI-Fachgruppen Mischvorgänge, Hochdruckverfahrenstechnik und Mehrphasenströmungen, March 19-21 2025, Hamburg, Germany.
- Mesa, D., & Brito-Parada, P. R. (2019). Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review. *Separation and Purification Technology*, 210, 950–962. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.076>
- Morar, S. H., Bradshaw, D. J., & Harris, M. C. (2012). The use of the froth surface lamellae burst rate as a flotation froth stability measurement. *Minerals Engineering*, 36–38, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.018>
- Shean, B., Hadler, K., & Cilliers, J. J. (2017). A flotation control system to optimise performance using peak air recovery. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.021>

- Zhao, L., Peng, T., Xie, Y., Gui, W., & Zhao, Y. (2019). Froth Stereo Visual Feature Extraction for the Industrial Flotation Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(31), 14510–14519. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00426>
- Zheng, X., Li, X., Yuan, Z., & Ban, X. (2024). Visual Measurement of Foam Thickness in Flotation Process Based on Depth Stereo Matching. 2024 International Conference on Automation in Manufacturing, Transportation and Logistics (ICaMaL), 1–9. <https://doi.org/10.1109/I-CaMaL62577.2024.10919521>
- Zhong, Y., Tang, Z., Zhang, H., Xie, Y., & Dai, Z. (2024). Measurement of Froth-Layer Depth With Binocular Camera Based on Intensity Correction and Its Application to Pulp-Grade Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3420351>

Genauigkeitsanalyse photogrammetrischer 3D-Digitalisierung durch transparente Objektträger

Hartmut Clauß¹

Zusammenfassung

Die photogrammetrische 3D-Digitalisierung steht oft vor der Herausforderung, Objekte allseitig ohne Verdeckungen durch Haltevorrichtungen zu erfassen. Besonders bei fragilen Objekten, die ihre Form bei Lageänderung variieren, ist dies ein kritisches Problem, da eine mehrstufige Erfassung in unterschiedlichen Lagen unmöglich ist. Obwohl transparente Objektträger aus Glas eine Erfassung von der Unterseite ermöglichen, wirken sie als optisch aktive Bauteile: Sie verändern den Strahlengang und verursachen Abbildungsfehler in Geometrie und Textur, die mit herkömmlichen Kameramodellen algorithmisch nicht korrigierbar sind.

Diese Arbeit analysiert die Fehlereinflüsse systematisch und stellt den transparenten Objektträger des Systems „CYBERGLOBE“ vor. Es wird sowohl theoretisch als auch messtechnisch nachgewiesen, dass die spezielle Konstruktion auftretende Abbildungsfehler auf ein vernachlässigbares Maß reduziert.

Schlagwörter Photogrammetrie · Digitaler Zwilling · Strahlengang · Objektträger · CYBERGLOBE

1 Photogrammetrische 3D-Digitalisierung in der Praxis

Die praktische 3D-Digitalisierung von Objekten birgt eine Reihe anspruchsvoller Herausforderungen. Wird neben einer exakten Geometrie auch eine konservatorische Reproduktion der Texturen gefordert, dann ist häufig die photogrammetrische Digitalisierung das Mittel der Wahl. Für mobile Objekte haben sich dafür zwei grundlegende Anordnungen etabliert:

1. Das Objekt wird mit einem manuellen oder automatischen Drehtisch in verschiedenen Betrachtungswinkeln vor einer Kamera positioniert und somit ringsum bildgebend erfasst (horizontale Positionierung). Darüber hinaus wird die Kamera wiederum manuell oder automatisch in verschiedenen Höhen angeordnet (vertikale Positionierung), um auch vertikal wirkende Hinterschnidungen des Objektes zu digitalisieren (siehe Abbildung 1). Anstelle der vertikalen Kamerapositionierung können auch mehrere Kameras übereinander angeordnet sein, was vor allem Vorteile für die Aufnahmezeit bietet, allerdings auch den Nachteil birgt, dass jede Kamera ihre eigenen Kameraparameter (innere Orientierung) besitzt.



Abbildung 1 Automatischer Drehtisch mit manuellem Auslegerstativ zur photogrammetrischen 3D-Digitalisierung

2. Für eine maximale Effizienz der Bildaufnahme wird auf Bewegungen des Objektes und der Kamera gänzlich verzichtet und stattdessen für jede Bildposition eine separate Kamera verwendet (siehe Abbildung 2). Neben der kurzen Aufnahmezeit sind vor allem die konstanten und bekannten Orientierungen der Kameras (innere und äußere) für die spätere photogrammetrische Auswertung von großem Vorteil. Nachteilig ist allerdings der immense gerätetechnische Aufwand, wenn eine hohe

¹ Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH (CLAUSS), Turnhallenweg 5a, 08297 Zwönitz, Deutschland, <https://dr-clauss.de>

Detailierung feiner 3D-Strukturen gefordert wird. Beispielsweise werden 325 (!) halbsphärisch angeordnete Kameras benötigt, wenn ein Winkelraster von 10° realisiert werden soll.



Abbildung 2 Gerätelösung mit sphärisch angeordneten Kameras (Symbolbild)

1.1 Allseitige Objektdigitalisierung

Die Erfassung eines Objektes aus allen Richtungen und die nahtlose und allseitige Erzeugung des digitalen Zwillings in einem Arbeitsgang ist mit den bekannten Anordnungen schwierig, denn Objektbereiche werden im Normalfall durch Haltevorrichtungen, zum Beispiel durch die Plattform zum Aufstellen des Objektes (Objektträger), verdeckt. Die übliche Vorgehensweise sieht in diesem Fall die 3D-Digitalisierung einzelner, durch Umlagern sichtbarer, Objektbereiche vor, die später halbautomatisch oder manuell zum Gesamtmodell vereinigt werden. Die Praxis zeigt dabei häufig, dass natürliche Merkmale des Objekts geometrisch nicht ausreichend genau zugeordnet werden können, um die einzelnen Objektbereiche mit hoher Genauigkeit zusammensetzen. Daher ist es im Allgemeinen unumgänglich und auch üblich, eindeutige und kontraststarke Marker in Form von Haftmarken oder Farbmarkierungen am Objekt anzubringen (siehe Abbildung 3).

Obwohl sich dieses Verfahren bewährt hat und gute Ergebnisse liefert, ist der hohe personelle Aufwand für die vielen manuellen und anspruchsvollen Arbeitsschritte problematisch. Darüber hinaus ist die Verwendung von Haftmarken und Farbmarkierungen für manche

Objektklassen nicht zulässig oder zumindest durch die Verdeckung der Textur nicht gewollt.

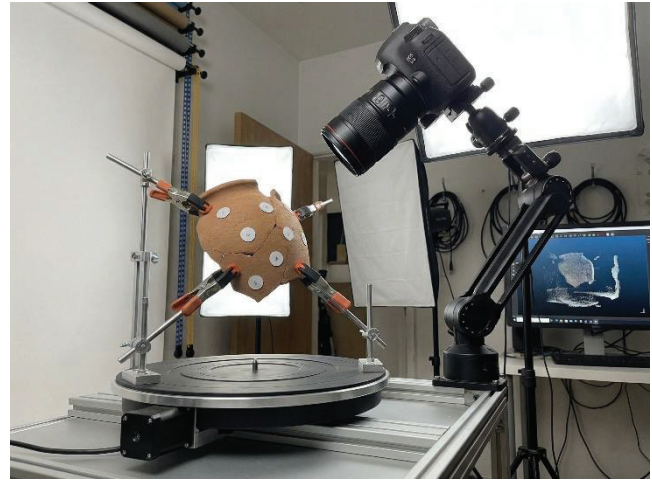


Abbildung 3 Photogrammetrische Erfassung einer Tonscherbe mit Haftmarkierungen (Symbolbild)

Ganz anders stellt sich die Problematik für fragile Objekte dar, die Teile ohne feste Lage oder Form aufweisen (siehe Abbildung 4). Objekte dieser Gattung können im Allgemeinen nicht umgelagert werden, ohne dabei die Geometrie zu verändern. Eine allseitige Digitalisierung durch die beschriebene Vereinigung einzelner Objektbereiche ist daher unmöglich.



Abbildung 4 Der Augsburger Religionsfriede, 1555 (© Österreichisches Staatsarchiv, Abteilung Haus-, Hof- und Staatsarchiv)

1.2 Transparente Objektträger

Ein naheliegender Ansatz, um Verdeckungen durch den Objektträger zu verhindern und so eine allseitige Digitalisierung in einem Arbeitsgang zu ermöglichen, ist es, den Objektträger transparent auszuführen. Dies hat den großen Vorteil, dass auch fragile Objekte von allen Seiten erfasst werden können.

Es gibt zahlreiche Versuche, die Digitalisierung mit einem Objektträger aus Glas durchzuführen (siehe Abbildung 5). Auch marktverfügbare Gerätelösungen mit diesem Merkmal sind vorhanden (vgl. Analyse in CLAUSS, 2024-1/2), beispielhaft wird in Abbildung 6 ein Produkt zum Zwecke einer allseitigen photogrammetrischen Objektdigitalisierung des Unternehmens „uni-Robot Ltd.“ dargestellt.

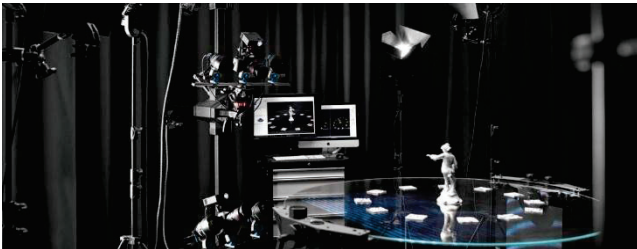


Abbildung 5 Digitalisierung mit Objektträger aus Glas (© Julius Fröbus GmbH)



Abbildung 6 Produkt "CASE 850" (© uni-Robot Ltd.)

2 Einflüsse der Glasplatte im Strahlengang

Alle bisher bekannten Lösungen, die einen transparenten Objektträger aufweisen, verwenden eine mehrere Millimeter starke Glasplatte, die bei Aufnahmen von unterhalb des Objektträgers als optisches Element im Strahlengang wirksam ist (vgl. Analyse in CLAUSS, 2024-1/2). Die vielfältigen Einflüsse dieser Glasplatte werden im Folgenden näher betrachtet und bewertet.

2.1 Farbveränderung

Ein wesentlicher Vorzug der photogrammetrischen Objektdigitalisierung ist die hochwertige bildgebende Erfassung der Texturen. Für konservatorische Zwecke ist es sogar üblich, die systemische Farbwiedergabe mit Referenzfarbtafeln zu kalibrieren.

Wird nun eine Glasplatte in den Strahlengang der Kamera eingefügt, verändert das Transmissionsspektrum des verwendeten Glases folgerichtig die Farbwiedergabe (siehe Abbildung 7).

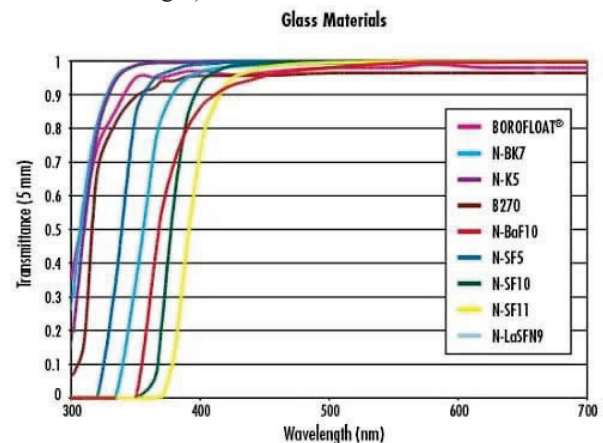


Abbildung 7 Transmissionsspektrum ausgewählter Gläser (© Edmund Optics BV)

Ein praktischer Versuch mit 6 mm starkem Floatglas zeigte, dass eine messbare Farbveränderung durch das Glas im Strahlengang eintritt. Beispielsweise verschiebt sich der Weißpunkt RGB:242|242|242 bzw. xy:0,332424|0,347426 auf RGB:236|238|237 bzw. xy:0,331856|0,347915 (siehe Abbildung 8). Die Einflüsse des Floatglases fallen gemäß Transmissionsspektrum erwartungsgemäß moderat aus, müssen aber dennoch behandelt werden.

In der Praxis wird für die Aufnahmen durch die Glasplatte ein anderes Kalibrierprofil verwendet und der Einfluss dadurch ausgeglichen.

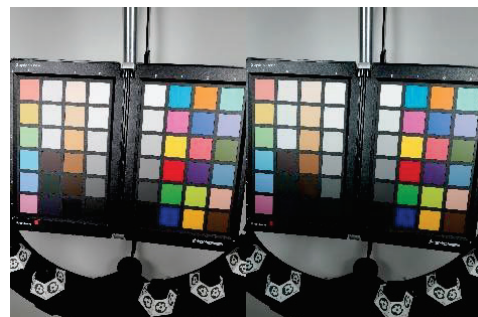


Abbildung 8 Farbveränderung durch Einfügen einer Glasplatte aus Floatglas

2.2 Reflexion

Bekanntermaßen kommt es an jeder optischen Grenzfläche zu Reflexionen. Dies geschieht sowohl beim Übergang in optisch dichtere (Luft-Glas), als auch in optisch dünnere Medien (Glas-Luft). Wird eine Glasplatte in den Strahlengang eingefügt, werden damit an jeder Grenzfläche ca. 10 Prozent der Lichtstrahlen reflektiert, wodurch es zu einer Mehrfachreflexion kommt, die sich als unscharfe Reflexionsabbildungen bemerkbar macht (siehe Abbildung 9). Bei einem Reflexionsgrad von 10 % besitzt die Reflexion 2. Ordnung noch etwa 8 % der Helligkeit, die Reflexion 3. Ordnung aber nur noch 0,08 %. Die Reflexionen höherer Ordnungen spielen daher in der Praxis keine Rolle.

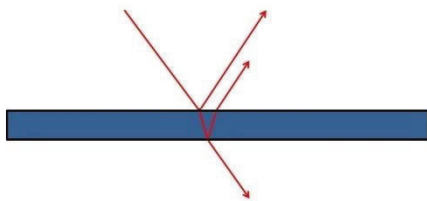


Abbildung 9 Schematische Darstellung der mehrfachen Reflexion an einer Glasplatte, beschränkt auf die Reflexionen erster und zweiter Ordnung

Ein praktischer Versuch mit 6 mm starkem Floatglas zeigte den Unterschied zwischen der Bildgebung ohne (siehe Abbildung 10, links) und mit eingefügter Glasplatte (siehe Abbildung 10, Mitte), besonders deutlich in der Vergrößerung (siehe Abbildung 10, kleine Bilder).

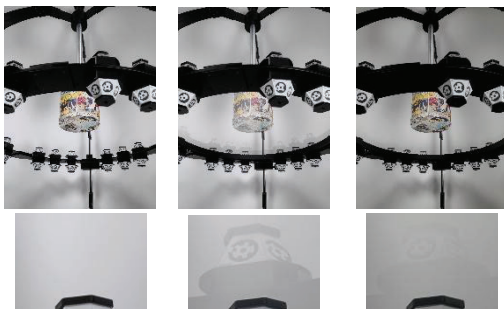


Abbildung 10 Praxisversuch Reflexion, links ohne Glasplatte, Mitte mit Glasplatte, rechts mit Glasplatte und Polarisationsfilter

Das Mittel der Wahl, um Reflexionen an Glasflächen teilweise auszublenden, ist die Verwendung eines Polarisationsfilters, da die Reflexion stets zu einer Teilpolarisation des Lichts führt. Im Sonderfall gemäß Brewsterschem Gesetz wird die Reflexion sogar vollständig polarisiert. In der Abbildung 10 rechts ist der Effekt des Polarisationsfilters vor der Kamera dargestellt. Ein

vollständiges Ausblenden der Reflexionen ist auf diese Weise nicht möglich. Für die Digitalisierung sind die verbleibenden Reflexionsbilder aber beherrschbar, da sie durch die Objekt- und Kamerabewegung nicht ortsfest auftreten und damit während der digitalen Bildverarbeitung gut zu filtern sind.

2.3 Brechung

Wird eine Glasplatte in einen optischen Strahlengang eingebracht, findet entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik an beiden Grenzflächen zwischen Glas und Luft eine Brechung des hindurchtretenden Lichtstrahls statt. Man spricht in diesem Fall von einer Doppelbrechung, die eine Verschiebung des einfallenden Lichtstrahls bewirkt (siehe Abbildung 9).

Das Modell des einzelnen, doppelt gebrochenen Lichtstrahls gibt allerdings noch keine Auskunft über die Gesetzmäßigkeiten, die für einen bildgebenden Strahlengang gelten. Um diese zu ermitteln, wird das Modell (vgl. Zentralperspektive) um einen Objektpunkt (O) und ein Projektionszentrum (K) erweitert (siehe Abbildung 11 sowie Tabelle 1), durch die die Strahlen, ungeachtet ihrer Ablenkung dazwischen, verlaufen müssen. Gesucht wird im vorliegenden Fall der Zusammenhang zwischen dem Strahlwinkel ohne Glasplatte (α) und dem Strahlwinkel (β), der durch die Wirkung der Doppelbrechung resultiert um den real auftretenden Strahlwinkel (β) auf den optimalen Strahlwinkel (α) zurückführen zu können.

Tabelle 1 Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Beschreibung
K	Projektionszentrum der Kamera
O	Objektpunkt
c	Abstand zwischen K und Glas
d	Dicke der Glasplatte
g	Abstand zwischen O und Glas
q	Abstand K-O parallel zum Glas
q ₁	Teil von q bei Brechung, kameraseitig
q ₂	Teil von q bei Brechung, im Glas
q ₃	Teil von q bei Brechung, objektseitig
n	Brechungsindex Glas ($n_{\text{Luft}} = 1$)
α	Strahlwinkel ohne Glasplatte
β	Strahlwinkel mit Glasplatte
γ	Strahlwinkel innerhalb der Glasplatte

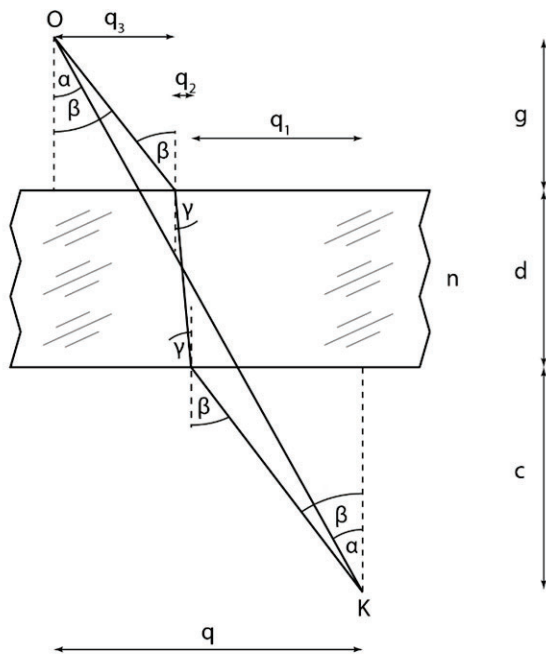


Abbildung 11 Die geometrischen Zusammenhänge der Doppelbrechung

Grundlegende Zusammenhänge:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 ; n = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} ; \tan \alpha = \frac{q}{c + d + g}$$

Mit den Beziehungen

$$\tan \beta = \frac{q_1}{c} ; \tan \gamma = \frac{q_2}{d} ; \tan \beta = \frac{q_3}{g}$$

gilt:

$$\tan \alpha = \frac{\tan \beta (c + g)}{c + d + g} + \frac{\tan \gamma \cdot d}{c + d + g}$$

Brechungsgesetz:

$$\tan \gamma = \tan \left[\sin^{-1} \frac{\sin \beta}{n} \right] = \frac{\sin \beta}{\sqrt{(\sin \beta + n)(n - \sin \beta)}}$$

Ergebnis:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\tan \beta (c + g)}{c + d + g} + \frac{\sin \beta \cdot d}{(c + d + g) \sqrt{(\sin \beta + n)(n - \sin \beta)}} \right]$$

Die Betrachtung führt zu dem eindeutigen Ergebnis, dass die Berechnung des korrigierten Strahlwinkels (α) nur mit Kenntnis des Abstands zwischen Glasoberfläche und Objektpunkt (g) möglich ist. Da dies im Grunde aber genau die Größe ist, die durch die photogrammetrische Auswertung bestimmt werden soll, ist eine direkte Korrektur der Doppelbrechung ausgeschlossen.

2.3.1 Berechnung der Brechungsfehler

Unter Verwendung der Ergebnisse von 2.3 kann eine beispielhafte Berechnung der Abbildungsfehler erfolgen. Dazu werden die in Tabelle 2 angegebenen praxisüblichen Konstanten angenommen.

Tabelle 2 Verwendete Konstanten

Formelzeichen	Konstanter Wert
n	1,5
d	6 mm
c	350 mm
β	45 °
f	15 mm (Brennweite der Kamera)
p	2 μ m (Pixelpitch des Kamerasensors)

Setzt man die gegebenen Werte in die Gleichung unter 2.3 ein, erhält man den korrigierten Strahlwinkel (α) in Abhängigkeit vom Objektstand (g). Gemäß Zentralprojektion ist unter Verwendung der Brennweite (f) und des Pixelpitches der Kamera (p) daraus ein Pixelfehler ableitbar. Das Ergebnis der Beispielrechnung ist in Abbildung 12 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der zu erwartende Abbildungsfehler bei einer Objekthöhe von nur 10 mm etwa 1 Pixel und bei 200 mm bereits 10 Pixel beträgt.

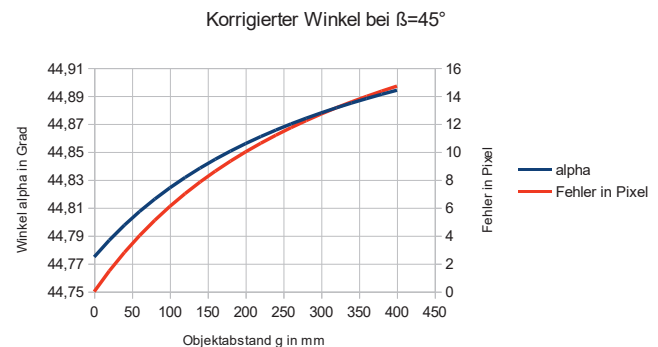


Abbildung 11 Korrigierter Strahlwinkel und Pixelfehler in Abhängigkeit vom Objektstand (Glasplatte)

Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein zylindrischer Probekörper mit 100 mm Höhe aufgenommen und in Abbildung 13 dargestellt. Links der Körper ohne Glasplatte, mittig mit Glasplatte, sowie rechts vergrößert bei $g = 100$ mm. Der vorab berechnete Pixelfehler von etwa 6 Pixel konnte experimentell nachgewiesen werden und ist auch gut erkennbar.



Abbildung 13 Probeaufnahme zum Nachweis der berechneten Pixelfehler (mit Glasplatte)

2.3.2 Korrektur über die Kamerakalibrierung

Es stellt sich die Frage, ob die durch die Doppelbrechung hervorgerufenen Abbildungsfehler mit einer hohen Anzahl von Verknüpfungspunkten für jede Kameraposition individuell korrigierbar sind. Dazu betrachten wir das in der Photogrammetrie übliche Brown-Conrady-Modell zur Beschreibung der Abbildungsgeometrie bzw. der Verzeichnungen:

$$\begin{aligned}x_u &= x_d + (x_d - x_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2(x_d - x_c)^2) \\ &\quad + 2P_2(x_d - x_c)(y_d - y_c))(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots) \\ y_u &= y_d + (y_d - y_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (2P_1(x_d - x_c)(y_d - y_c) \\ &\quad + P_2(r^2 + 2(y_d - y_c)^2))(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots),\end{aligned}$$

mit

(x_u, y_u) – unverzerrter Bildpunkt, wie er von einer idealen Lochkamera projiziert wird,

(x_d, y_d) – verzerrter Bildpunkt, wie er auf der Bildebene mit einer bestimmten Linse projiziert wird,

K_n – n-te radiale Verzerrungskoeffizient

P_n – n-te tangentielle Verzerrungskoeffizient und

$r = \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}$ – euklidischer Abstand zwischen verzerrtem Bildpunkt und dem Verzerrungszentrum

Bei näherer Betrachtung der Verzeichnungsformeln wird klar, dass zwar radiale und tangentielle, nicht aber Objektpunkt-diskrete Verzerrungen modelliert werden können. Bei Objekten mit stetigen, eher flachen Konturen kann der Abbildungsfehler mit Hilfe dieser Gleichungen und günstiger Koeffizienten zwar verringert ausfallen, eine echte Korrektur der Brechungseffekte ist mit den üblichen Kameramodellen aber nicht möglich.

3 Umfassende Gerätelösung CYBERGLOBE

Die Kombination unzähliger Details, die den vielfältigen Herausforderungen einer guten photogrammetrischen Objektdigitalisierung Rechnung tragen, führten zur umfassenden Gerätelösung CYBERGLOBE.

Der CYBERGLOBE ist ein photogrammetrisch arbeitendes Komplettsystem, bestehend aus Objektscanner und Verarbeitungs-Software. Beliebige, bis etwa fußballgroße Objekte werden auf den eigens entwickelten transparenten Objektträger gelegt und aus allen Richtungen, auch von der Unterseite, in einem Arbeitsgang in automatischer Folge erfasst. Die integrierte Systembeleuchtung garantiert eine praktisch schattenfreie, konservatorische Ausleuchtung und eine fotorealistische, farbkalibrierte Texturqualität. Die Verarbeitungs-Software verrechnet die aufgenommenen Einzelbilder automatisch im Batchbetrieb sowohl zum texturierten 3D-Modell wie auch zum Gaussian Splat.



Abbildung 14 Der Objektscanner CYBERGLOBE

3.1 Der transparente Objektträger des CYBERGLOBE

Eine wesentliche Kernkomponente des CYBERGLOBE ist sein transparenter Objektträger, der dank seiner speziellen Konstruktion ganz gezielt Verzerrungen durch Brechungseffekte vermeidet. Er besteht aus einer speziellen nur 0,12 mm dicken, beidseitig polierten Kunststoffolie mit

einem reduzierten Brechungsindex von $n = 1,3$. Die Folie ist außerdem hoch transluzent ($> 95\%$), besitzt im sichtbaren Wellenlängenbereich ein neutrales Transmissionspektrum und ist schlierenfrei. Die kratz- und reisefeste Folie wird so stark radial vorgespannt, dass sie eine flächige Tragfähigkeit von 20 kg erreicht. Abgerundet werden die hervorragenden Eigenschaften durch die antistatische Rezeptur und die ausgezeichnete chemische Beständigkeit, wobei die Folie selbst chemisch neutral und frei von sog. Weichmachern ist.

3.1.1 Farbveränderung und Reflexion

Der Praxistest zeigt keine messbaren Abweichungen beim Vermessen der Referenzfarbkarten. Der Weißpunkt (RGB) verschiebt sich von 242|242|242 bzw. $xy:0,332424|0,347426$ zu 237|237|237 bzw. $xy:0,332424|0,347426$, wird daher nur etwas dunkler, bleibt aber farbneutral (siehe Abbildung 15).

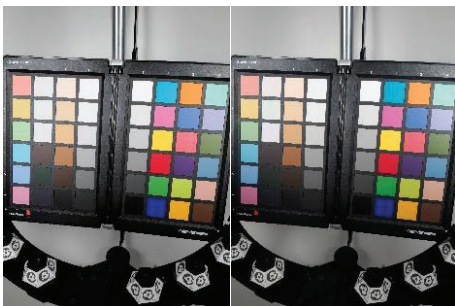


Abbildung 15 Farbveränderung durch Einfügen des CYBERGLOBE Objektträgers

Bei der Reflexion verhält sich der Objektträger exakt wie die Glasoberfläche (siehe 2.2), wobei die Verschiebung der Reflexion 2. Ordnung durch die geringe Dicke der Folie sehr gering ausfällt und dadurch im Bild nicht mehr registrierbar ist. Die Ausblendung der Reflexion mit einem Polarisationsfilter vor der Kamera funktioniert analog zur Glasoberfläche gut.

3.1.2 Doppelbrechung am Objektträger

Analog zu den Betrachtungen unter 2.3 und 2.3.1 wird der Abbildungsfehler beispielhaft berechnet. Dabei kommt die Dicke der Folie mit $d = 0,12$ mm und der Brechungsindex $n = 1,3$ zur Anwendung.

Das Ergebnis der Beispielrechnung ist in Abbildung 16 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der zu erwartende Abbildungsfehler bei einer Objekthöhe von 400 mm lediglich 0,23 Pixel beträgt und damit vernachlässigt werden kann.

Zur Validierung der Ergebnisse wurde wiederholt der zylindrische Probekörper mit 100 mm Höhe aufgenommen

und in Abbildung 17 dargestellt: Links der Körper ohne Objektträger, daneben mit Objektträger, sowie von beiden Bildern eine Vergrößerung bei $g = 100$ mm. Bei Verwendung des CYBERGLOBE-Objektträgers kann experimentell kein Abbildungsfehler nachgewiesen werden.

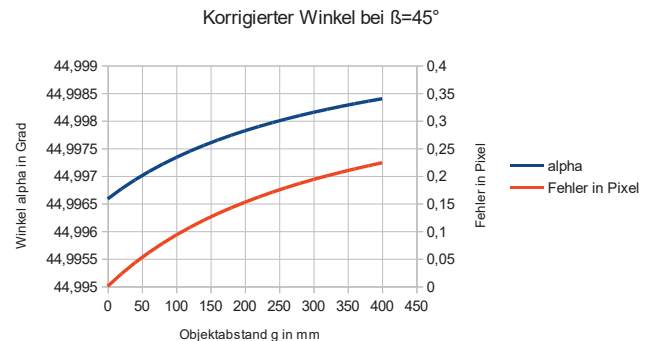


Abbildung 16 Korrigierter Strahlwinkel und Pixelfehler in Abhängigkeit vom Objektstand (CYBERGLOBE-Objektträger)

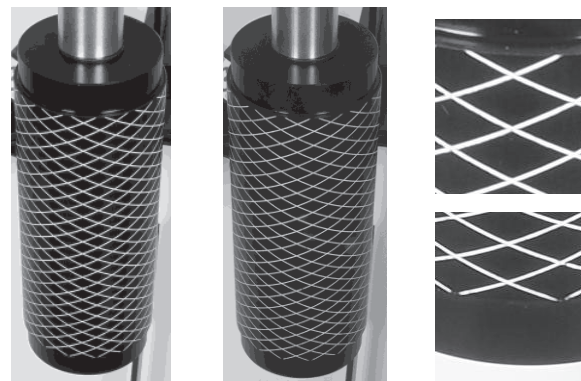


Abbildung 17 Probeaufnahme zum Nachweis der berechneten Pixelfehler (CYBERGLOBE-Objektträger)

3.2 Genauigkeitsuntersuchungen nach VDI/VDE 2634 Blatt 3

Abschließend wurden die ausgeführten theoretischen und praktischen Betrachtungen zum Objektträger des CYBERGLOBE einer normgerechten Prüfung unterzogen, um die Genauigkeit des photogrammetrischen Gesamtsystem nachzuweisen. Gemäß VDI/VDE 2634 Bl. 3 kommen dazu im Messvolumen verteilte Prüfkörper vorgegebener Geometrie zum Einsatz (siehe Abbildung 18). Stellvertretend für die Vielzahl der eingesetzten Prüfkörper wird die Betrachtung an dieser Stelle nur an einem Beispiel vorgenommen. Die realen Geometriemaße sind:

$$D_{P1} = 47,918 \text{ mm}$$

$$D_{P2} = 47,923 \text{ mm}$$

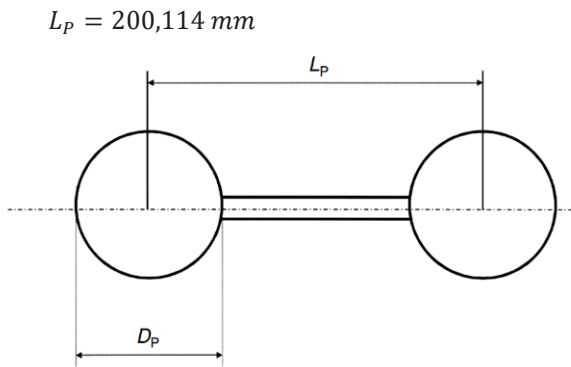


Abbildung 18 Prüfkörper nach VDI/VDE 2634

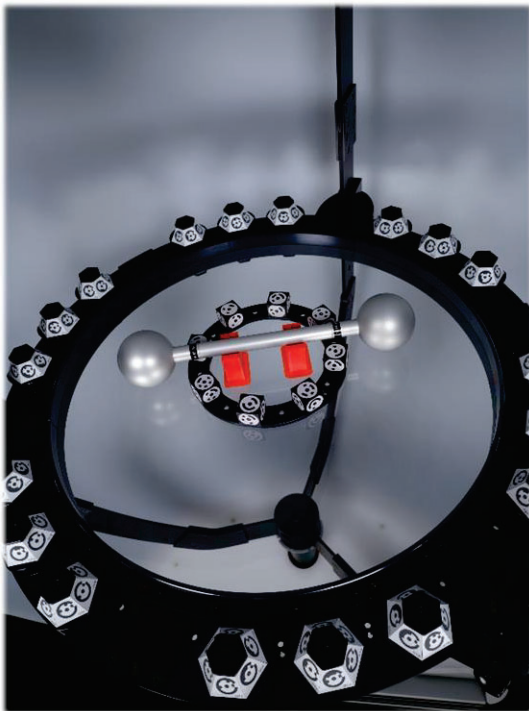


Abbildung 1 Prüfanordnung mit einem Prüfkörper

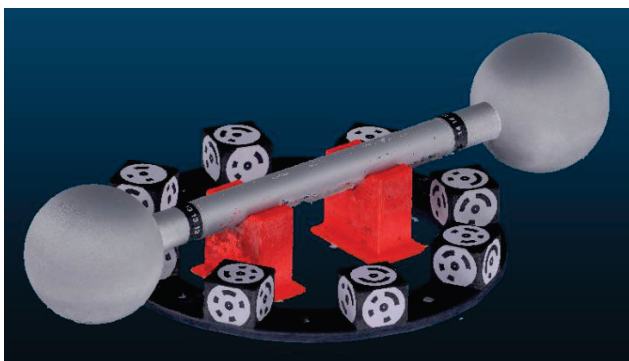


Abbildung 20 Mit CYBERGLOBE erstelltes 3D-Modell

Der Prüfkörper wird in der Prüfanordnung gemäß Abbildung 19 photogrammetrisch digitalisiert. Das erzeugte 3D-Modell ist in Abbildung 20 dargestellt.

Entsprechend der Vorgaben aus der VDI/VDE 2634 werden Kugelparameter in die Messwerte des Prüfkörpers eingepasst, um die Standardabweichung der Messwerte zu bestimmen und die gemessenen Längen und Durchmesser zu erhalten.

Messwerte:

$$D_{P1} = 47,931 \text{ mm} ; \sigma = 0,033 \text{ mm}$$

$$D_{P2} = 47,954 \text{ mm} ; \sigma = 0,037 \text{ mm}$$

$$L_p = 200,137 \text{ mm}$$

Die normgerechte Messung bestätigt die vorausgegangenen Betrachtungen. Der CYBERGLOBE erzeugt mit seinem speziellen Objektträger 3D-Modelle mit nachgewiesener hoher Genauigkeit.

4 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zur photogrammetrischen 3D-Digitalisierung durch transparente Objektträger kommen zum eindeutigen Ergebnis, dass alle Geräte und Systeme, die mit einer Glasplatte als Objektträger im Strahlengang arbeiten, unausweichliche Abbildungsfehler erzeugen, die sich zwangsläufig auf die Reproduktionsgenauigkeit auswirken.

Es wurde sowohl theoretisch wie auch praktisch nachgewiesen, dass die spezielle Bauart des CYBERGLOBE-Objektträgers diese Abbildungsfehler auf ein vernachlässigbares Maß reduziert und dadurch eine ausgezeichnete Reproduktionsgenauigkeit erreicht.

Die optischen und mechanischen Eigenschaften des CYBERGLOBE-Objektträgers sind durch die spezielle Konstruktion denen einer Glasplatte deutlich überlegen.

Der transparente Objektträger des CYBERGLOBE ist damit das einzige bekannte System, das eine allseitige 3D-Digitalisierung ohne systematische Abbildungsfehler durch Brechungseffekte erlaubt.

Literaturverzeichnis

- Clauss (2024-1). Vorrichtung für die automatisierte photogrammetrische Objektaufnahme, Deutsche Patentanmeldung, DE 10 2024 001 465
- Clauss (2024-2). Objekthalter für die optische Objekterfassung, Deutsche Patentanmeldung, DE 10 2024 002 716
- VDI/VDE e.V. (Hrsg.) (VDI/VDE 2634 Bl. 3:2008). Optische 3-D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten

Simultane Bestimmung von non-planarer Wasseroberfläche und Unterwasserpunkten mit Mehrmedienphotogrammetrie

Hannes Sardemann¹, Christian Mulsow¹, Laure-Anne Gueguen², Gottfried Mandlbürger², & Hans-Gerd Maas¹

Zusammenfassung

Die Mehrmedienphotogrammetrie befasst sich unter anderem mit der Bestimmung der Geometrie von Unterwasserobjekten aus Bildern, die diese aus der Luft durch das Wasser hindurch abbilden. Dazu werden beispielsweise mit einer oder mehreren Drohnen Bilder eines Gewässers aufgenommen und mit einer Bündelblockausgleichung die Geometrie des Gewässerbodens bestimmt. Neben der Voraussetzung, dass der Gewässerboden in den Bildern sichtbar ist (klares Wasser) und Punkte stereoskopisch zugeordnet werden können (ausreichend eindeutiger Kontrast), wurde in der Vergangenheit zumeist die Annahme getroffen, dass die Wasseroberfläche ruhig und eben ist. In diesem Fall lässt sich die Wasserebene mit drei zusätzlichen Parametern in die Bündelblockausgleichung einführen und mit Hilfe des Snellius'schen Brechungsgesetzes die Refraktion der Bildstrahlen berücksichtigen. Ist das Wasser allerdings nicht in Ruhe, sondern beispielsweise wellig, führt diese Annahme zu großen Fehlern in den Unterwasser-Objektkoordinaten. Werden die Bilder simultan aufgenommen, kann die Geometrie der Wasseroberfläche im Rahmen der Bündelblockausgleichung in einer geeigneten Parametrisierung mitgeschätzt werden.

In diesem Beitrag wird die Integrierbarkeit einer nicht-planaren Wasseroberfläche in das Mehrmedienbündel anhand eines Laborversuchs getestet. In dem Versuch wurden mit vier synchronisierten Kameras Videosequenzen einer manuell angeregten Wasseroberfläche aufgenommen. Die inneren und äußeren Orientierungen der Kameras wurden vorab bestimmt und für diesen Versuch als bekannt und stabil angenommen. Auf dem Gewässerboden befanden sich kodierte und konventionelle Messmarken in verschiedenen Höhen. Der präsentierte Ansatz besteht aus zwei Schritten und hat das Ziel, sowohl die Objektkoordinaten der Unterwasser-Messmarken, als auch die Wasseroberfläche für alle Frames der Sequenz zu bestimmen. Zunächst werden die (teilweise stark verformten) Ellipsen über die gesamte Sequenz in den Bildern getrackt. Dabei kann empirisch gezeigt werden, dass der Median der Bildpunkte der gesamten – welligen – Sequenz den Bildkoordinaten bei einer flachen Wasseroberfläche in sehr guter Näherung entsprechen. Mit den Median-Bildpunkten und den bekannten Kameraorientierungen können dann mit ausgeglichenen Mehrmedien-Vorwärtsschnitten mit planarer Wasseroberfläche bereits die Koordinaten der Objektpunkte bestimmt werden. Diese Koordinaten werden für den zweiten Schritt als Passpunkte in eine Ausgleichung eingeführt, die ausschließlich die Parameter der Wasseroberfläche für alle Frames als Parameter schätzt. Die Wasseroberfläche wird dabei mit kubischen Splines parametrisiert. Durch Bedingungen zwischen den Frames wird in der Ausgleichung eine zeitliche Filterung vorgenommen.

Schlagwörter Mehrmedienphotogrammetrie · Wasseroberfläche · Wellen · Gewässerboden · Snellius'sches Gesetz

1 Einführung

Die Mehrmedienphotogrammetrie ist neben der Lidar-Bathymetrie eine der optischen Methoden zur Messung von Gewässerböden (Mandlbürger, 2022). Durch die simultane oder sequentielle Bildaufnahme mit einer Drohne kann bei ausreichend klarem Gewässer durch die Methoden der Mehrbildauswertung eine Punktwolke des Gewässerbodens

erzeugt werden. Da sich die Bildstrahlen auf ihrem Weg vom Objekt (Gewässerboden) zum Bildsensor durch zwei optische Medien bewegen (Wasser und Luft) spricht man von Mehrmedienphotogrammetrie. Durch die Brechung des Lichtstrahls am Medienübergang sind die Strahlen nicht mehr kollinear, wie sonst in der Bündelblockausgleichung üblich (Mulsow, 2010). Es ist daher notwendig, in der Ausgleichung die Parameter des Medienübergangs mitzuschätzen. Die zusätzlichen Parameter umfassen neben

¹ TU Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Deutschland, E-Mail: vorname.name@tu-dresden.de

² TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Wiedner Hauptstraße 8, 1040 Wien, Österreich, E-Mail: vorname.name@geo.tuwien.ac.at

dem Brechungsindex die Position und Orientierung der Trennfläche. Die zusätzliche Bestimmung des Durchstoßpunkts und der dortigen Neigung der Wasseroberfläche für jeden Bildstrahl führt allerdings zu einer starken Unterparametrisierung im Bündel. Daher wurde bisher meistens die Annahme getroffen, dass die Wasseroberfläche ruhig und eben ist. Dann kann diese durch drei Parameter im gesamten Bündel mit eingeführt und ausgeglichen werden.

Ist die Wasseroberfläche allerdings nicht eben, sondern beispielweise wellig, hat diese Annahme einen entscheidenden Fehlereinfluss in der Bestimmung der Unterwasser-Objektpunkte zur Folge. In Sardemann et al. (2024) wurde dies anhand von simulierten Daten gezeigt. Je nach Höhe und Neigung der Wellen kann die falsche Annahme einer ebenen Wasseroberfläche einen Fehler in der Größenordnung halben Wassertiefe verursachen (s. Abb. 1).

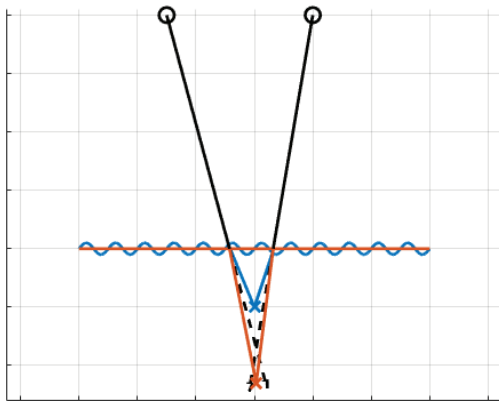


Abbildung 1 2D-Modellierung des Einflusses der Wasseroberfläche auf die gemessene Wassertiefe: Die schwarzen Geraden zeigen Überwasser-Bildstrahlen von zwei Kameras und gestrichelt für die Annahme, dass kein Medienübergang vorhanden ist. Die orangenen Geraden simulieren Unterwasser-Bildstrahlen für eine ebene Wasseroberfläche und die blauen für eine sinusförmig-gewellte Wasseroberfläche.

Da also die Annahme einer ebenen Wasseroberfläche falsch und die strenge Bestimmung des Durchstoßpunkts und der dortigen Orientierung pro Bildstrahl unmöglich ist, sollte eine nicht-ebene Wasseroberfläche mit einem ausreichenden Satz aus zusätzlichen Parametern dreidimensional modelliert und im Bündel mitgeschätzt werden. In diesem Beitrag nutzen wir dafür eine Modellierung mit kubischen Splines.

2 Methode

Um Unterwasser-Objektkoordinaten auch bei nicht-ebener Wasseroberfläche möglichst genau bestimmen zu können, muss also, wie in der Einführung gezeigt, die Wasseroberfläche in der Bündelblockausgleichung mitgeschätzt werden. In diesem Beitrag wird dazu eine Modellierung mit kubischen Splines genutzt. Die Methode wurde in einem Laborexperiment getestet und wird hier auf der Grundlage dieser Ergebnisse beschrieben. Der Experimentalaufbau besteht aus vier synchronisierten Kameras, die ein Wasserbecken beobachten. Am Boden des Wassers sind Messmarken angebracht. Die Nutzung von Messmarken vereinfacht die Zuordnung homologer Punkte zwischen den Bildern. Die Methode ist generell auch mit natürlichen Punkten und geeigneten Matching-Algorithmen anwendbar. Die Zuordnung wird allerdings dadurch erschwert, dass die Unterwasserobjekte durch die wellige Wasseroberfläche in jedem Bild unterschiedlich verzerrt dargestellt werden. Da es hier nicht um die Bildzuordnung sondern zunächst um die simultane Bestimmung von Wasseroberfläche und Unterwasserpunkten gehen soll, werden zunächst kreisförmige – teilweise kodierte – Marker verwendet, die eindeutig zugeordnet werden können. Der Aufbau des Labor-Experiments ermöglicht es außerdem, die äußere und innere Orientierung der vier Kameras vorab zu bestimmen und für die hier vorgestellte Methode als bekannt und stabil anzunehmen. Soll die Methode in einem in-situ Experiment – beispielsweise mit Drohnen über einem Gewässer – eingesetzt werden, kann die äußere Orientierung beispielweise durch Passpunkte an den Ufern oder durch direkte Georeferenzierung mit GNSS und IMU beschafft werden (Maas et al., 2025).

Ein gemeinsames Bündel mit Unterwasserpunkten und Wasseroberfläche als Unbekannten benötigt Unterwasser-Passpunkte. Da diese in vielen Anwendungen nur mit hohem Aufwand beschafft werden können, wird hier ein Verfahren vorgestellt, in dem zunächst die Koordinaten aller Marker als Neupunkte berechnet werden und diese anschließend als Passpunkte für die Bestimmung der Wasseroberfläche genutzt werden. Für beides werden dabei dieselben Bilddaten genutzt. Die Bestimmung von Objektkoordinaten und Wasseroberfläche kann also weiterhin als simultan (mit einem Satz Bilder) bezeichnet werden, geschieht allerdings in einer Vier-Schritte-Auswertung, die im Folgenden vorgestellt wird. Die Auswertung wird dabei auf Grundlage einer Videosequenz durchgeführt. Während der Aufnahme der Sequenz wurden im Wasserbecken Wellen erzeugt. Die vier Schritte zur Bestimmung von Objektpunktkoordinaten und Wasseroberfläche sind:

- 1) Tracking der Ellipsen in allen Bildern der Sequenz: Durch die Wellen bewegen und verformen sich die Ellipsen zwischen den Bildern. Durch Ellipsenfits und Tracking der einzelnen Ellipsen über die Bilder der Sequenz können für alle Bilder und alle Marken die Ellipsenmittelpunkte bestimmt werden.
- 2) Berechnung der Mediane der Ellipsenmittelpunkte: Bei einer ausreichend langen Sequenz entspricht der Medianwert der Ellipsenmittelpunkte in sehr guter Näherung der Position des Bildpunkts, wie wenn er durch eine stille und ebene Wasseroberfläche aufgenommen wurde (Mulsow et al., 2024).
- 3) Mehrmedien-Bündelblockausgleichung mit Medianen: Mit den Median-Ellipsenmittelpunkten als Beobachtungen können in einem (herkömmlichen) Mehrmedien-Bündel die Objektpunktkoordinaten der Marken und die Median-Wasseroberfläche geschätzt werden. Die Optimierung der Ausgleichung wird wie in Rofalski et al. (2022) im Objektraum durchgeführt.
- 4) Zeitaufgelöste Rekonstruktion der Wasseroberfläche: Mit den zuvor bestimmten Objektpunktkoordinaten als Passpunkte kann jetzt Bildquadrupel-für-Bildquadrupel die Wasseroberfläche ausgeglichen werden. Dafür werden die in (1) gemessenen Ellipsenmittelpunkte als Beobachtungen genutzt. Die Optimierung in der Ausgleichung erfolgt dabei wieder im Objektraum.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau des Experiments beschrieben. Anschließend wird auf die Ergebnisse der vier Auswerteschritte eingegangen.

3.1 Experiment

Abb. 2 zeigt den Aufbau des Labor-Experiments. Das Wasserbecken hat eine Grundfläche von ca. 50 x 50 cm und ist bis zu einer Höhe von ca. 10 cm mit Wasser befüllt. Etwa 75 cm über dem Becken sind vier Industriekameras (Imperx 1M-48G monochrom, 1000 x 1000 Pixel, Pixelgröße 7.4 μm , 16 mm Objektive) in den vier Ecken angebracht und auf die Mitte des Testfelds ausgerichtet. Die schräge Ausrichtung der Kameras erleichtert die Bestimmung der Parameter der Wasseroberfläche im Vergleich zu nadir-ausgerichteten Kameras (Mulsow et al., 2018). Die Kameras nehmen mit einer Bildrate von 48 Hz auf. Die Bildsensoren sind.

Für die Auswertung wurden mit den vier Kameras synchron Sequenzen von je 500 Bildern, also ca. zehn

Sekunden aufgenommen. In die Berechnung der Ellipsen-Mediane sind dabei alle Bilder der Sequenz eingegangen. Für die Berechnung der Wasseroberflächen wurde unter Aspekten des Rechenaufwandes zunächst nur eine kleine Auswahl der gesamten Sequenz von je zehn Bildern (ca. 0.02 Sekunden) ausgewertet. Für zukünftige Arbeiten soll die Berechnung auf einem Hochleistungsrechner umgesetzt werden, sodass die gesamte Sequenz ausgewertet werden kann. Die Auswertung der kurzen Sequenz von zehn Bildquadrupeln reicht allerdings aus um die Qualität der Methode zu beurteilen.

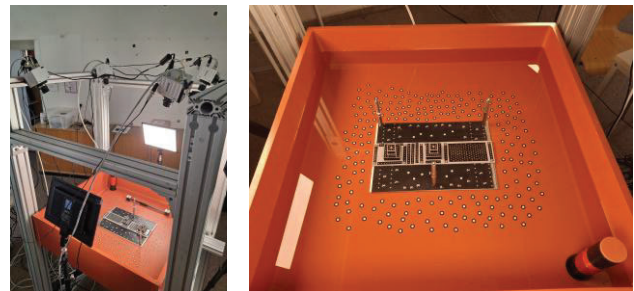


Abbildung 2 Aufbau des Experiments mit Unterwasser-Marken und vier Kameras.

3.2 Ellipsenmessung und Median-Berechnung

Mit einem Ellipsenoperator werden Ellipsenmittelpunkte bestimmt. Um sicherzugehen, dass auch alle Marken (ca. 500 Stück) in allen Bildern gemessen werden, wurden die Mitten der Ellipsen zunächst im ersten Bild der Sequenz manuell gemessen. Von diesen Näherungswerten ausgehend, wurden dann mit einem Sternoperator die Konturen der Ellipsen bestimmt und damit Ellipsenfits durchgeführt. Ausgehend von der Bildposition des aktuellen Ellipsenmittelpunkts wurde dann im jeweils folgenden Bild wieder per Sternoperator die Ellipse eingepasst. Somit wird das Tracking für alle Ellipsen automatisiert gerechnet. Anschließend wird manuell nach Ausreißern gesucht, die sich durch außergewöhnlich große Sprünge in Position oder Länge der Halbachsen identifizieren lassen.

Abb. 3 zeigt beispielhaft die Ellipsenmittelpunkte einer Ellipse für alle Bilder einer Kamera und deren Median. Die Ellipsenmittelpunkte haben sich in der Sequenz um bis zu ± 10 Pixel in beiden Koordinatenrichtungen bewegt.

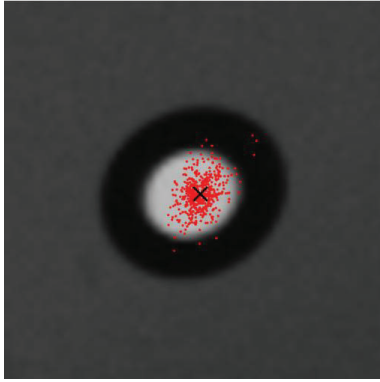


Abbildung 3 Ellipsenmittelpunkte von ca. 500 Bildern (rote Punkte) und deren Median (schwarzes x)

In Mulsow et al. (2024) wurde gezeigt, dass durch pixelweise Bildung des Medians der Grauwerte ein Bild erzeugt werden kann, das der Aufnahme durch die stille und ebene Wasseroberfläche in sehr guter Näherung entspricht. Dies kann dazu verwendet werden, wellenfreie Aufnahmen zu generieren. Wir wenden hier den Median auf die Bildkoordinaten der Ellipsenmittelpunkte anstatt auf die Grauwerte der Pixel an. Zur Überprüfung der Annahme wurde separat ein Bildquadrupel bei ruhigem Wasser aufgenommen. Die Median-Ellipsenmittelpunkte und die Ellipsenmittelpunkte bei flacher Wasseroberfläche unterscheiden sich im Mittel um 0,01/0,02 Pixel mit einer Standardabweichung von 0,14/0,14 Pixel in x' und y' . Für die folgenden Schritte wird daher angenommen, dass die Median-Mittelpunkte den Bildpunkten bei ruhiger Wasseroberfläche entsprechen.

3.3 Mehrmedienbündel mit Medianpunkten

Die Median-Ellipsenmittelpunkte werden nun für die Berechnung der Objektpunktkoordinaten mit ausgeglichenem Mehrmedien-Vorwärtsschnitt aus den Bildquadrupeln genutzt. Wie bei Rofallski et al. (2022) wird die Ausgleicheung nicht im Bildraum, sondern im Objektraum optimiert, indem der Abstand der Unterwasser-Bildstrahlen zum Objektpunkt minimiert wird. Zusätzlich zu den Objektpunkten (alle als Neupunkte eingeführt) wird die als eben angenommene Wasseroberfläche mitgeschätzt. Der Brechungsindex wurde zuvor durch Messung der Wassertemperatur bestimmt und festgesetzt. Die Ausgleicheung konvergiert mit einem RMS von 0.04 mm im Objektraum, was einem Reprojektionsfehler von 0.08 Pixeln entspricht. Zur Validierung der ausgeglichenen Wasseroberfläche wurde außerdem zuvor eine Aufnahme bei stiller Wasseroberfläche durchgeführt, bei der Schwimmer mit Messmarken auf das Wasser gelegt wurden.

Ein Vergleich zwischen Schwimmer-Wasseroberfläche und Median-Ellipsen-Mehrmedienbündel zeigt eine Differenz von 0.12° in der Normalen und 0.09 mm im Abstand zum Koordinatenursprung (beide Ebenen in der Hesseschen Normalform). Eine höhere Genauigkeit lässt sich mit der Schwimmer-basierten Referenz nicht erzielen.

Die Koordinaten der Objektpunkte werden im nächsten Schritt als bekannte Passpunkte genutzt. Die geschätzte ruhige Wasseroberfläche dient als Näherung für die Bestimmung der welligen Wasseroberflächen.

3.4 Rekonstruktion der Wasseroberfläche

Im finalen Schritt werden nun die Wasseroberflächen für alle Zeitschritte bestimmt. In einer Ausgleicheung im Objektraum werden die Abstände der Unterwasser-Bildstrahlen zu den Objektpunkten minimiert. Die Objektpunkte und die Kameraorientierungen (somit auch die Überwasser-Bildstrahlen) bleiben dabei fest. In der Ausgleicheung werden also ausschließlich die Parameter der Wasseroberfläche geschätzt, die die Bildstrahlen so brechen, dass der Abstand zu den Objektpunkten minimiert wird. Um die Ausgleicheung zu stabilisieren wird nur der zentrale Bereich der Wasseroberfläche geschätzt, der oberhalb der dichter verteilten Passpunkte liegt, die größtenteils in allen vier Bildern abgebildet werden. Dieser Bereich ist ca. 7 cm x 25 cm groß (Abb. 4 links). Die Wasseroberfläche wird mit Splines rekonstruiert (Abb. 4 rechts). Die Splines sind durch regelmäßig verteilte Knotenpunkte bestimmt. In der Ausgleicheung werden die z-Koordinaten der Knotenpunkte für alle Zeitschritte ausgeglichen. Außerdem wird eine Bedingung eingeführt, die festlegt, dass die vertikale Bewegung eines Knotens zwischen zwei Zeitschritten nicht zu groß wird.

Die Ausgleicheung der Wasseroberflächen der ersten zehn Bildquadrupel konvergiert mit einem RMS von 0,17 mm im Objektraum, was einem Reprojektionsfehler von 0,25 Pixeln entspricht. Die (falsche) Annahme einer ebenen Wasseroberfläche würde in einem RMS von 1,6 mm im Objektraum und 1,8 Pixeln im Bildraum resultieren. Die Einführung der Splines-Wasseroberfläche in die Mehrmedien-Bündelblockausgleicheung führt in diesem Beispiel also zu einer Verbesserung von etwa einer Größenordnung.

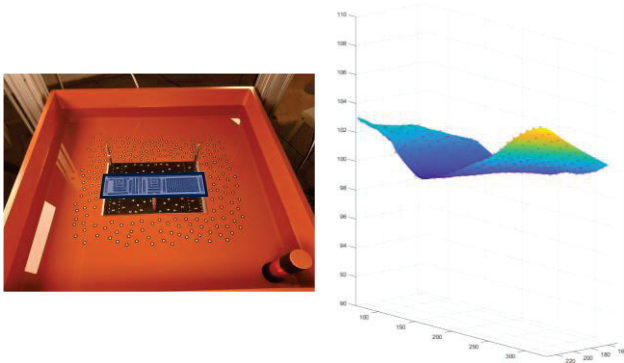


Abbildung 4 Ausgleichung der welligen Wasseroberfläche. Links: Ausschnitt der bestimmt wurde. Rechts: ausgeglichene Wasseroberfläche für einen Zeitschritt.

Abb. 5 zeigt diese Verbesserung beispielhaft für einen Objektpunkt. Dargestellt sind die windschiefen Unterwasser-Bildstrahlen sowohl mit flacher als auch mit ausgeglichener Wasseroberfläche für einen Zeitschritt. Man sieht, wie sich der Abstand der Bildstrahlen verbessert. Abb. 6 zeigt außerdem beispielhaft die Reprojektion von zwei Passpunkten in den Bildraum für die ersten zehn Zeitschritte. Man kann erkennen, dass der Verlauf des durch die ausgeglichene Wasseroberfläche projizierten Objektpunkts den im Bild gemessenen Ellipsenmittelpunkt sehr gut annähert.

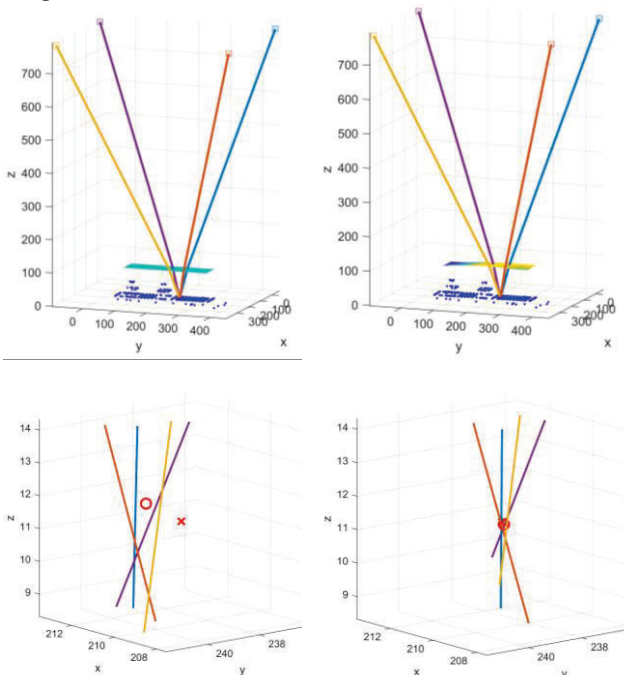


Abbildung 5 Bildstrahlen der vier Kameras mit flacher (links) und ausgeglichener Wasseroberfläche (rechts). Unten: Unterwasserbereich vergrößert mit Passpunkt (x) und Punkt mit kleinsten Abständen zu den windschiefen Geraden (o).

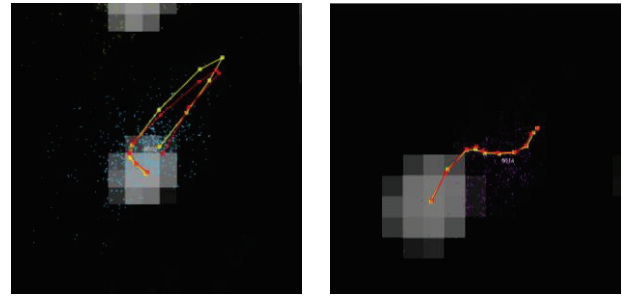


Abbildung 6 Projektion des Passpunkts in den Bildraum durch die ausgeglichene Wasseroberfläche (rot) und gemessener Ellipsenmittelpunkt (gelb) für die ersten zehn Zeitschritte beispielhaft für zwei Punkte.

4 Fazit und Ausblick

Anhand des Labor-Experiments konnte gezeigt werden, dass durch die Einführung einer nicht-ebenen Wasseroberfläche die Genauigkeit der Objektkoordinaten von Unterwasserpunkten um eine Größenordnung verbessert werden kann. Ein vergleichbarer Experimentalaufbau kann beispielweise bei vielfältigen Experimenten in hydromechanischen Laboren zur Anwendung kommen. Das vorgestellte Verfahren hat hierbei den Vorteil, dass nicht nur eine Verbesserung der Unterwassergeometrie erzielt wird, sondern zusätzlich auch die Geometrie der Wasseroberfläche mitbestimmt wird. Die Genauigkeit dieser sollte in zukünftigen Untersuchungen mit einer unabhängigen Messmethode überprüft werden.

Für die Anwendung der Methode an größeren Gewässern im Außenbereich muss sowohl in der Bildaufnahme als auch in der Bildzuordnung die übliche Messstrategie angepasst werden: Die Bildaufnahme erfordert mehrere synchronisierte Plattformen (z.B. Drohnen), die dann immer für einige Sekunden über dem Gewässer schweben müssen, um das Median-Verfahren anwenden zu können (Maas et al., 2025). Die Zuordnung natürlicher Punkte erfordert außerdem noch weiterer Forschung. Gerade bei starken Wellen werden die Objekte sehr unterschiedlich verzerrt in den Bildern dargestellt.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 496002628

Literaturverzeichnis

Maas, H.-G., Sardemann, H., Mulsow, C., Gueguen, L.-A., Mandlbürger, G., New Approaches in Photo-Bathymetry., ISPRS Archives XLVIII-2, 2025.

- Mandlbürger, G., A review of active and passive optical methods in hydrography., *International Hydrographic Review*, 28, 8–52, 2022.
- Mulsow, C., A flexible multi-media bundle approach., *ISPRS Archives XXXVIII-5*, 472–477, 2010.
- Mulsow, C., Kenner, R., Bühler, Y., Stoffel, A., Maas, H.G., Subaquatic digital elevation models from UAV-imagery. *ISPRS Archives XL-2*, 2018.
- Mulsow, C., Sardemann, H., Gueguen, L.-A., Mandlbürger, G., Maas, H.-G., Concepts for compensation of wave effects when measuring through water surfaces in photogrammetric applications., *ISPRS Archives XLVIII-2-2*, 289–295, 2024.
- Rofalski, R., Luhmann, T., An efficient solution to ray tracing problems in multimedia photogrammetry for flat refractive interfaces., *ISPRS Archives XLVIII-2-2*, 37–54, 2022.
- Sardemann, H., Mulsow, C., Gueguen, L.-A., Mandlbürger, G., Maas, H.-G., Multimedia Photogrammetry with non-planar Water Surfaces – Accuracy Analysis on Simulation Basis., *ISPRS Archives XLVIII-2-2024*, 363–369, 2024.

SLAMergency - Adaptive correction of distorted SLAM-scans

Daniel Wujanz, Felix Gruner, Frank Gielsdorf

Abstract

Data acquisition with kinematic laser scanners is currently being promoted as the fastest solution for observing 3D point clouds. However, despite its clear advantages the following practical issues are typically left out of the discussion. First of all, kinematic systems are predominantly designed as black boxes which yields in a lack of transparent quality assurance metrics. As a result, users are typically not able to transparently assess the achieved quality of a dataset. While the problem of minimising contradictions within a single kinematic dataset can be assumed to be solved in most cases, there are no sound solutions for projects where static and kinematic data is mixed. Solutions that are based on the iterative closest point algorithm (BESL & MCKAY 1992) are not capable of changing the inner geometry of given kinematic point clouds in order to minimise inevitable contradictions among the two data sources. The advantage of much faster data acquisition of kinematic scanners comes at the price of huge amounts of data that can be captured in very short amounts of time. Consequently, this benefit leads to the obvious problem of reaching the limits of computational resources, particularly in the light of ever increasing projects. Lastly, the outcome of a single kinematic scan can be biased by systematic errors or outliers. As a consequence, the resulting point cloud contains errors that need to be corrected before further processing.

This article presents an algorithm that addresses the aforementioned weaknesses. It enables the minimisation of contradictions between several kinematic data sets as well as between static and kinematic point clouds. Furthermore, biased kinematic point clouds can be corrected deploying a novel adaptive procedure. In addition, established geodetic quality measures are derived that enable meaningful quality assurance. The performance of the algorithm is demonstrated on two practical data sets.

Keywords LIDAR · registration · geodetic quality assurance · homogenisation · systematic errors

1 Introduction

The need for digitisation of manmade objects has brought laser scanning to the attention of many users over the past 20 years. In the early days of this industry, laser scanning meant observing data in a static sense, where the scanner is mounted to a tripod whilst acquiring data. The result of a scan leads to a so called point cloud that contains geometric information in form of a densely sampled set of coordinates as well as radiometric information that represents the individual signal strength of each point.

To being able to cover an entire site, the scanner needs to be moved through the object space. Individual static setups then need to be transformed into a common coordinate system, either by so called registration, via georeferencing by deploying geodetic points or a combination thereof.

While data acquisition in a static fashion is very accurate from a geometric point of view, it is also quite time consuming due to the need to rest the scanner somewhere between half a minute and several minutes during scanning.

Looking at the history of classical surveying, GNSS positioning proofed to be a more efficient strategy for observing discrete points compared to tacheometry - at the cost of being more complex and less transparent in error estimation as well as reduced accuracy. A similar scenario arose for SLAM-based kinematic laser scanners (BOSSE et al. 2012) compared to static laser scanning as a consequence of the former's recently reached technical maturity.

While GNSS never intended to respectively has tried to replace tacheometry we are witnessing a marketing-driven "war of scanners", where the obvious advantage of reduced time on site is combined with claims of equal accuracy of the outcome. The latter argument is commonly accompanied by a visual "proof" where a static and kinematic point cloud are shown in close proximity. Ironically, examples like these serve as a counterargument, since it is certainly not economical to capture a site with a kinematic and a static scanner to verify its quality.

The motivation for this contribution was to develop an algorithm procedure, that:

- transparently verifies kinematic laser scans at geodetic standards,

- minimises potentially given contradictions within single or several kinematic scans respectively a mix of static and kinematic datasets,
- allows to correct kinematic scans that were biased by outliers or systematic influences,
- is capable to process many kinematic and / or static scans at standard hardware.

2 Related work

A potential solution for minimising contradictions between point clouds from various laser scanners are registration algorithms, e.g. BESL & MCKAY (1992) where two initially aligned point clouds are iteratively being transformed until a convergence criterion is satisfied. Although the scans are aligned as best as possible, the potentially distorted inner geometry of kinematic scans caused by drift in the trajectory or even outliers remains unchanged. At first glance a potential solution seems to be Affine solutions, where the inner geometry of scans is altered within iterations, see e.g. DU et al. (2010). However, two main reasons speak against its use: i) the influence of drift varies significantly over the course of a given dataset which can contain data recorded over ~30 to 60 minutes and ii) affine registrations in general are very sensitive to starting values, outliers as well as noise and sampling.

While the aforementioned strategies are designed for use on pairs of point clouds, the challenge of computing an entirely consistent dataset across all scans remains. Global optimisations algorithms as a solution for the stated problem are known for decades (see e.g. PULLI et al. 1999). The vast majority of solutions on the market uses a subsample of every point cloud that are sorted into spatial data structures (SAMET 2006), which occupies large amounts of RAM and requires significant amounts of time. Subsequently, correspondences among scans are formed based on which the individual point clouds are being pulled together.

The more point clouds are fed into the adjustment and the more correspondences are formed, the larger will be the resulting equation system and the longer its solution will take, assuming that RAM is sufficiently given. While the latter sounds like a matter of course, it is important to acknowledge that kinematic scanners capture huge amounts of data within short periods of time. Hence, one could assume that it is technically feasible to optimise data that was captured within five to ten point clouds. Yet, the strength of kinematic systems lies in fast acquisition of large spaces where even more datasets can be captured, even within a day's work. Hence, the global optimisation describes the bottleneck in its in large scale projects.

An overview on various strategies for solving the SLAM problem can be found in ZHANG et al. (2024).

Despite the fact that several commercial kinematic systems are successfully marketed, data captured by kinematic laser scanners face the following challenges:

1. Contradictions between redundantly acquired surfaces within a single kinematic dataset need to be minimised. Either as a consequence of expected drift or due to outliers.
2. Contradictions between redundantly acquired surfaces between several kinematic datasets need to be minimised
3. Contradictions between redundantly acquired surfaces between static and kinematic datasets need to be minimised

Due to enormous efforts in research and development that individual vendors have invested, the first challenge can usually be considered to be solved under common circumstances. This means that a user should not see any geometrically distorted areas within single kinematic point clouds. However, it is obvious that many uncontrollable factors can influence the outcome of a single kinematic point cloud, for instance moving objects, reflections or refractive effects on glass. In this case, the user is usually left with no option but to reprocess the data using different calculation parameters, following the empirical "trial and error" method. This approach is very time-consuming and does not always lead to success. In the worst-case, the data must be re-collected at enormous financial and time-related cost.

This contribution is motivated by a solution that tackles all three challenges. Section 3 introduces the suggested procedure on a theoretical level whereas section 4 exemplifies its performance on real-world datasets. Section 4.1 focuses on the adaptive correction of a heavily distorted kinematic point cloud while section 4.2 presents a use case where several kinematic point cloud were mixed with many static scans.

3 Suggested procedure

In order to conquer the aforementioned challenges we suggest a homogenisation procedure which can be used either solely for kinematic scans or a combination of static and kinematic scans. The aim of a homogenisation is to change the inner geometry of ALL kinematic scans within a given project, so that the contradictions among ALL datasets, regardless of its data source, are minimised.

The procedure contains four steps, which are:

1. Decomposition of individual kinematic datasets into drift-free segments
2. Detection of planar segments within drift-free segments
3. Matching of redundantly captured areas between drift-free segments and, if given, static scans
4. Global optimisation of all observations

The aim of decomposition is to create a sequence of drift-free segments that are connected by the original trajectory. Creating these segments allows the monolithic point cloud from a kinematic source to locally align with redundantly captured areas that are subject of contradictions.

We have implemented three different strategies for equally sized decomposition namely based on a certain period, based on the distance that the kinematic scanner was carried or based on a maximum angular change in orientation of the sensor. Pre-requisites for the decomposition regardless of the chosen strategy is that both the point cloud and the trajectory are i) located in an identical coordinate system and ii) that time stamps in the same time system are given. The latter helps to clarify the question when a certain point was captured from where.

Once the point clouds are decomposed, the individual segments are converted to semi-static scans. This means that the coordinates within every segment are transformed to a virtual origin that is located in the geometric centre of the

trajectory within a segment. By doing this, each segment can be processed comparable to a static scan.

Subsequently, we extract planar features (WUJANZ et al. 2018) that serve as geometric input of a matching procedure. A surface is considered as a plane if it contains a minimum amount of points and satisfies a planarity constraint. Advantages of planes over points are its independence to sampling as well as an increase in accuracy, since the adjusted parameters are more accurate than single points.

As a next step redundantly captured areas between individual segments are identified. Should the planes be in acceptable proximity to each other, plane correspondences are formed. Note that three cases can be distinguished in practice that are exemplified in Figure 1 based on mobile mapping data. The left of the figure depicts a scene where only planes on the road were detected. In this case, a rank-deficiency occurs since not all six degrees of freedom (dof) can be solved. Instead, only two rotations about the x and y axis as well as the translational component along the z-direction can be solved. The scenario in the middle features planes on the road as well as on one façade of a house which yields in having more information in one cardinal direction. As a consequence, a rank-deficiency still is given where only five degrees of freedom can be solved. The remaining degree of freedom is the translation along the road's driving direction. On the right of the figure a scenario is illustrated where six degrees of freedom can be determined.

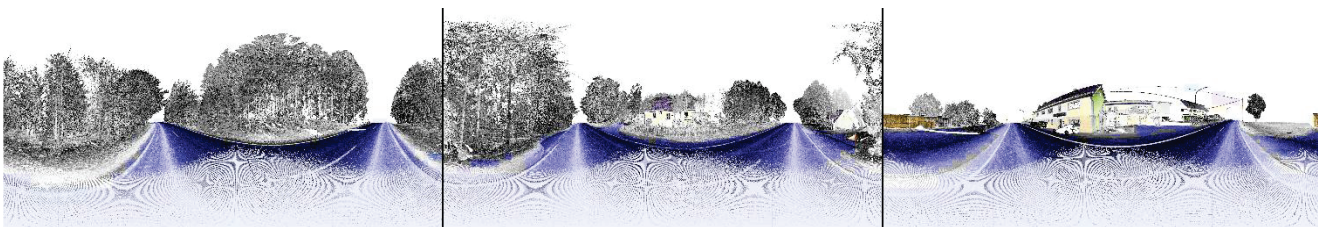


Figure 1 Scenario that only serves 3-dof (left), 5-dof (middle) and standard case with no rank-deficiency that allows to solving 6-dof (right; data courtesy of Cloud Vermessung + Planung GmbH, Germany)

The last step is a global optimisation that is based on a graph where nodes represent semi-static respectively drift-free segments and edges pairwise registrations among them. Contradictions among segments are minimised by optimising the pairwise registrations between segments. A major challenge that static and kinematic scanners are facing is that their increase in speed leads to huge data volumes that are impossible to optimise based on point cloud-based strategies due to insufficient RAM. Our approach is scalable and lean regarding system requirements. An optimisation of ~13,000 scans requires only 1.4 GB RAM at maximum (WUJANZ & SATTES 2025).

Should a global optimisation reveal one or more semi-static scans that contain contradictions which were not resolved, we suggest an adaptive approach. Adaptive means that the user can manually decompose a semi-static scan in question further to resolve the tension or to dismiss certain periods of a kinematic scans that are irreparable.

Figure 2 illustrates an example that was captured with a Xgrids Lixel Pro 2. The scanner was carried over a distance of about 500 metres around a building complex. In order to stabilise the network four control points (triangles) were introduced. Among other geodetic quality measures, we compute relative and absolute quality measures. The former indicates how well the segments locally fit together (lines

between segments) while the latter describes the positional accuracy of an individual segment (squares) with respect to a given geodetic datum - in this case to the four control points. It can be seen that the positional accuracy of the segments on the right exceeds 1 cm with increasing distance to the two adjacent control points. The provided results help a user to i) independently verify a given SLAM-solution, ii) qualitatively assess the network and iii) help to estimate how many control points with a given accuracy are required to achieve a desired accuracy of the kinematic scans.

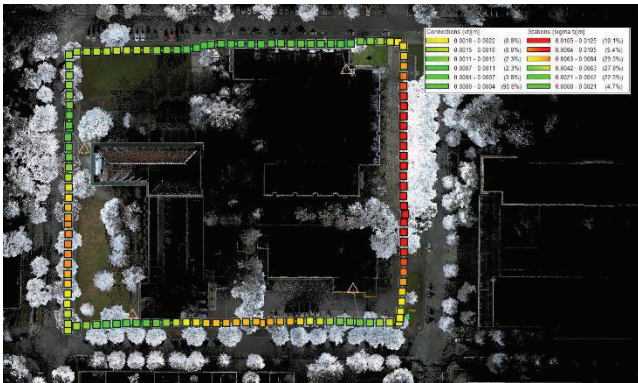


Figure 2 Relative and absolute quality measures in a kinematic scan sequence (data courtesy of Laserscanning Europe GmbH, Germany). Point cloud visualised in OpenScanTools (OST 2026), network and statistical values were computed in SCANTRA (SCANTRA 2026).

4 Case studies

In this section our suggested procedure will be demonstrated on two case studies. The first dataset was relatively short but still heavily distorted while the second dataset was challenging due to its data volume. All datasets were processed in a prototype version of SCANTRA 3.5 that contains the suggested procedure as outlined in section 3.

Note that we do not disclose which sensors were used to capture the data in the following. What may appear to be a breach of scientific openness can be justified by the fact that the outcome of ALL kinematic systems can be distorted by a wide variety of effects. In essence, we refuse that our findings could be used to discredit certain vendors, for instance by other manufacturers.

4.1 Correction of a heavily distorted dataset

The dataset featured in this section was captured in an old cinema deploying a handheld kinematic scanner. It has been

thankfully provided by VISENTINA (2026) as an algorithmic challenge that was not used for production.

The lower level used to contain the stalls while the upper level accommodated box seats. Despite its short duration of just 6.5 minutes, the dataset contains significant outliers. Figure 3 illustrates a section through the point cloud (black points) along the x and z axes. Translational errors of around 1 metre can be clearly seen on the left of the figure. The right of the figure contains rotational outliers of $\sim 5^\circ$ that emerged when entering the balcony.

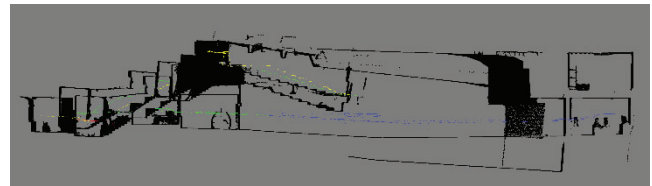


Figure 3 Heavily distorted point cloud (black points) and time-coded trajectory ranging from blue to red (visualisation in CloudCompare (CLOUDCOMPARE 2026))

At first, the point cloud was decomposed into 5 metre long segments which yielded in 50 pieces. For the final optimisation the following observations including their individual precisions were considered:

- Trajectories: 49 segments
 - Translational precision: 10 mm
 - Rotational precision: 1 mrad
- Vertical alignment of semi-static scans: 1 mrad
- 44 full registrations without rank-deficiencies: Individually computed precisions
- The optimisation required 1 second of runtime and a peak RAM consumption of ~ 3 MB.

Figure 4 illustrates the adjusted network graph. As is Figure 2, squares highlight the centre's of individual segments, the arrow colours represent the magnitude of contradictions among individual segments (local quality measures) based on their transformation parameters while the square's filling illustrates the positional accuracy as a result of error propagation (global quality measures). Note that no control points were used which is why the positional accuracy builds up to ~ 2 cm on the upper level, which is a reasonable value considering the datum station is located at the centre of the network on the ground floor. The contradictions after homogenisation are about 5 mm at most while the vast majority of relations are in the low millimetre range.

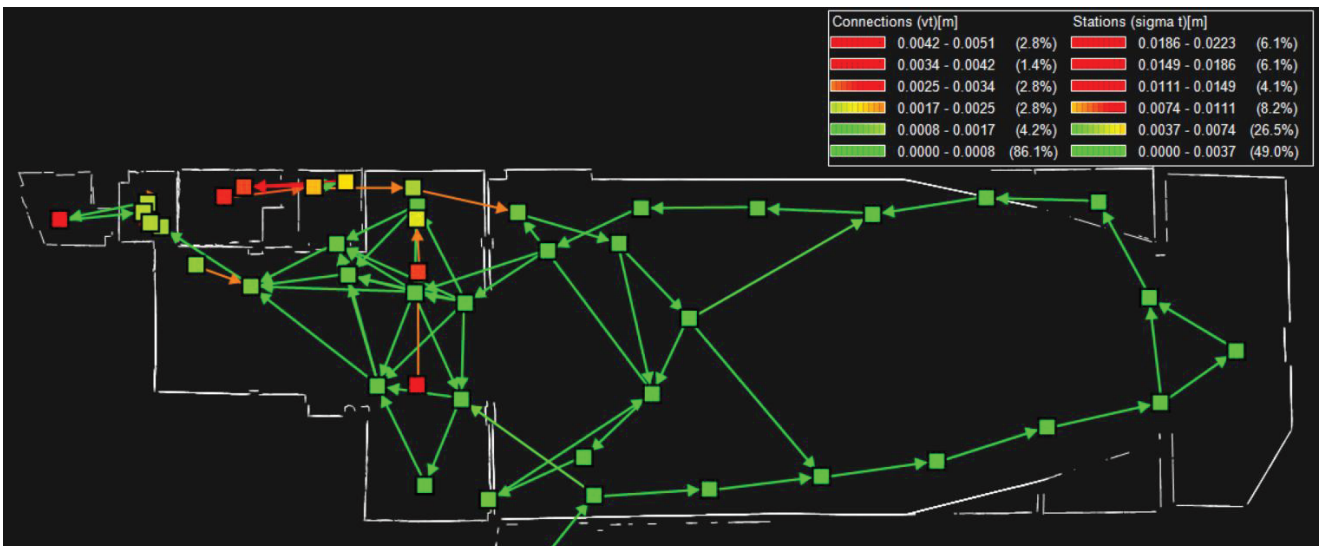


Figure 4 Bird's eye view of the final network after homogenisation (screenshot of SCANTRA)

4.2 Optimisation of a mixed dataset

GEODATIQ (2026) has thankfully provided the data that is featured in this section. The object of interest of this survey was an ancient building that spans over approximately 200 by 100 metres. It is structured into four levels including a

cellar and roof truss. Additionally, to the building itself, the exterior was also documented. In total, sixteen kinematic walks with an approximate length of 6.2 km and a raw data volume of 61 GB were captured. The kinematic scans were supported by static scans that added an additional 179 GB of data volume as well as control points that were observed by a total stations.

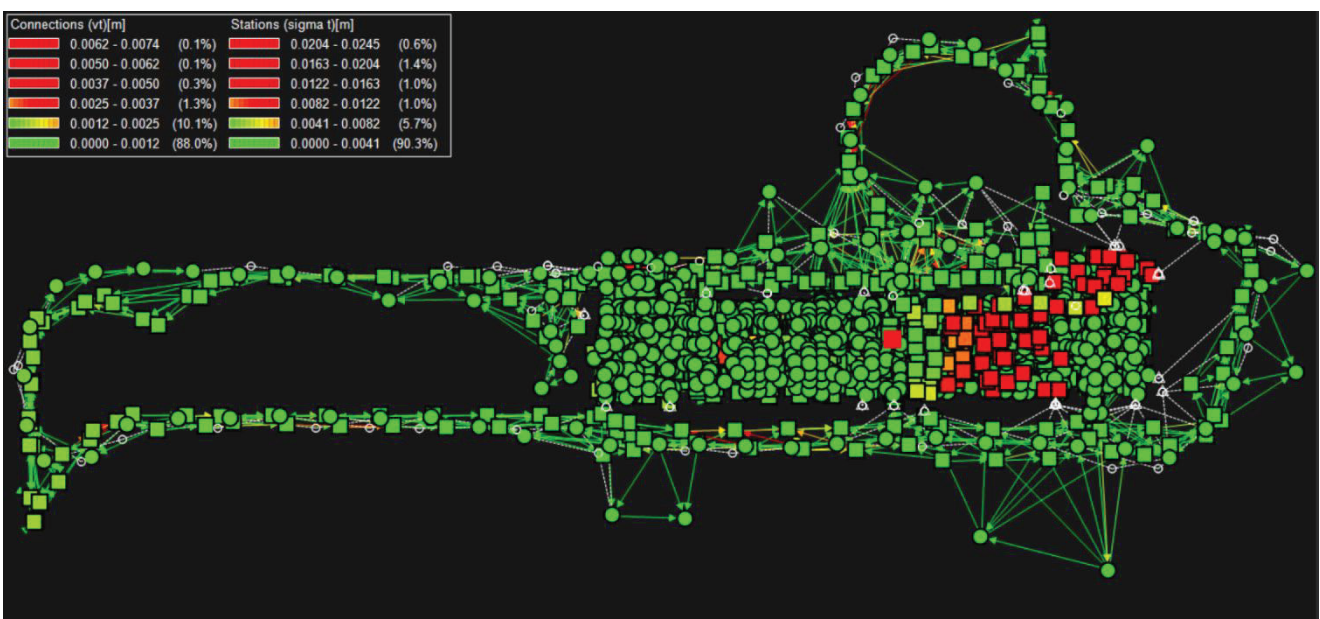


Figure 5 Bird's eye view of the mixed network after homogenisation (screenshot of SCANTRA)

The final optimisation considered the following observations including their individual precisions:

- Kinematic scans
 - Trajectories: 1239 segments
 - Translational precision: 10 mm
 - Rotational precision: 1 mrad
 - Precision of vertical alignment for semi-static scans: 1 mrad
- Static scans
 - Vertical alignment: 0.1 mrad
 - 116 local point identities: individually computed precisions
- Registrations between static and kinematic scans
 - 8853 full registrations without rank-deficiencies: Individually computed precisions
- Total station measurements
 - 70 control points: positional and vertical precision each 3 mm

The optimisation required 34 second of runtime and a peak RAM consumption of ~553 MB.

Figure 5 illustrates the adjusted network graph. The notation follows the ones of Figure 2 and Figure 4 **Figure** , while circles depict static scan positions. The contradictions of transformations parameters between scans from both sources do not exceed 8 mm. About 10% of all contradictions are lower than 2.5 mm while 88% sum up to less than 1.2 mm. The error propagation reveals that ~90% of all stations are positioned at an accuracy of better than 4.1 mm (3D-error). Approximately 6% are placed better than 8.1 mm while the remaining scans decrease up to 2.45 cm. The scans in question were all captured in the roof truss which was hard to access and additionally did not feature any control points to locally stabilise the scans.

5. Conclusion

This contribution suggests a procedure for homogenisation of either kinematic datasets or a combination of static and kinematic point clouds. It is capable to change the inner geometry of otherwise monolithic kinematic scans by decomposing them into drift-free segments. Contradictions among individual segments are minimised by matching detected planar features. The final step of the procedure is a global optimisation which achieves homogeneous results among remaining imperfections in alignment. The approach is well-scalable and is hence suitable for large kinematic projects or mixed strategies for data acquisition. In addition, it computes well-established geodetic metrics in the form of local and global quality measures. Prospective research aims to find ways of automatically adapting semi-static scans that contain outliers after an initial optimisation step.

Acknowledgements

This research was supported by Germany's Federal Ministry for Economic Affairs and Energy under research grant KK6059401GR5.

Literature

- Besl, P. J. & McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes. In *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*, Vol. 1611, pp. 586-606.
- Bosse, M., Zlot, R., & Flick, P. (2012): Zebedee: Design of a spring-mounted 3D range sensor with application to mobile mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5), pp. 1104-1119.
- CloudCompare (2026): CloudCompare - 3D point cloud and mesh processing software. [CloudCompare - Open Source project](#) (accessed: 03.04.2026).
- Du, S., Zheng, N., Ying, S. & Liu, J. (2010): Affine iterative closest point algorithm for point set registration. *Pattern Recognition Letters*, 31(9), pp. 791-799.
- OST (2026): Free and open source point cloud software. [Free and open source point cloud software - OpenScanTools](#) (accessed: 03.04.2026).
- GeodatIQ (2026): Moderne 3D-Laser Vermessung. <https://geodatiq.de> (accessed: 03.04.2026).
- Pulli, K. (1999): Multiview registration for large data sets. In *Second international conference on 3-d digital imaging and modeling* (cat. no. pr00062), pp. 160-168.
- Samet, H. (2006): *Foundations of Multidimensional and Metric Data Structures*. Kaufmann, San Francisco, California, USA.
- Scantra (2026): Scantra product page. technet-gmbh.com/en/products/scantra/ (accessed: 03.04.2026).
- Visentina (2026): Accueil - Bureau VisenTina - Géomètre-expert. <https://visentina1.jimdo.com/>. (Accessed on 04.04.2025).
- Wujan, D., Schaller, S., Gielsdorf, F. & Gründig, L. (2018): Plane-based registration of several thousand laser scans on standard hardware. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, pp. 1207-1212.
- Wujan, D. & Sattes B. (2026): Digital twin supports accurate renovation planning. <https://www.gim-international.com/content/article/digital-twin-supports-accurate-renovation-planning> (Accessed on 04.04.2026).
- Zhang, Y., Shi, P., & Li, J. (2024): 3D lidar slam: A survey. *The Photogrammetric Record*, 39(186), pp. 457-517.

Cultural Heritage as FAIR Digital Object? 3D Capturing and Semantic Interlinking of Heritage Objects in Ireland and Scotland

Florian Thiery^{1,2}, Megan Nichole Kasten³, Anne-Karoline Distel⁴, Peter Alois Thiery⁵

Abstract

The three-dimensional capture and digital documentation of early medieval inscribed stones, sculptural artefacts, and sacred landscape features opens new perspectives for research, dissemination, and preservation. Using Irish and Scottish Ogham stones, the Govan hogback stones in Glasgow, and Irish holy wells as case studies, this paper presents and compares different acquisition methods, from citizen-science-based Structure-from-Motion capture using smartphone applications such as the KIRI Engine, through classical photogrammetry, to high-resolution laser scanning, and demonstrates how the resulting 3D models can be transformed into FAIR Digital Objects (FDOs) and integrated into the Federated Knowledge Graph Ecosystem. The SquirrelBase, a dedicated Wikibase instance, acts as a semantic meta-hub assigning persistent identifiers and enabling SKOS-based alignment with Wikidata, OpenStreetMap, Semantic Kompakkt, FactGrid, and the fuzzy-sl Wikibase. Federated SPARQL queries across these interconnected knowledge bases demonstrate the approach's analytical potential. The paper argues that combining low-cost citizen science acquisition with semantic FAIRification workflows enables sustainable, interoperable, and community-driven documentation of cultural heritage at risk.

Keywords Cultural Heritage · Ogham Stones · Govan Stones · Holy Wells · Linked Open Data · Structure-from-Motion

1 Introduction

The 3D documentation of cultural heritage objects has undergone a fundamental transformation over the past decade. Whilst high-resolution laser scanning and professional photogrammetry remain the gold standard for metric accuracy, the widespread availability of Structure-from-Motion (SfM) applications on consumer smartphones has democratised the acquisition of 3D models, placing a portable digitisation laboratory in the hands of citizen scientists, researchers, and heritage practitioners alike (Thiery, Schenk, Thiery, et al., 2025). This shift in accessibility is particularly consequential for early medieval material culture, where objects are frequently dispersed across remote field locations, museum storage facilities, and institutional collections, often without systematic 3D documentation.

Ireland and Scotland preserve an exceptional corpus of early medieval heritage objects that exemplify this challenge. The Ogham stones of Ireland and western Britain, inscribed monumental stones dating primarily from the 4th

to the 7th century AD and bearing the oldest surviving written records of the Irish language, are distributed across hundreds of sites ranging from remote coastal promontories to university stone corridors (Macalister, 1945; Schmidt & Thiery, 2022). The hogback stones of Govan, housed in Govan Old Parish Church in Glasgow, represent a nationally significant collection of early medieval sculpture whose full analytical potential has only recently begun to be unlocked through digital imaging methods (Kasten, 2019). The holy wells of Ireland, deeply embedded in the landscape and living cultural practice, present yet another category of heritage features that combine archaeological significance with ongoing community relevance (Thiery, Schenk, & Thiery, 2025). For all three object categories, the creation of a 3D model, whether by smartphone SfM, classical photogrammetry, or professional laser scanning, is only the first step in a longer process of making that documentation scientifically useful and sustainably accessible. The resulting binary artefacts, including mesh files, texture maps, and point clouds, typically remain isolated digital objects: stored on personal devices or uploaded to

¹ Research Squirrel Engineers Network, Mainz, Germany, E-Mail: mail@fthiery.de

² Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA), AB Wissenschaftliche IT, Mainz, Germany, E-Mail: florian.thiery@leiza.de

³ Research Affiliate with Archaeology and Celtic and Gaelic University of Glasgow, Scotland, United Kingdom

⁴ OpenStreetMap Ireland & Research Squirrel Engineers Network, Kilkenny, Ireland

⁵ Research Squirrel Engineers Network, Limburgerhof, Germany

visualisation platforms, but disconnected from the semantic infrastructures that make research data FAIR (Wilkinson et al., 2016). Metadata describing the acquisition process, the documented object, its spatial context, and its temporal extent cannot simply be embedded in a mesh file in a machine-actionable way. Without explicit semantic packaging, 3D models of culturally significant objects risk becoming uncitable, unfindable, and ultimately inaccessible to the research communities that could benefit from them. FAIR Digital Objects (FDOs) have been proposed as a conceptual solution to this problem, encapsulating digital artefacts, their metadata, persistent identifiers, and contextual information into typed, machine-actionable units (De Smedt et al., 2020; Schwarzmann, 2020). A concrete operationalisation of these principles for packaged research artefacts is provided by the FDOx (FAIR Data Object, exchangeable) Squirrel reference implementation, which uses lightweight metadata files, namely MD.cff for descriptive metadata and CITATION.cff for attribution, together with semantic crosswalks to established vocabularies such as DCAT, CIDOC CRM, PROV-O, and GeoSPARQL, to generate machine-actionable RDF representations from self-contained ZIP archives (Thiery, 2026a). When combined with community-curated knowledge bases such as Wikibase instances and federated SPARQL endpoints, FDOs packaged in this way offer a pathway for binary 3D research artefacts to participate as first-class entities in the Federated Knowledge Graph Ecosystem, a distributed, interoperable network of RDF triplestores, controlled vocabularies, and shared ontologies (Thiery, Rossenova, et al., 2025).

This paper presents the concrete application of this approach to early medieval and sacred heritage objects in Ireland and Scotland. Building on the FDOx workflow and SquirrelBase infrastructure, it demonstrates how 3D models acquired through three distinct methods, namely citizen-science SfM with the KIRI Engine, classical photogrammetry, and high-resolution laser scanning, can be transformed into semantically interconnected FDOs and integrated into the Federated Knowledge Graph Ecosystem.

2 Background

The conceptual foundation of the approach presented in this paper rests on four interconnected pillars: the FAIR principles as a normative baseline for research data management, LOD as the technical infrastructure for semantic interlinking, FDOs as a mechanism for making binary artefacts machine-actionable, and the SquirrelBase as a domain-specific Wikibase instance serving as the semantic

hub connecting all three. Together, they define the space in which 3D models move from isolated binary files to interconnected, citable, and queryable entities in the Federated Knowledge Graph Ecosystem (Fig. 1).

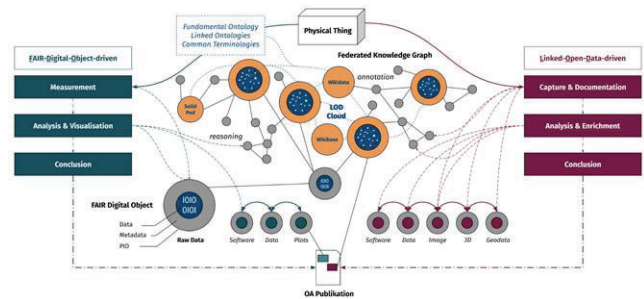


Figure 1. Scheme of the FDO- and LOD-driven Federated Knowledge Graph Ecosystem. Florian Thiery & Andreas Noback, CC BY 4.0.

FAIR & LOD. The FAIR principles provide an established normative framework for sustainable research data management (Wilkinson et al., 2016). Whilst widely adopted across disciplines, their operationalisation for binary data formats, such as 3D models, remains non-trivial, as mesh files and point clouds carry no inherent semantic structure that can be queried or interlinked across institutional boundaries. Linked Open Data (LOD), as defined by Berners-Lee (2006), offers a complementary technical approach: by representing data as RDF triples with dereferenceable URIs, resources become interoperable across institutional and disciplinary boundaries. The combination of FAIR and LOD has been demonstrated to be particularly powerful in archaeological and heritage contexts, where heterogeneous data from diverse sources must be aligned and cross-queried (Schmidt et al., 2022). However, LOD infrastructures natively address metadata and semantic content, leaving a significant gap for binary 3D research outputs.

FDO & FDOx. FAIR Digital Objects conceptualise research outputs as typed, self-contained, and machine-actionable units that bundle digital content with persistent identifiers and rich metadata (De Smedt et al., 2020; Schwarzmann, 2020). An FDO is not defined by a specific storage technology but by its role as a stable, semantically described, and persistently addressable entity. For 3D data, this means that a mesh file, together with its acquisition metadata, spatial context, temporal extent, and provenance information, can be encapsulated in a single, citable, and machine-readable object. The FDOx Squirrel reference implementation operationalises these principles through a lightweight packaging workflow: a self-contained ZIP

archive bundles the binary model files together with two metadata files, MD.cff for descriptive object metadata and CITATION.cff for attribution and citation metadata. The fdo-squirrel toolchain ingests and validates these inputs, classifies each file within the archive according to a role vocabulary, and maps metadata fields to established RDF vocabularies via explicit crosswalk rules, including DCAT for dataset description, PROV-O for provenance, CIDOC CRM and CRMdig for heritage object semantics, and GeoSPARQL for spatial representation (Thiery, 2026a). The complete FDO package is deposited on Zenodo, receiving a persistent DOI that serves as the canonical identifier for the object across all downstream systems.

Federated Knowledge Graph Ecosystem. The Federated Knowledge Graph Ecosystem combines RDF triplestores, community-curated knowledge bases such as Wikidata and specialised Wikibase instances, shared ontologies, and persistent identifier infrastructures into a distributed, interoperable network (Thiery, Rossenova, et al., 2025). Within this ecosystem, data and metadata can be queried, linked, and reused via open standards including SPARQL and GeoSPARQL across institutional and disciplinary boundaries. Metadata ontologies for the 3D acquisition domain, notably the schema proposed by Homburg et al. (2021), provide formal vocabularies for describing scanning workflows, equipment, and processing steps in RDF, enabling 3D acquisition metadata to participate directly in such federated environments. For the cultural heritage domain specifically, the ecosystem encompasses not only general-purpose knowledge bases such as Wikidata and OpenStreetMap, but also specialised instances including the fuzzy-sl Wikibase for uncertain spatial locations, FactGrid for historical prosopography, and Semantic Kompakkt for 3D annotation, each contributing a distinct layer of contextual knowledge that can be queried federatedly (Thiery et al., 2026).

SquirrelBase. The SquirrelBase is a Wikibase instance developed within the Research Squirrel Engineers Network, serving as a semantic meta-hub for 3D objects (<https://squirrelbase.wikibase.cloud>). Like Wikidata, it assigns persistent Q-identifiers to each registered object, enabling stable, citable references independent of any specific visualisation platform. Each SquirrelBase item stores identifiers linking to external resources, such as Wikidata Q-IDs, OpenStreetMap node or relation identifiers, and representative geographic coordinates, as well as structured metadata about the 3D acquisition, including method, hardware, software, creator, and licence. The SquirrelBase implements a SKOS-based semantic

alignment model that expresses the degree of connection between a registered 3D object and terms in external knowledge bases using mapping properties, namely `skos:exactMatch`, `skos:closeMatch`, and `skos:relatedMatch`, extended with a graduated seven-star alignment score (Thiery, 2026b). The FDO URL for each object is stored as a dedicated property, directly connecting the SquirrelBase item to the machine-actionable RDF representation of the packaged artefact.

3 Acquisition Methods

The case studies presented in this paper draw on three distinct 3D acquisition methods, each reflecting a different point on the spectrum between citizen-science accessibility and professional metric accuracy. All three methods produce outputs compatible with the FDOx packaging workflow and the SquirrelBase ingestion pipeline described in Section 2, demonstrating that the semantic FAIRification approach is method-agnostic and applicable across a wide range of documentation contexts.



Figure 2. SfM acquisition campaign with the KIRI Engine app at the University College Cork (UCC), showing field documentation of Ogham stones in the stone corridor. Florian Thiery & Anne-Karoline Distel, CC BY-NC-SA 4.0.

Structure-from-Motion with the KIRI Engine. The first and most accessible method is smartphone-based Structure-from-Motion photogrammetry using the KIRI Engine application (Fig. 2). The user takes a series of photographs of the target object from multiple angles; the application automatically aligns the images, constructs a dense point cloud, and generates a textured mesh. The resulting model is exported in multiple formats, including GLB, PLY, NXS, and NXZ, to ensure compatibility with different downstream visualisation and processing environments. The entire acquisition process requires no specialist equipment beyond a modern smartphone and can be completed in the field within minutes, making it genuinely accessible to citizen scientists and researchers without dedicated hardware budgets (Thiery, Schenk,

Thiery, et al., 2025). In the context of this paper, the KIRI Engine was used for SfM documentation of Ogham stones in the University College Cork stone corridor and at the Cork Public Museum, as well as for documenting Irish holy wells in County Kilkenny. The resulting models were published on Sketchfab and via the 3DHOP viewer hosted at archaeosquirrels.cloud, with all acquisition metadata recorded as qualified statements in the SquirrelBase.

Classical Photogrammetry. The second method is classical photogrammetry using dedicated camera equipment and professional processing software. In the context of this paper, this method was applied to the Govan hogback stones by M.N. Kasten as part of her doctoral research at the University of Glasgow, using a combination of Nikon D5300 and D5500 cameras, a Samsung Galaxy A3 smartphone, and a ReTrak EUselfieB Bluetooth selfie stick, with processing carried out in Agisoft PhotoScan (Kasten, 2019). Classical photogrammetry offers higher geometric accuracy and greater control over lighting and coverage compared to smartphone SfM, making it particularly suitable for objects with complex surface detail, such as the interlaced ornamental carvings on the Govan hogbacks. The resulting models were published on Sketchfab and in Semantic Kompakkt, where they are available for semantic 3D annotation.

High-Resolution Laser Scanning. The third method is high-resolution laser scanning, applied to selected Ogham stones by the Ogham in 3D project and the OG(H)AM project (Kasten & Forsyth, 2023). For the stones documented in this paper, scanning was carried out using an Artec Eva structured-light handheld scanner and a Faro terrestrial laser scanner, with processing in Geomagic. Laser scanning delivers the highest geometric accuracy of the three methods and is particularly suited to objects where surface relief carries epigraphic significance, as is the case for Ogham inscriptions, where the precise morphology of individual scores is of direct scholarly relevance. The resulting 3D files are published via the Ogham in 3D web portal at ogham.celt.dias.ie, with selected models additionally integrated into the SquirrelBase and aligned to external knowledge bases. It should be noted that for the laser-scanned stones, the FDO packaging and SquirrelBase registration presented in this paper represent a retrospective FAIRification of models originally created outside the FDOx workflow, thereby demonstrating the approach's applicability to pre-existing 3D assets.

The three methods occupy distinct positions in the trade-off between accessibility, cost, and geometric accuracy. Smartphone SfM with the KIRI Engine is the most

accessible and lowest-cost option, deployable by any citizen scientist with a modern device, but it is sensitive to lighting conditions, surface reflectivity, and photographic coverage, and does not yet incorporate automated geometric quality assessment. Classical photogrammetry offers greater control and accuracy at the cost of more complex equipment and longer processing times. Laser scanning delivers the highest accuracy and is best suited to objects of epigraphic or fine-surface significance, but requires specialist equipment and trained operators. Crucially, from the perspective of the FDOx workflow and SquirrelBase integration, all three methods are treated equivalently: the acquisition method, hardware, software, and creator are recorded as qualified statements on each 3D URL property in the SquirrelBase, making the methodological provenance of every model explicit, queryable, and comparable across the corpus.

4 Case Studies

The following case studies illustrate the application of the FDOx workflow and SquirrelBase infrastructure to cultural heritage objects in Ireland and Scotland. All objects are registered in the SquirrelBase with persistent Q-identifiers, and where FDO packages have been partly deposited on Zenodo, the corresponding DOIs are cited.

4.1 Ogham Stones

Ogham is an early medieval script used primarily between the 4th and 7th centuries AD, consisting of scores and notches cut along a central stem line, most commonly along the edge of an upright stone. The corpus of surviving Ogham stones, catalogued in the *Corpus Inscriptionum Insularum Celticarum* (Macalister, 1945) and documented digitally in the Linked Open Ogham Data project (Schmidt & Thiery, 2022), constitutes the oldest surviving written record of the Irish language and provides invaluable evidence for early medieval social structures, territorial boundaries, and cultural exchange across Ireland and western Britain. The stones documented in this paper are distributed across museum collections and field locations in County Cork and County Kerry and represent a range of acquisition methods and levels of existing digital documentation.

The integration of Ogham stones into the Federated Knowledge Graph Ecosystem follows the workflow outlined in Section 2 and illustrated concretely in Fig. 3. Each stone is registered in the SquirrelBase with its CIIC number as a label, linked to its Wikidata Q-ID, OpenStreetMap node identifier, and representative geographic coordinates.

Acquisition metadata for each 3D model, including method, hardware, software, creator, and licence, is stored as qualified statements on the corresponding 3D URL property. SKOS-based alignment statements connect each stone to the Wikidata concept of Ogham stone via `skos:exactMatch` at seven stars, and to its specific exhibition or field location via `skos:relatedMatch` at three stars.

CIIC 81, UCC Stone Corridor IV (Q48). The stone CIIC 81, also known as UCC Stone Corridor IV and carrying the catalogue identifier CO074-148---, is one of a series of Ogham stones displayed in the stone corridor of University College Cork. It bears the inscription *C[A]SSITT[A]S MAQI MU[CO]I CALLITI* and was documented by Anne-Karoline Distel using the KIRI Engine on an iPhone, producing a model published on Sketchfab (<https://skfb.ly/oVOIH>) and via the 3DHOP viewer at archaeosquirrels.cloud. In the SquirrelBase (Q48), the stone is aligned to Wikidata (wd:Q130529871) and to the UCC Stone Corridor (wd:Q121592049) via `skos:relatedMatch` at three stars. A federated SPARQL query across the Semantic Kompakkt Wikibase and Wikidata, illustrated in Fig. 3, retrieves the 3D file view location from Semantic Kompakkt together with all external identifiers from Wikidata, including the OpenStreetMap node ID, the Irish Sites and Monuments Record ID, the Linked Open Ogham Data URI, and the FactGrid item ID, in a single query result, demonstrating the analytical potential of the federated knowledge graph approach.

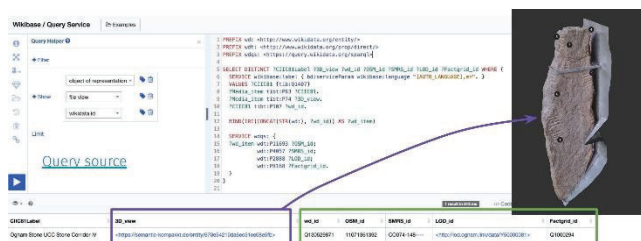


Figure 3. Federated SPARQL query across Semantic Kompakkt and Wikidata. Lozana Rossenova & Florian Thiery, CC BY-NC-SA 4.0.

4.2 Irish Holy Wells

The holy wells of Ireland are a distinctive category of sacred landscape feature that combines pre-Christian ritual origins with centuries of Christian devotional practice. Distributed across the entire island, they are particularly numerous in County Kilkenny, where they are documented in both the Irish Sites and Monuments Record and the Wikidata WikiProject HolyWells (Thiery, Schenk, & Thiery, 2025). The integration of holy wells into the Federated Knowledge

Graph Ecosystem follows the same FDOx and SquirrelBase workflow as the Ogham stones, with objects linked to their Wikidata Q-IDs, OpenStreetMap way or node identifiers, and Irish Sites and Monuments Record identifiers.

St Lachtain's Well, Freshford (Q27). St Lachtain's Well, also known as Toberlachtain, is located in Freshford, County Kilkenny, and is dedicated to Saint Lachtain, who founded the local monastery in the 7th century AD (Fig. 4). The well is recorded in the Irish Sites and Monuments Record as KK013-025 and in OpenStreetMap as way/935503837. It was documented by Anne-Karoline Distel using the KIRI Engine on an iPhone, producing a photogrammetric model published on Sketchfab (<https://skfb.ly/oWvIB>). In the SquirrelBase (Q27), the well is aligned to the Wikidata concept of Holy Well (wd:Q1371047) via `skos:exactMatch` at seven stars and to the civil parish of Freshford (wd:Q60554307) via `skos:relatedMatch` at three stars, with the alignment source recorded as the Wikidata item Q121840779 and the reference work Ó Dálaigh (2018).

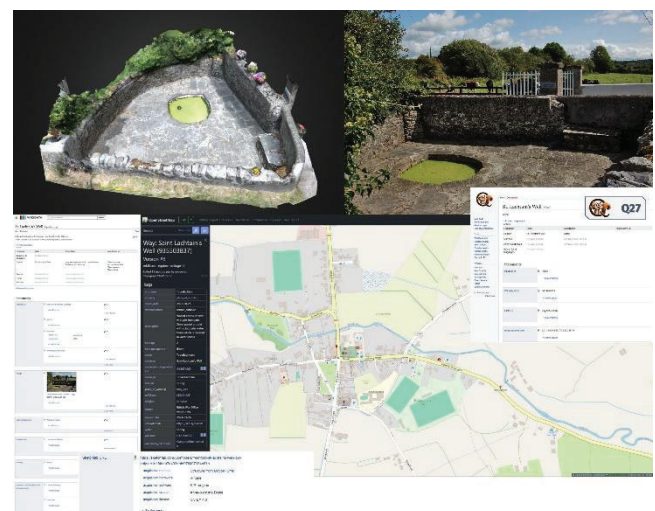


Figure 4. St Lachtain's Well, Freshford. Anne-Karoline Distel, CC BY 4.0; Wikidata Community, CC0, OpenStreetMap Contributors, ODbL.

4.3 Govan Stones

The Govan stones are a collection of thirty-one early medieval sculptural monuments housed in Govan Old Parish Church on the south bank of the River Clyde in Glasgow. The collection includes five hogback stones, a sarcophagus, and a series of recumbent grave markers and represents one of the most significant concentrations of early medieval sculpture in Scotland. The hogback stones of Govan, characterised by their distinctive curved profiles and elaborate interlaced ornamental carvings, have been the

subject of sustained scholarly interest since the 19th century, and their full analytical potential has only recently begun to be unlocked through systematic digital imaging (Kasten, 2019).

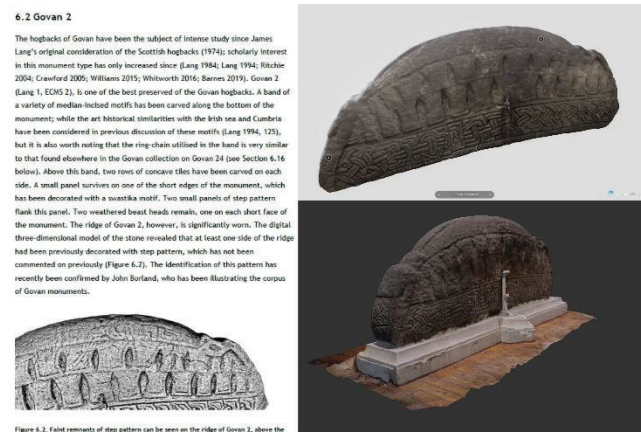


Figure 5. Govan 2. Megan N. Kasten (also via Kasten 2019, p. 158), CC BY 4.0; Florian Thiery, CC BY 4.0.

Hogback Govan Stone 2 (Q51). Govan Stone 2, known in both Stirling Maxwell's numbering and the Early Christian Monuments of Scotland catalogue as Lang 1, is one of the smallest and best-preserved of the Govan hogbacks (Fig. 5). A band of median-incised motifs has been carved along the bottom of the monument, and two rows of concave tiles have been carved on each side, whilst small panels of step pattern flank a swastika motif on one short face. The stone was documented by Megan Nichole Kasten as part of her doctoral research using classical photogrammetry with Nikon D5300 and D5500 cameras and Agisoft PhotoScan, producing a model published on Sketchfab (<https://skfb.ly/6XTQr>) and in Semantic Kompakkt, where it is available for semantic 3D annotation (Kasten, 2019). An additional model of the same stone was captured by Florian Thiery using the KIRI Engine on a Samsung Galaxy S22 during a subsequent visit and is registered in Semantic Kompakkt as a separate media item (<https://t1p.de/wblf0>). In the SquirrelBase (Q51), the stone is aligned to the Wikidata concept of Hogback (wd:Q1570646) via skos:exactMatch at seven stars, to the Govan Stones collection (wd:Q42887850) via skos:closeMatch at six stars, and to Govan Old Parish Church (wd:Q5588564) via skos:relatedMatch at three stars, with the alignment description recording that the stone is physically located within the church.

5 Discussion & Conclusions

The case studies presented in Section 4 demonstrate that the FDOx workflow and SquirrelBase infrastructure are not only technically feasible for low-cost citizen science acquisition of ephemeral objects, as demonstrated there, but equally applicable to the documentation and semantic FAIRification of early medieval and sacred cultural heritage objects in Ireland and Scotland. Across three object categories, three acquisition methods, and multiple institutional and field contexts, the workflow consistently produces machine-actionable, persistently identified, and semantically aligned research outputs that participate as first-class entities in the Federated Knowledge Graph Ecosystem. Several observations merit discussion. The method-agnostic character of the FDOx packaging step is one of the most significant practical findings of this paper. Whether the input model was captured with a consumer smartphone in a museum corridor, produced through classical photogrammetry as part of a doctoral research programme, or generated by a professional laser scanner in the context of a large-scale national heritage project, the resulting binary artefact can be packaged, deposited, and registered in the SquirrelBase using the same lightweight workflow. The acquisition method, hardware, software, creator, and licence are recorded as qualified statements on each 3D URL property, making the methodological provenance of every model explicit, queryable, and comparable across the corpus. This is particularly valuable for a heterogeneous corpus such as the Ogham stones, where models from citizen science campaigns, doctoral research, and national digitisation projects coexist and can now be queried together through a shared semantic infrastructure. The federated SPARQL query illustrated in Figure 3 exemplifies the analytical potential that emerges when this infrastructure is in place. By querying across the Semantic Kompakkt Wikibase and Wikidata simultaneously, it becomes possible to retrieve the 3D file view location of a specific Ogham stone together with all its external identifiers, including its OpenStreetMap node, its Irish Sites and Monuments Record ID, its Linked Open Ogham Data URI, and its FactGrid item ID, in a single query result. This kind of cross-repository federation, which would previously have required manual lookup across four or five separate platforms, is made possible precisely because each repository is used for the kind of data it is best suited to hold: Wikidata as a hub for external identifiers, Semantic Kompakkt for 3D model annotation, FactGrid for historical prosopography, and the SquirrelBase as the semantic coordinator connecting them all. The principle of using each repository for what it is best

suited to, rather than attempting to replicate all functionality in a single system, is one of the key design insights of the Federated Knowledge Graph Ecosystem approach. The retrospective FAIRification of pre-existing 3D assets, demonstrated by the laser-scanned Ogham stones from the OG(H)AM project and the photogrammetric Govan stone models from the Kasten doctoral corpus, deserves particular attention. In both cases, the original acquisition was performed outside the FDOx workflow, yet the resulting models could be integrated into SquirrelBase and semantically aligned with the original data without modifying it. This demonstrates that the approach is applicable not only to newly acquired models but also to existing 3D heritage collections, potentially enabling the retrospective FAIRification of large institutional repositories at relatively low cost and effort. The SKOS-based alignment model implemented in the SquirrelBase adds an analytical layer that goes beyond simple identifier linking. By recording not only the target URI of an alignment but also its mapping type, a graduated seven-star score, the source repository, and a human-readable rationale, the model makes the epistemological basis of each semantic connection explicit and queryable (Thiery, 2026b). For objects embedded in complex cultural contexts that carry meaningful semantic relationships to inscription corpora, ecclesiastical sites, historical persons, and geographic features, the ability to express and query these graduated alignments federatedly across SquirrelBase, Wikidata, and Semantic Kompakkt represents a significant advance over simple same-as linking. Several limitations of the present work deserve acknowledgement. The FDOx implementation does not yet address persistent-identifier resolution services or data-type registries, and DOI-based identification depends on Zenodo's continued operation. SfM model quality remains variable and sensitive to lighting conditions and photographic coverage, and there is no automated geometric quality assessment. SKOS alignment scores rely on human judgment and currently lack automated suggestion support. The SquirrelBase depends on sustained curatorial effort to maintain long-term data quality, and the retrospective FAIRification of large existing collections would require significant community investment to scale.

Looking ahead, several directions for future development emerge naturally from the present work. The expansion of the SquirrelBase corpus to cover the full Ogham stone collection, in collaboration with the OG(H)AM project and the Ogham in 3D initiative, would provide a semantically interconnected 3D corpus of early medieval inscriptions at a scale not previously achievable.

The integration of the workflow into larger research data infrastructures such as NFDI4Objects (von Rummel et al., 2025), where FDO-based 3D data could participate directly in the FAIR Object Biography lifecycle alongside other object-related research data, offers a further pathway for scaling the approach. Automated quality metrics for SfM mesh outputs, AI-assisted semantic alignment suggestions, and tighter integration with TEI-EpiDoc-encoded inscription data from the OG(H)AM project could all strengthen the analytical depth of the resulting knowledge graph entries. In conclusion, this paper has demonstrated that the combination of accessible 3D acquisition methods, FDO packaging, and semantic registration in a dedicated Wikibase instance can produce research outputs for early medieval and sacred cultural heritage that are genuinely findable, accessible, interoperable, and reusable. The journey from a smartphone photograph in a museum corridor to a semantically interconnected node in the Federated Knowledge Graph Ecosystem is short, reproducible, and open, regardless of whether the object in question is a freshly captured ice sculpture or a fifteen-hundred-year-old inscribed stone. The squirrel approves.

Acknowledgements

The authors would like to thank the members of the Research Squirrel Engineers Network, in particular Sophie C. Schmidt, M. Trognitz, and Dr T. Homburg, for their ongoing contributions to the tools, workflows, and intellectual environment from which this work emerged. Thanks are also due to Dr A. Noback for fruitful collaboration within the NFDI context, and to Dr L.K. Schubert of the German Chapter of CAA International for continued support and engagement with the community. The prose of this paper was refined with the assistance of Claude (claude.ai, Anthropic), an AI language model. All scientific content, research questions, data, interpretations, and conclusions are entirely the work of the authors; the AI was used solely as a writing tool to improve clarity and readability of text drafted and directed by the authors.

Author Contributions

Florian Thiery – Conceptualisation, Data curation, Formal analysis, Methodology, Project administration, Software, Visualisation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Megan N. Kasten** – Conceptualisation, Data curation, Formal analysis, Methodology, Resources, Visualisation. **Anne-Karoline Distel** – Data curation,

Formal analysis, Methodology, Resources, Visualisation.
Peter A. Thiery – Data curation.

Bibliography

- Berners-Lee, T. (2006). *Linked Data—Design Issues*. <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>
- De Smedt, K., Koureas, D., & Wittenburg, P. (2020). FAIR Digital Objects for Science: From Data Pieces to Actionable Knowledge Units. *Publications*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/publications8020021>
- Homburg, T., Cramer, A., Raddatz, L., & Mara, H. (2021). Metadata schema and ontology for capturing and processing of 3D cultural heritage objects. *Heritage Science*, 9(1), 91. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00561-w>
- Kasten, M., & Forsyth, K. (2023). Report on OG(H)AM: Harnessing digital technologies to transform understanding of ogham writing, from the 4th century to the 21st. In G. Waxenberger, K. Kazzazi, & L. Kopár (Eds), *Runes:et.al.* (Vol. 1, pp. 28–40). Catholic University of Eichstätt-Ingolstadt, Sprach- und Literaturwissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Deutsche Sprachwissenschaft. <https://doi.org/10.17904/ku.edoc.33410>
- Kasten, M. N. (2019). *The Govan stones revealed: Digital imaging in the analysis of early medieval sculpture* [Doctoral Thesis (PhD), University of Glasgow]. <https://doi.org/10.5525/gla.thesis.74266>
- Macalister, R. A. S. (1945). *Corpus inscriptionum insularum Celticarum*. Stationery Office.
- Ó Dálaigh, P. (2018). *The Holy Wells of County Kilkenny in terms of documentary coverage, location, ritual practice and onomastic concept—Volume 1 and 2* [Doctoral thesis, Mary Immaculate College, University of Limerick]. <https://dspace.mic.ul.ie/handle/10395/2584>
- Schmidt, S. C., & Thiery, F. (2022). SPARQLing Ogham Stones: New Options for Analyzing Analog Editions by Digitization in Wikidata. *CEUR Workshop Proceedings*, 3110(Graph Technologies in the Humanities 2020), 211–244. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6380914>
- Schmidt, S. C., Thiery, F., & Trognitz, M. (2022). Practices of Linked Open Data in Archaeology and Their Realisation in Wikidata. *Digital*, 2(3), 333–364. <https://doi.org/10.3390/digital2030019>
- Schwardmann, U. (2020). Digital Objects – FAIR Digital Objects: Which Services Are Required? *Data Science Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.5334/dsj-2020-015>
- Thiery, F. (2026a). From Packaged Research Artefacts to RDF: A Reference Implementation for FAIR Digital Objects into the Federated Knowledge Graph Ecosystem. *Squirrel Papers*, 8(1), §4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18441772>
- Thiery, F. (2026b). Gradual Semantic Alignment for SKOS: Quantifying Mapping Strength in Knowledge Graph Infrastructures. *Squirrel Papers*, 8(1), §2. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18441001>
- Thiery, F., Rossenova, L., Mietchen, D., Homburg, T., & Thiery, P. (2025). Distributed Research Data Knowledge Graphs—Challenges of federated queries using the Wikiverse and OpenStreetMap within the NFDI Knowledge Graph Ecosystem. In Y. Sure-Vetter & P. Groth (Eds), *Proceedings of the Conference on Research Data Infrastructure 2025: 7(5)*, Q2 (p. 7(5), Q2). Squirrel Papers. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16736047>
- Thiery, F., Schenk, F., Stefan, D., Distel, A.-K., & Thiery, P. A. (2026). From Stones and Wells to Tephra: Leveraging Wikidata and Wikibase for Interdisciplinary Humanities Linked Data. *Journal of Open Humanities Data*, 12(10), 1–16. <https://doi.org/10.5334/johd.425>
- Thiery, F., Schenk, F., & Thiery, P. (2025). Das Research Squirrel Engineers Network: FAIRification Tools und LOD-Projekte aus der Archäoinformatik und den Geowissenschaften. *Archäologische Informationen*, 47(NWDVA 2024 Bochum: Digitale Archäologie), 115–140. <https://doi.org/10.11588/ai.2024.1.110394>
- Thiery, F., Schenk, F., Thiery, P., & Thiery, S. (2025). Low-Cost-3D-Digitalisierung mit SfM in Smartphone-Apps—3D-Modelle ‘zum Mitnehmen’ und eine Open-Data-Publikation mit dem Wikiversum sowie OSM. In T. Luhmann & T. Sieberth (Eds), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage und des BIMtages 2025*. (pp. 144–153). Wichmann.
- von Rummel, P., Keller, C., & Fricke, F. (2025). NFDI4Objects: Warum brauchen wir eine gemeinsame Forschungsdateninfrastruktur für die materiellen Hinterlassenschaften der Menschheitsgeschichte? *Archäologische Informationen*, 47(NWDVA 2024 Bochum: Digitale Archäologie), 63–72. <https://doi.org/10.11588/ai.2024.1.110390>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, Ij. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., Da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

From Pocket to Knowledge Graph: Low-Cost 3D Capturing with Smartphones and Semantic FAIR Modelling in the SquirrelBase

Florian Thiery^{1,2}

Abstract

Low-cost smartphone-based Structure-from-Motion (SfM) acquisition using tools such as the KIRI Engine enables rapid, accessible three-dimensional documentation of cultural heritage objects, ephemeral structures, and artistic installations. However, the resulting binary 3D artefacts — mesh files, textures, and associated data — typically exist outside the Linked Open Data (LOD) and RDF world, limiting their integration into semantic research infrastructures. This paper presents a workflow that bridges this gap by packaging 3D artefacts as FAIR Digital Objects (FDOs) using lightweight metadata files (MD.cff, CITATION.cff) and semantic crosswalks, generating RDF representations aligned with DCAT, CIDOC CRM, and GeoSPARQL. The resulting FDOs are ingested into the SquirrelBase, a Wikibase instance acting as a semantic meta-hub for 3D objects, assigning persistent Q-identifiers and enabling SKOS-based alignment with Wikidata and OpenStreetMap. Five case studies from the South Tyrolean Dolomites, Cologne, Kassel, and Graz demonstrate how objects ranging from ephemeral ice sculptures to urban art installations can be connected to the Federated Knowledge Graph Ecosystem and made findable, interoperable, and reusable in sustainable ways.

Keywords Low-Cost 3D · FAIR Digital Objects · SquirrelBase · Federated Knowledge Graph · Semantic Alignment

1 Introduction

The spontaneous 3D capturing of objects encountered in everyday life, from cairns balanced on frozen lakes to ephemeral ice sculptures and urban art installations, has become technically feasible for anyone carrying a modern smartphone. Structure-from-Motion (SfM) applications such as the KIRI Engine allow citizen scientists and researchers alike to capture high-resolution 3D models from a series of photographs within minutes, effectively turning a pocket device into a portable digitisation laboratory. Yet the resulting binary artefacts, including mesh files, texture maps, and associated documentation, typically remain isolated digital objects: stored on personal devices or uploaded to visualisation platforms, but disconnected from the semantic infrastructures that make research data FAIR: findable, accessible, interoperable, and reusable (Wilkinson et al., 2016). This disconnection represents a fundamental challenge for sustainable 3D documentation. Whilst Linked Open Data (LOD) and RDF-based knowledge graphs have become established tools for interlinking cultural heritage metadata (Berners-Lee, 2006; Schmidt et al., 2022), binary 3D data formats sit outside the RDF world by their very nature. Metadata describing the acquisition process, the

documented object, its spatial context, and its temporal extent cannot simply be embedded in a mesh file in a machine-actionable way. Therefore, 3D models of ephemeral or at-risk objects, that is, structures that may no longer physically exist shortly after capture, risk becoming inaccessible and uncitable, despite their potential scientific and cultural value. FAIR Digital Objects (FDOs) have been proposed as a conceptual solution to this problem, encapsulating digital artefacts, their metadata, persistent identifiers, and contextual information into typed, machine-actionable units (Schwardmann, 2020). When combined with community-curated knowledge bases such as Wikibase instances and federated SPARQL endpoints, FDOs offer a pathway for binary research artefacts to participate as first-class entities in what may be described as a Federated Knowledge Graph Ecosystem, a distributed, interoperable network of RDF triplestores, controlled vocabularies, and shared ontologies.

This paper presents a concrete workflow that realises this pathway for low-cost smartphone-based 3D acquisition. Starting from a self-contained artefact package, the approach generates RDF-based FDO representations. It ingests them into *SquirrelBase*, a dedicated Wikibase instance that serves as a semantic meta-hub for 3D objects. The workflow is

¹ Research Squirrel Engineers Network, Mainz, E-Mail: mail@fthiery.de

² Leibniz-Zentrum für Archäologie (LEIZA), AB Wissenschaftliche IT, Mainz, E-Mail: florian.thiery@leiza.de

illustrated through five case studies drawn from the Research Squirrel Engineers Network, spanning ephemeral natural formations in the South Tyrolean Dolomites, urban art installations in Cologne, a landmark conceptual art project in Kassel, and a permanent sculpture in Graz. Together, these examples demonstrate that the journey from pocket to knowledge graph is not only technically feasible but reproducible, open, and scalable. The paper introduces the conceptual framework, describes the FDO workflow and SquirrelBase architecture, presents the case studies, and concludes with a discussion of findings and an outlook.

2 Conceptual Framework

The approach presented in this paper rests on three complementary conceptual pillars: the FAIR principles as a normative baseline for research data management, FAIR Digital Objects as a mechanism for making binary artefacts machine-actionable, and the Federated Knowledge Graph Ecosystem as the target infrastructure into which these objects are integrated. A fourth element, the SquirrelBase as a domain-specific Wikibase instance, serves as the semantic hub connecting all three. Together, they define the conceptual space in which low-cost 3D artefacts move from isolated binary files to interconnected, citable, and queryable entities (Fig. 1).

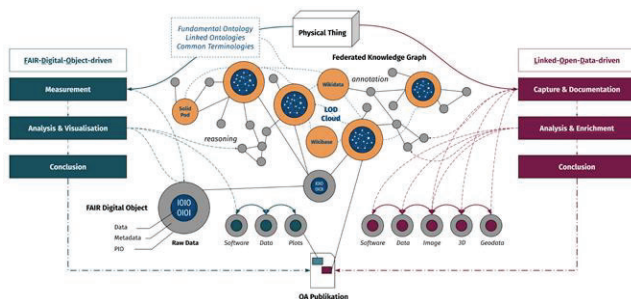


Figure 1. Scheme of the FDO- and LOD- driven Federated Knowledge Graph Ecosystem. Florian Thiery & Andreas Noback, CC BY 4.0.

FAIR Principles and Linked Open Data. The FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable) provide an established normative framework for sustainable research data management (Wilkinson et al., 2016). Whilst widely adopted, their operationalisation for binary data formats such as 3D models remains non-trivial. Linked Open Data (LOD), as defined by Sir Tim Berners-Lee, offers a complementary technical approach: by representing data as RDF triples with dereferenceable URIs, resources become interoperable across institutional and disciplinary boundaries. The combination of FAIR and LOD

has been demonstrated to be particularly powerful in archaeological and heritage contexts, where heterogeneous data from diverse sources must be aligned and cross-queried (Schmidt et al., 2022). However, LOD infrastructures natively address metadata and semantic content, leaving a significant gap for binary 3D research outputs.

FAIR Digital Objects. FAIR Digital Objects (FDOs) conceptualise research outputs as typed, self-contained, and machine-actionable units that bundle digital content with persistent identifiers and rich metadata (De Smedt et al., 2020; Schwardmann, 2020). An FDO is not defined by a specific storage technology but by its role as a stable, semantically described, and persistently addressable entity. For 3D data, this means that a mesh file, together with its acquisition metadata, spatial context, temporal extent, and provenance information, can be encapsulated in a single, citable, and machine-readable object. A concrete operationalisation of these principles for packaged research artefacts, using lightweight metadata files (MD.cff for descriptive metadata, CITATION.cff for attribution) and semantic crosswalks to established vocabularies such as DCAT, CodeMeta, and PROV-O, is provided by the FDOx (FAIR Data Object, exchangeable) Squirrel reference implementation (Thiery, 2026a). The metadata schema for the heritage domain extends this base with domain-specific fields covering object type, material, acquisition technique, spatial coordinates, and conservation status (Fig. 2).

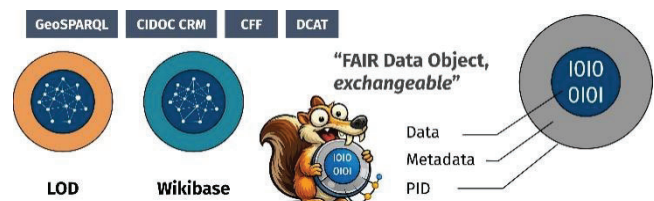


Figure 2. Scheme of the FDO- and LOD- driven Concepts. Florian Thiery, CC BY 4.0.

The Federated Knowledge Graph Ecosystem. The Federated Knowledge Graph Ecosystem combines RDF triplestores, community-curated knowledge bases such as Wikidata and specialised Wikibase instances, shared ontologies, and persistent identifier infrastructures into a distributed, interoperable network (Thiery, Rossenova, et al., 2025). Within this ecosystem, data and metadata can be queried, linked, and reused via open standards including SPARQL and GeoSPARQL across institutional and disciplinary boundaries. Metadata ontologies for the 3D acquisition domain, notably the schema proposed by Homburg et al. (2021), provide formal vocabularies for describing scanning workflows, equipment, and processing

steps in RDF, enabling 3D acquisition metadata to participate directly in such federated environments.

SquirrelBase. The SquirrelBase is a Wikibase instance developed within the Research Squirrel Engineers Network, serving as a semantic meta-hub for 3D objects (<https://squirrelbase.wikibase.cloud>). Like Wikidata, it assigns persistent Q-identifiers to each registered object, enabling stable, citable references independent of any specific visualisation platform. Each SquirrelBase item stores identifiers linking to external resources, such as Wikidata Q-IDs, OpenStreetMap node or relation identifiers, and representative geographic coordinates, as well as structured metadata about the 3D acquisition, including method, hardware, software, creator, and licence. Crucially, the SquirrelBase implements a SKOS-based semantic alignment model that expresses the degree of connection between a registered 3D object and terms in external knowledge bases using mapping properties (`skos:exactMatch`, `skos:closeMatch`, `skos:relatedMatch`), and is extended with a graduated seven-star alignment score (Thiery, 2026b). This allows, for instance, a 3D scan of a cairn to be linked to the Wikidata concept of a cairn with an `exactMatch` at seven stars, whilst simultaneously being related to its specific geographic location in OpenStreetMap with a `relatedMatch` at three stars. The FDO URL for each object is stored as a dedicated property, directly connecting the SquirrelBase item to the machine-actionable RDF representation of the packaged artefact.

The interplay of these four pillars is illustrated in Figures 1 and 2, which show the full conceptual pathway from a physical object through measurement and binary capture, FDO packaging, and SquirrelBase ingestion, to participation in the Federated Knowledge Graph Ecosystem.

3 Methodology

The workflow presented in this paper transforms a smartphone-captured 3D model into a machine-actionable FAIR Digital Object and integrates it into the SquirrelBase and the wider Federated Knowledge Graph Ecosystem. The process comprises five sequential steps: acquisition, publication, FDO packaging, SquirrelBase ingestion, and federated querying. Each step is described below.

Step 1: 3D Capturing with the KIRI Engine. 3D models are captured, e.g., using the KIRI Engine, an AI-assisted smartphone application that implements Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry. The user takes photos of the target object from multiple angles; the application automatically aligns the images, constructs a dense point cloud, and generates a textured mesh. The resulting model is

exported in multiple formats (e.g., GLB, PLY, NXS, and NXZ) to ensure compatibility with different downstream visualisation and processing environments. The entire acquisition process requires no specialist equipment beyond a modern smartphone and can be completed in the field within minutes, making it genuinely accessible to citizen scientists and researchers without dedicated hardware budgets (Thiery, Schenk, & Thiery, 2025).

Step 2: 3D Publication. Prior to FDO packaging, the 3D model is published on one or more open visualisation platforms to ensure human-accessible presentation. The SquirrelBase workflow supports two primary publication targets: Sketchfab, a widely used interactive 3D platform accessible to broad audiences, and 3DHOP (Three-Dimensional Heritage Online Presenter), an open-source framework for scientific web-based 3D visualisation hosted on the Research Squirrel Engineers infrastructure at archaeosquirrels.cloud. Whilst Sketchfab offers broad discoverability, its proprietary nature introduces long-term sustainability risks; 3DHOP provides full institutional control over hosting and is therefore preferred for scientific archiving. Both platform URLs are stored as qualified statements in the SquirrelBase with full acquisition qualifiers.

Step 3: FDO Packaging. The core methodological contribution of the workflow is the transformation of the 3D artefact into a FAIR Digital Object using the `fdo-squirrel` reference implementation `FDOx`. The input is a self-contained ZIP archive bundling the binary model files together with two lightweight metadata files: `MD.cff`, which encodes descriptive object metadata including FDO type (`fdo:3DDataFDO`), persistent identifier, title, spatial coordinates, temporal extent, acquisition technique, object type, material, condition, and conservation urgency; and `CITATION.cff`, which encodes attribution and citation metadata including authors, licence, and version. The `fdo-squirrel` toolchain ingests and validates these inputs, classifies each file within the archive according to a role vocabulary (`fdo:role = model`, `fdo:role = metadata`, `fdo:role = documentation`), and maps metadata fields to established RDF vocabularies via explicit crosswalk rules: DCAT for dataset description, CodeMeta for software and dataset attribution, PROV-O for provenance, CIDOC CRM and CRMdig for heritage object semantics, and GeoSPARQL for spatial representation. The output is a structured RDF serialisation (`fdo-metadata.ttl`) together with a human-readable modelling report. The complete FDO package is deposited on Zenodo, receiving a persistent DOI that serves as the canonical identifier for the object across all

downstream systems. The structure of this packaging process is shown in Fig. 3, whilst a concrete example of the resulting MD.cff structure is illustrated in Fig. 4.

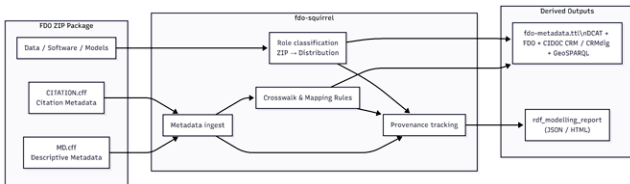


Figure 3. The FDOx Workflow. Florian Thiery, CC BY 4.0.

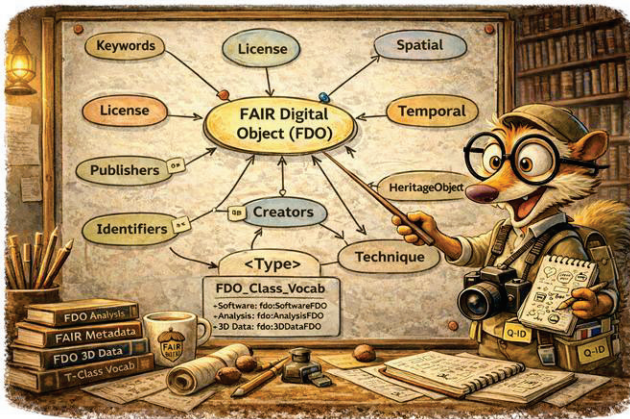


Figure 4. The FDOx Metadata. Florian Thiery, CC BY 4.0, top created using OpenAI’s DALL·E.

Step 4: SquirrelBase Ingestion. Once the FDO has been deposited and its DOI confirmed, the object is registered in the SquirrelBase. Each item receives a persistent Q-identifier and is populated with two categories of statements. The Identifier & Metadata section stores the Wikidata Q-ID of the documented object, its OpenStreetMap node, way, or relation identifier, and its representative geographic point as a WKT geometry. The ThreeDDataAsURL section stores qualified links to the KIRI Engine model, the 3DHOP viewer URL, and the Sketchfab URL, each annotated with acquisition qualifiers. The FAIRDigitalObject section stores

the Zenodo DOI of the FDO package together with its type, format, licence, and release version. Finally, SKOS-based alignment statements connect each item to terms in external knowledge bases: each AlignedWithTerm statement records the target URI, the mapping property type, a seven-star alignment score, the source repository, and the alignment rationale, making the degree of semantic connection explicit and queryable.

Step 5: Federated SPARQL Queries. The final step demonstrates the analytical potential of the integrated workflow. Because all SquirrelBase items expose their geometry via GeoSPARQL-compatible WKT literals and their semantic alignments via SKOS properties, they can be queried in conjunction with Wikidata, OpenStreetMap-derived datasets, and other Wikibase instances using federated SPARQL. The *SPARQLing Unicorn QGIS Plugin* (Thiery, Schenk, & Thiery, 2025) provides a practical interface for executing such federated queries and visualising the results as georeferenced layers within a GIS environment, enabling spatial analysis across heterogeneous knowledge graph sources without requiring custom integration code.

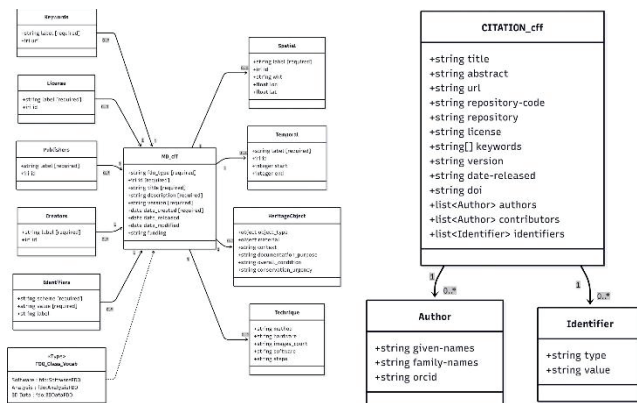
4 Use Cases

The following five case studies illustrate the workflow across a range of object types and documentation contexts. All objects are registered in the SquirrelBase with FDO packages deposited on Zenodo, grouped into three thematic categories.

4.1 Ephemeral Natural Formations

The first two case studies document spontaneously encountered, inherently temporary formations in the South Tyrolean Dolomites, captured in January 2026. Both objects ceased to exist within days, leaving their FDO representations as the sole surviving records.

Lago di Anterselva: Steinmännchen (Q60). A hand-built cairn (a “Steinmännchen”) was encountered on the frozen surface of the Lago di Anterselva (Antholz/Anterselva, South Tyrol) on 3 January 2026. The object was captured using a Samsung Galaxy S22 with the KIRI Engine application, producing a photogrammetric model from a series of photographs taken in the field. The resulting FDO package (DOI: 10.5281/zenodo.18732892) contains 64 files, including GLB model data, acquisition metadata in MD.cff and CITATION.cff, and 61 photographic documentation images. In the SquirrelBase (Q60), the object is registered as a temporal object with a



representative point at 46°53'18.1032"N, 12°10'11.568"E, aligned to the Wikidata concept of Steinmännchen (wd:Q7321974) via skos:exactMatch at seven stars, to the Getty AAT concept of cairns (aat:300006960) via skos:exactMatch at seven stars, and to the Antholzer See as a temporal site in both Wikidata and OpenStreetMap via skos:relatedMatch. The temporal extent is recorded using ChronOntology (dfwAgTD5WMEV, start: 2026, end: 2026), indicating that the object exists as a single-season phenomenon (Fig. 5).



Figure 5. Q60. Florian Thiery, CC BY 4.0.

Lago di Braies: Eismännchen (Q20, Q21). Two ice formations, spontaneous sculptures assembled from blocks of ice along the frozen shore of the Lago di Braies (Prags/Braies, South Tyrol), were documented during a fieldwork visit on 5th January 2025. Q20 captures a larger composite formation resembling a stacked figure, whilst Q21 documents a tall, tower-like ice column balanced on a rock. Both were captured with the KIRI Engine and are registered as individual SquirrelBase items with separate FDO packages, spatial coordinates, and temporal alignments. As with Q60, the physical objects no longer exist; the 3D models, together with their semantic FDO representations, constitute the only durable record of these formations.

Taken together, Q20, Q21, and Q60 exemplify that low-cost smartphone SfM, when combined with FDO packaging and SquirrelBase registration, enables the preservation of objects that would otherwise leave no trace in any research infrastructure (Fig. 6).

4.2 Urban & Conceptual Art

The second group of case studies documents objects from two established artistic contexts in German cities, demonstrating the workflow's applicability to modern cultural heritage with rich existing documentation in external knowledge bases.



Figure 6. Q20 & Q21. Florian Thiery, CC BY 4.0.

Cologne: Heinzelmännchen "Heinz Eau" (Q55). The Heinz Eau is one of the Heinzelmännchen figures distributed throughout Cologne as part of the Heinz Welt urban art project, a series of small bronze sculptures that reference the Cologne legend of the Heinzelmännchen as retold by August Kopisch. The figure, a gnome seated in a bathtub holding a bottle of Eau de Cologne, is located at OSM node/12848270361 in the Glockenstraße. It was captured on 25 July 2025 using a Samsung Galaxy S22 with the KIRI Engine, and its FDO package (DOI: 10.5281/zenodo.18740523) contains 32 files. In the SquirrelBase (Q55), the object is aligned to the Wikidata concept of Heinzelmännchen (wd:Q537513) via skos:exactMatch at seven stars, to the specific Kölner Heinzelmännchen Weg trail (wd:Q138425168) via skos:relatedMatch at three stars, and to the Heinzelmännchen poem by Kopisch (wd:Q330568801) via skos:relatedMatch at three stars, reflecting the layered cultural context of the object (Fig. 7).

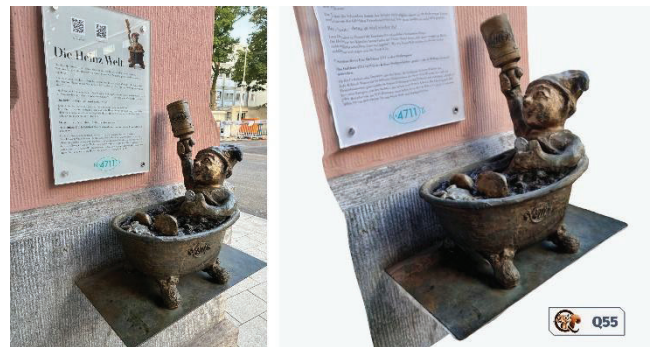


Figure 7. Q55. Florian Thiery, CC BY 4.0.

Kassel: Beuys-Stele B 1036, "7000 Eichen" (Q56). The second urban art case study documents one of the 7,000 oak tree-basalt stele pairs planted across Kassel as part of Joseph Beuys's landmark conceptual art project 7000 Eichen, initiated at documenta 7 in 1982. Stele B 1036 is located at OSM node/3647679932 (51°18'47.2471"N, 9°29'53.569"E). It was captured on 14 July 2025 using a Samsung Galaxy S22 with the KIRI Engine, producing an FDO package (DOI: 10.5281/zenodo.18742693) containing 46 files with an OBJ model. The SquirrelBase item (Q56)

carries four alignment statements: to the 7000 Eichen OSM relation (relation/4629093) via skos:closeMatch at six stars with the description "art project" and source "Literature"; to the Wikidata item for 7000 Eichen (wd:Q261274) via skos:closeMatch at six stars; to the Wikidata item for Beuys Basaltstele (wd:Q138426002) via skos:exactMatch at seven stars as object type; and to Joseph Beuys (wd:Q53065) via skos:relatedMatch at four stars as artist. This layered alignment, connecting the physical stele, the artwork series, the artist, and the geographic infrastructure, demonstrates how the SquirrelBase model supports nuanced semantic description of objects embedded in complex cultural contexts.

4.3 Permanent Sculptural Installation

Graz: "Das Erforschen der Dauer" by Manfred Erjautz (Q59). The final case study documents a permanent sculptural installation at the Universalmuseum Joanneum in Graz: a life-sized marble snowman with coal eyes, a carrot nose, and a puddle of water cast around its base, created by the Austrian artist Manfred Erjautz (Fig. 8).

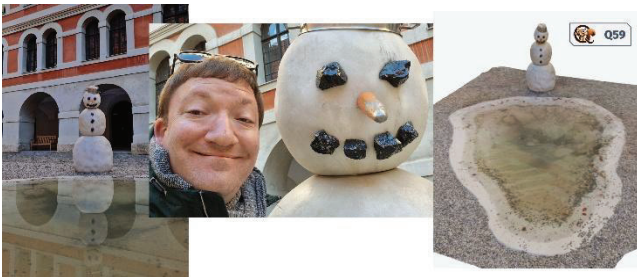


Figure 8. Q59. Florian Thiery, CC BY 4.0.

The work, whose title translates as "Exploring the Duration", deliberately interrogates the boundary between the ephemeral and the permanent: a snowman rendered in marble, eternally melting yet never gone. It was captured on a visit to Graz using the KIRI Engine and is registered in the SquirrelBase as Q59. Whilst this object, unlike the Dolomites formations, does physically persist, its conceptual subject matter, duration, impermanence, and the tension between material and idea, make it a fitting conclusion to the case study sequence. Its FDO representation connects the 3D scan to the artist's Wikidata entity, the museum's geographic location in OpenStreetMap, and the broader discourse on ephemeral art through SKOS-aligned semantic statements. Together with the preceding four case studies, it demonstrates that the workflow is equally applicable to permanent, temporary, and entirely vanished objects, and

that the semantic richness of the resulting knowledge graph entries scales with the availability of external reference data.

5 Discussion & Conclusions

The five case studies presented in Section 4 demonstrate that the pathway from a smartphone in a jacket pocket to a semantically interconnected node in the Federated Knowledge Graph Ecosystem is not only technically feasible but practically reproducible across a wide range of object types, cultural contexts, and documentation motivations. From a frozen cairn at the Lago di Anterselva to a marble snowman in Graz, the workflow consistently produces machine-actionable, persistently identified, and semantically aligned research outputs from nothing more than a consumer smartphone and a sequence of open-source tools. Several methodological observations merit discussion. The FDO packaging step, which transforms a ZIP archive containing binary mesh files and lightweight metadata into an RDF representation aligned with DCAT, CIDOC CRM, and GeoSPARQL, is the critical bridging operation in the workflow. Without this step, the 3D models remain isolated binary artefacts, accessible for human inspection via Sketchfab or 3DHOP but invisible to the semantic query infrastructure. The fdo-squirrel reference implementation FDOx makes this transformation explicit, reproducible, and auditable through provenance tracking, lowering the barrier for adoption considerably. The MD.cff metadata schema, extended with heritage-specific fields for object type, material, condition, acquisition technique, and spatial and temporal extent, is sufficiently expressive to cover the full range of case-study objects without requiring domain-specific ontology engineering at the point of capture. The SquirrelBase SKOS alignment model adds a further layer of analytical value that goes beyond simple identifier linking. By recording not only the target URI of an alignment but also its mapping type, a graduated seven-star score, the source repository, and a human-readable rationale, the model makes the epistemological basis of each semantic connection explicit and queryable. This is particularly relevant for objects embedded in complex cultural contexts, as demonstrated by the Beuys-Stele case study, where a single physical object carries meaningful semantic relationships to an artwork series, an artist, a specific object type, and a geographic infrastructure, each at a different degree of connection. The ability to express and query these graduated alignments federatedly across SquirrelBase, Wikidata, and OpenStreetMap simultaneously represents a significant advance over simple same-as linking.

The comparison between ephemeral and temporal/permanent objects in the case study sequence also yields an important conceptual insight. For the ice formations at the Lago di Braies and the cairn at the Lago di Anterselva, the FDO representation is not merely a convenient supplement to the physical object: it is the only surviving record. In these cases, the workflow fulfils a preservation function that no amount of metadata enrichment after the fact could replicate. This argues for integrating FDO packaging into the acquisition workflow from the outset, rather than treating it as a post-processing step, and reinforces the practical value of low-cost, in-field documentation tools for citizen science communities engaged in heritage recording. Several limitations deserve acknowledgement. The fdo-squirrel implementation does not yet address persistent identifier resolution or data type registries, and DOI-based identification depends on Zenodo's continued operation. SfM model quality remains variable and sensitive to lighting and photographic coverage, without automated quality assessment. SKOS alignment scores rely on human judgment and lack automated suggestion support. SquirrelBase depends on sustained curatorial effort to maintain long-term data quality.

Looking ahead, several directions for future development emerge naturally from the present work. The integration of persistent identifier services and richer FDO type registries would strengthen the machine-actionability of the generated objects and bring the implementation closer to the full FDO framework specification. Automated quality metrics for SfM mesh outputs could be incorporated into the MD.cff schema as additional technique fields, enabling downstream filtering by geometric accuracy. AI-assisted semantic annotation, for instance, automatic suggestion of Wikidata alignment candidates based on object type and geographic context, would reduce the manual effort required for SquirrelBase ingestion and improve consistency across contributors. The workflow is also well-positioned for integration into larger research data infrastructures such as NFDI4Objects (von Rummel et al., 2025), where FDO-based 3D data could participate directly in the FAIR Object Biography lifecycle alongside other object-related research data.

In conclusion, this paper has shown that low-cost smartphone-based 3D acquisition, when combined with FDO packaging and semantic registration in a dedicated Wikibase instance, can produce research outputs that are genuinely findable, accessible, interoperable, and reusable –

not as an aspiration, but as a demonstrable, reproducible outcome. The journey from pocket to knowledge graph is short, open, and well-signposted. The squirrel approves.

Acknowledgements

The authors would like to thank the members of the Research Squirrel Engineers Network, in particular Anne-Karoline Distel, Peter A. Thiery, Sophie C. Schmidt, M. Trognitz, and Dr T. Homburg, for their ongoing contributions to the tools, workflows, and intellectual environment from which this work emerged. Thanks are also due to Dr A. Noback and A. Gerber for fruitful collaboration within the NFDI context, and to Dr L.K. Schubert of the German Chapter of CAA International for continued support and engagement with the community. The prose of this paper was refined with the assistance of Claude (claude.ai, Anthropic), an AI language model. All scientific content, research questions, data, interpretations, and conclusions are entirely the work of the authors; the AI was used solely as a writing tool to improve clarity and readability of text drafted and directed by the authors.

Author Contributions

Florian Thiery – Conceptualisation, Data curation, Formal analysis, Methodology, Project administration, Software, Visualisation, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Bibliography

- Berners-Lee, T. (2006). *Linked Data—Design Issues*. <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>
- De Smedt, K., Koureas, D., & Wittenburg, P. (2020). FAIR Digital Objects for Science: From Data Pieces to Actionable Knowledge Units. *Publications*, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/publications8020021>
- Homburg, T., Cramer, A., Raddatz, L., & Mara, H. (2021). Metadata schema and ontology for capturing and processing of 3D cultural heritage objects. *Heritage Science*, 9(1), 91. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00561-w>
- Schmidt, S. C., Thiery, F., & Trognitz, M. (2022). Practices of Linked Open Data in Archaeology and Their Realisation in Wikidata. *Digital*, 2(3), 333–364. <https://doi.org/10.3390/digital2030019>
- Schwardmann, U. (2020). Digital Objects – FAIR Digital Objects: Which Services Are Required? *Data Science Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.5334/dsj-2020-015>

- Thiery, F. (2026a). From Packaged Research Artefacts to RDF: A Reference Implementation for FAIR Digital Objects into the Federated Knowledge Graph Ecosystem. *Squirrel Papers*, 8(1), §4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18441772>
- Thiery, F. (2026b). Gradual Semantic Alignment for SKOS: Quantifying Mapping Strength in Knowledge Graph Infrastructures. *Squirrel Papers*, 8(1), §2. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18441001>
- Thiery, F., Rossenova, L., Mietchen, D., Homburg, T., & Thiery, P. (2025). Distributed Research Data Knowledge Graphs—Challenges of federated queries using the Wikiverse and OpenStreetMap within the NFDI Knowledge Graph Ecosystem. In Y. Sure-Vetter & P. Groth (Eds), *Proceedings of the Conference on Research Data Infrastructure 2025: 7(5), Q2* (p. 7(5), Q2). *Squirrel Papers*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16736047>
- Thiery, F., Schenk, F., Stefan, D., Distel, A.-K., & Thiery, P. A. (2026). From Stones and Wells to Tephra: Leveraging Wikidata and Wikibase for Interdisciplinary Humanities Linked Data. *Journal of Open Humanities Data*, 12(10), 1–16. <https://doi.org/10.5334/johd.425>
- Thiery, F., Schenk, F., & Thiery, P. (2025). Das Research Squirrel Engineers Network: FAIRification Tools und LOD-Projekte aus der Archäoinformatik und den Geowissenschaften. *Archäologische Informationen*, 47(NWDVA 2024 Bochum: Digitale Archäologie), 115–140. <https://doi.org/10.11588/ai.2024.1.110394>
- Thiery, F., Schenk, F., Thiery, P., & Thiery, S. (2025). Low-Cost-3D-Digitalisierung mit SfM in Smartphone-Apps—3D-Modelle ‘zum Mitnehmen’ und eine Open-Data-Publikation mit dem Wikiversium sowie OSM. In T. Luhmann & T. Sieberth (Eds), *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage und des BIMtages 2025*. (pp. 144–153). Wichmann.
- von Rummel, P., Keller, C., & Fricke, F. (2025). NFDI4Objects: Warum brauchen wir eine gemeinsame Forschungsdateninfrastruktur für die materiellen Hinterlassenschaften der Menschheitsgeschichte? *Archäologische Informationen*, 47(NWDVA 2024 Bochum: Digitale Archäologie), 63–72. <https://doi.org/10.11588/ai.2024.1.110390>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, Ij. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., Da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

Zur Korrektur von Exzentrizitäten bei der Bildellipsenmessung von Kugeln und Kreisen in der zentralperspektiven Abbildung

Frank Liebold¹, & Hans-Gerd Maas¹

Zusammenfassung

Bei photogrammetrischen Messungen kommen häufig kreisförmige Zielmarken, zum Teil aber auch Kugeln als signalisierte Punkte zum Einsatz. Kreise und Kugeln erscheinen bei einer zentralperspektiven Abbildung im Allgemeinen als Ellipsen im Bild. Die Koordinaten der Ellipsenmittelpunkte werden in der Photogrammetrie als Beobachtungsgrößen für räumliche Vorwärts- und Rückwärtsschnitte sowie die Bündelblockausgleichungen verwendet. Die Ellipsenzentren weichen jedoch im Allgemeinen von den projizierten Objektmittelpunkten ab, was man als Abbildungsexzentrizität bezeichnet und was zu systematischen Fehlern führt. Der Effekt wird häufig ignoriert, da sich die Fehler bei geeigneten (kleinen) Radien und Vermeiden sehr schräger Visuren minimieren und sich kaum auswirken. Für hochgenaue photogrammetrische Messungen sollte die Exzentrizität allerdings beachtet werden. Der vorliegende Artikel behandelt verschiedene Korrekturverfahren für die Exzentrizität im Bildraum und geht zudem auf Erweiterungen des Lochkameramodells für beide Objekttypen ein. Bei der bildseitigen Korrektur werden die gemessenen Ellipsenzentren zum projizierten Objektmittelpunkt hin verbessert, und es kann weiterhin das gängige Standardlochkameramodell als Abbildungsmodell verwendet werden. Im Falle der Modellerweiterung werden die Ellipsenparameter direkt beim Abbildungsvorgang berechnet, sodass die Exzentrizität bereits dabei berücksichtigt wird. In unserem Beitrag werden die mathematischen Modelle für die Exzentrizitätskorrektur kompakt dargestellt. Weiterhin werden Verfahren zur Bestimmung der Auswirkung des systematischen Fehlers bei Nichtbeachtung der Exzentrizität diskutiert.

Schlagwörter Abbildungsexzentrizität · Zentralperspektive · Kugelprojektion · Kreisprojektion

1 Einführung

In photogrammetrischen Anwendungen werden häufig Kreismarken, aber auch kugelförmige Marken als signalisierte Punkte verwendet. Beide Markentypen erscheinen im Allgemeinen als Ellipsen in der zentralperspektiven Abbildung, wobei deren Mittelpunkt vom ins Bild projizierten Objektmittelpunkt abweicht. Diese Diskrepanz bezeichnet man als Abbildungsexzentrizität, die bei Nichtbeachtung zu systematischen Fehlern führt.

Zahlreiche Arbeiten haben sich in der Vergangenheit mit dem Effekt befasst. Die Exzentrizität von Kreismarken wurde u.a. von Dold (1996), Ahn et al. (1999), Otepka & Fraser (2004), Wrobel (2012), He et al. (2012), Luhmann (2014), Matsuoka & Maruyama (2016) und Liebold & Maas (2026a) betrachtet.

Im Falle der Kugeln erschienen neben Arbeiten photogrammetrischer Forschergruppen ((Luhmann, 2014), (Matsuoka & Maruyama, 2016), (Maalek & Lichti, 2021) und Liebold & Maas (2026b)) auch Korrekturmethode aus

der Röntgenphysik mit Kegelprojektion (Neukamm et al. 2010), (Clackdoyle & Mennessier, 2011), (Deng et al. 2015), (Butzhammer et al., 2023). Die einzelnen Korrekturen werden im nächsten Kapitel gezeigt.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die verschiedenen Korrekturmethode und zeigt Verfahren zur Bestimmung der Auswirkung des Effektes, wobei die Berechnungsvorschriften aus dem Korrekturkapitel genutzt werden.

2 Mathematische Betrachtung der Abbildungsexzentrizität

2.1 Kreisprojektion

Die Projektion eines Kreises lässt sich mathematisch als Schnittfläche der Bildebene mit einem geneigten Kreiskegel (mit der Kreismarke als Grundfläche) interpretieren. Liegt die Bildebene parallel zur Kreisfläche, entsteht als Abbildung auch ein Kreis (Sonderfall). Die

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland, E-Mail: frank.liebold@tu-dresden.de, hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Abbildungsexzentrizität lässt sich für die Kreisprojektion mit Hilfe gegenüberliegender Punkte auf einem speziellen Kreisdurchmesser berechnen, wie Dold (1996) dies für den 2D-Fall veranschaulichte. Im 3D-Raum muss zunächst der entsprechende Durchmesser bestimmt werden. Dieser liegt in einer Ebene, die durch den Kreismittelpunkt verläuft und durch die optische Achse (z-Achse im Kamerakoordinatensystem) und die Kreisnormale \vec{n} aufgespannt wird. Abbildung 1 skizziert die Projektion des Kreises (magenta) ins Bild (Bildellipse in cyan). Der spezielle Durchmesser ist orange eingefärbt. Eine detaillierte mathematische Herleitung ist bei Liebold & Maas (2026a) zu finden. Weiterhin ist der Abbildungsvorgang für Kreise und die Berechnung der Exzentrizität im Kapitel 3.1.2 beschrieben.

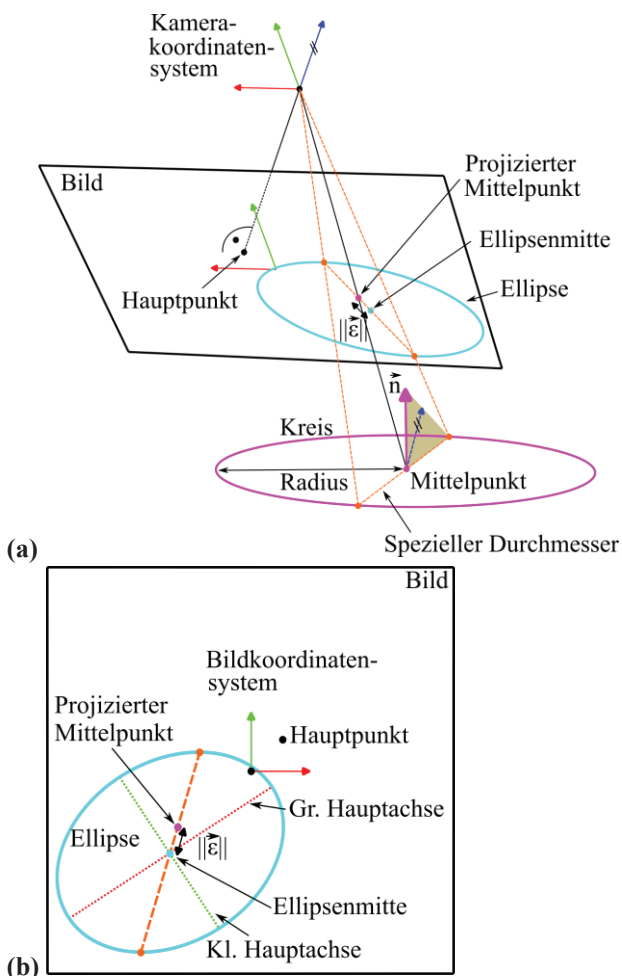


Abbildung 1 Projektion eines Kreises (magenta) ins Bild, Ellipse (cyan) als Projektion. Der projizierte Mittelpunkt weicht vom Ellipsenmittelpunkt ab (Exzentrizität \vec{e}). (a) 3D-Skizze, (b) zugehöriges Bild. Angepasste Abbildung nach Liebold & Maas (2024).

2.2 Kugelprojektion

Die Projektion der Kugel ist mathematisch gesehen ein Kegelschnitt eines geraden Kreiskegels, nämlich des Berührungskegels mit der Kugel, welcher durch die Bildebene geschnitten wird. Hier tritt der Sonderfall eines Bildkreises dann ein, wenn die optische Achse durch den Kugelmittelpunkt läuft. Abbildung 2 veranschaulicht den Projektionsvorgang der Kugel (blau). Ein gedachter Berührungskegel mit dem Projektionszentrum als Spitze berührt die Kugel an einem Kreis, dessen Mittelpunkt nicht mit dem Kugelzentrum übereinstimmt. Die Projektion des Berührungskreises ergibt die Bildellipse. Der projizierte Kugelmittelpunkt liegt auf der großen Halbachse (grün) der Bildellipse und die Verlängerung der Achse schneidet den Bildhauptpunkt. Der Abstand des Bildellipsenmittelpunktes r_{ell} zum Hauptpunkt ist länger als der des projizierten Kugelmittelpunktes r_M .

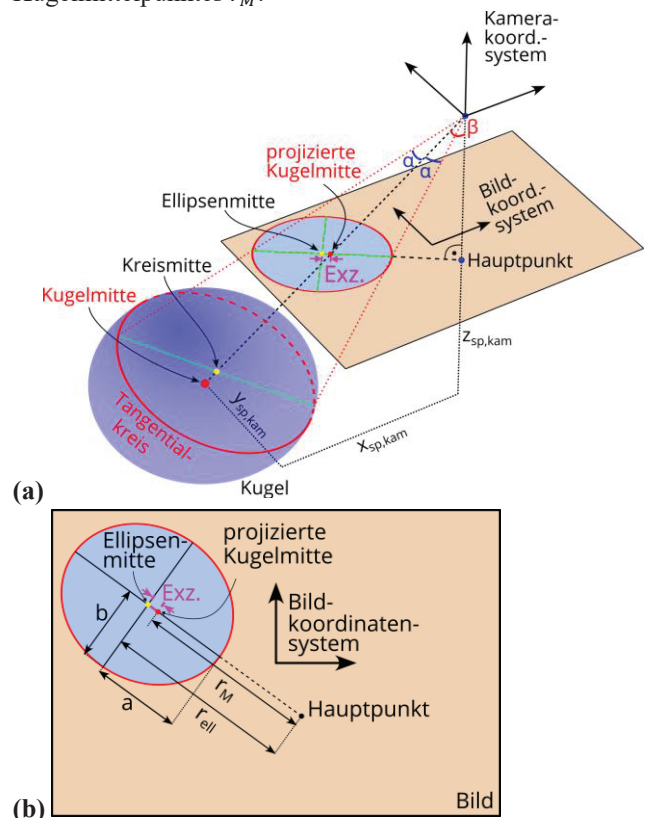


Abbildung 2 Projektion einer Kugel (blau). (a) 3D-Skizze, (b) zugehöriges Bild. Angepasste Abbildung nach Liebold & Maas (2026b)

Der Abbildungsvorgang wird formelmäßig in Kapitel 3.1.3 beschrieben und weitere Details sind bei Liebold & Maas (2026b) zu finden.

3 Korrekturansätze für die Abbildungsexzentrizität

Zur Korrektur der Abbildungsexzentrizität gibt es verschiedene Strategien:

- Nutzung eines angepassten Lochkameramodells, das als Ergebnis die Ellipsenmittelpunktkoordinaten liefert
- Korrektur der Bildkoordinaten zum projizierten Mittelpunkt hin und Nutzung des Standardlochkameramodells
- Nutzung eines Modells, welches gar nicht mit dem Ellipsenmittelpunkt arbeitet wie bei der Methode von Andresen (1991).
- Verwendung von anderen Markentypen, z.B. Schachbrettmarken

Die ersten beiden Ansätze werden im Folgenden betrachtet.

3.1 Lochkameramodelle für Punkt, Kreis und Kugel

Die Abbildungsvorgänge (Modelle) sind hier in jeweils drei Teilschritten dargestellt, sodass Parallelen sichtbar werden.

3.1.1 Standardlochkameramodell für Punkte

Der Vorgang beginnt mit einer Transformation des Punktes vom Objekt- ins Kamerakoordinatensystem:

$$\vec{X}_{P,kam} = \mathbf{R}^T \cdot (\vec{X}_P - \vec{X}_{ProjZ}) \quad (1)$$

mit \vec{X}_{ProjZ} : Koordinatenvektor des Projektionszentrums

\vec{X}_P : Punktkoordinaten im Objektkoordinatensystem

$\vec{X}_{P,kam}$: Punktkoordinaten im Kamerakoord.-System

\mathbf{R} : Drehmatrix (vom Objekt- ins Kamerakoord.-System)

Dann erfolgt die Projektion ins Bild:

$$\begin{pmatrix} x_{P,kam} \\ y_{P,kam} \end{pmatrix} = -c \cdot \frac{1}{z_{P,kam}} \cdot \begin{pmatrix} X_{P,kam} \\ Y_{P,kam} \end{pmatrix} \quad (2)$$

mit c : Kamerakonstante

Im nächsten Schritt erhält man die Bildkoordinaten durch die Hauptpunktverschiebung:

$$\vec{x}_P = \vec{x}_{P,kam} + \vec{x}_H \quad (3)$$

mit \vec{x}_H : Vektorkoordinaten des Bildhauptpunkts

Die Abbildungsexzentrizität ist im Falle eines Punktes Null:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{0} \quad (4)$$

3.1.2 Lochkameramodell für Kreise

Für Kreise eignet sich ein angepasstes Lochkameramodell nach (Liebold & Maas, 2026a). Dieses beginnt auch mit einer Transformation von Kreismittelpunkt und -normale \vec{n} vom Objekt- ins Kamerakoordinatensystem:

$$\vec{X}_{M,kam} = \mathbf{R}^T \cdot (\vec{X}_M - \vec{X}_{ProjZ}) \quad (5)$$

$$\vec{n}_{kam} = \mathbf{R}^T \cdot \vec{n} \quad (6)$$

mit \vec{X}_M : Mittelpunkt im Objektkoordinatensystem

$\vec{X}_{M,kam}$: Mittelpunkt im Kamerakoordinatensystem

\vec{n}_{kam} : Normale im Kamerakoordinatensystem

Danach berechnet man die Projektion ins Bild:

$$\begin{aligned} x_{ell,kam} &= -c \cdot \frac{X_{M,kam} \cdot z_{M,kam} + R^2 \cdot n_{kam,x} \cdot n_{kam,z}}{z_{M,kam}^2 - R^2 \cdot (n_{kam,x}^2 + n_{kam,y}^2)} \\ y_{ell,kam} &= -c \cdot \frac{Y_{M,kam} \cdot z_{M,kam} + R^2 \cdot n_{kam,y} \cdot n_{kam,z}}{z_{M,kam}^2 - R^2 \cdot (n_{kam,x}^2 + n_{kam,y}^2)} \end{aligned} \quad (7)$$

mit R : Radius

$x_{ell,kam}, y_{ell,kam}$: Ellipsenmitte (Kamerakoord.-System)

Die Koordinaten des Ellipsenmittelpunktes im Bildkoordinatensystem ergeben sich durch Hauptpunktverschiebung:

$$\vec{x}_{ell} = \vec{x}_{ell,kam} + \vec{x}_H \quad (8)$$

Die Abbildungsexzentrizität $\vec{\varepsilon}$ ergibt sich als Differenz der errechneten Koordinaten mit dem Standardlochkameramodell und der Ellipsenmittelpunktkoordinaten:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{x}_P - \vec{x}_{ell} \quad (9)$$

3.1.3 Lochkameramodell für Kugeln

Für Kugeln eignet sich das Lochkameramodell von Liebold & Maas (2026b). Im ersten Schritt wird der Kugelmittelpunkt vom Objekt- ins Kamerakoordinatensystem transformiert:

$$\vec{X}_{M,kam} = \mathbf{R}^T \cdot (\vec{X}_M - \vec{X}_{ProjZ}) \quad (10)$$

Es folgt die Projektion ins Bild:

$$\begin{pmatrix} x_{ell,kam} \\ y_{ell,kam} \end{pmatrix} = -c \cdot \frac{z_{M,kam}}{z_{M,kam}^2 - R^2} \cdot \begin{pmatrix} X_{M,kam} \\ Y_{M,kam} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Der Ellipsenmittelpunktvektor im Bildkoordinatensystem bestimmt sich durch Hauptpunktverschiebung:

$$\vec{x}_{ell} = \vec{x}_{ell,kam} + \vec{x}_H \quad (12)$$

Die Abbildungsexzentrizität ergibt wieder sich als Differenz der errechneten Koordinaten mit dem Standardlochkameramodell und der Ellipsenmittelpunktkoordinaten:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{x}_p - \vec{x}_{ell} \quad (13)$$

3.1.4 Anwendung der Modelle zur Exzentrizitätskorrektur

Die angepassten Lochkameramodelle für Kugeln und Kreise lassen sich innerhalb eines räumlichen Rückwärtsschnitts oder einer Bündelblockausgleichung integrieren, indem sie statt des Standardlochkameramodells verwendet werden. Die Radien und die Normalen im Falle von Kreisen müssen jedoch bekannt sein und werden als konstante Werte im Modell eingeführt. Die Normalen der Kreismarken können z.B. bei ebenen Testfeldern oder koplanaren Markengruppen von mindestens drei Marken leicht beschafft werden.

Radien und ggf. Normalen können auch als Unbekannte in die Bündelblockausgleichung eingeführt werden. Dazu müssen allerdings weitere Messgrößen wie die Halbachsen eingebracht werden. Dazu sei auf (Liebold & Maas, 2026a), (Otepka & Fraser, 2004) bzw. (Liebold & Maas, 2026b) verwiesen.

3.2 Exzentrizitätskorrektur im Bildraum

Die zweite Korrekturstrategie erfolgt durch Anbringen eines Offsets an die gemessenen Ellipsenmittelpunkte. Als Abbildungsmodell verwendet man in diesem Fall das Standardlochkameramodell für Punkte bzw. die Kollinearitätsgleichungen.

3.2.1 Exzentrizitätskorrektur für Kreise

Wie in Kapitel 3.1.2. gezeigt wurde, lässt sich die Exzentrizität mit Kenntnis des Kreismittelpunktes, dessen Radius und dessen Normale sowie der inneren und äußeren Orientierung berechnen (Gln. 5-9). Die dadurch berechneten Werte aus Gl. 9 können als Korrektur an die gemessenen Bildkoordinaten angebracht werden. Sind bei einem räumlichen Rückwärtsschnitt bzw. im Bündelblock Parameter (Mittelpunkte, innere bzw. äußere Orientierungsparameter) unbekannt, können diese zunächst ohne Exzentrizitätskorrektur berechnet werden. Die Berechnung

erfolgt also iterativ. Die Radien und Normalen der Kreise müssen hingegen bekannt sein oder im Fall der Normalen berechenbar sein. Diese Methode eignet sich also z.B. für Gruppen von mindestens drei koplanaren Kreismarken oder ebene Testfelder, bei denen die Normalen leicht bestimmt werden können.

3.2.2 Exzentrizitätskorrektur mit konzentrischen Kreisen

Ein weiteres Verfahren zur Exzentrizitätskorrektur im Bildraum nach He et al. (2012) basiert auf Marken mit konzentrischer Kreisen, deren Radienverhältnis bekannt ist. Die korrigierten Bildkoordinaten lassen sich mit Hilfe der beiden gemessenen Ellipsenmittelpunkte berechnen:

$$\vec{x}_M \approx \vec{x}_{ell,1} + \frac{\vec{x}_{ell,2} - \vec{x}_{ell,1}}{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2} \quad (14)$$

mit \vec{x}_M : korrigierte Bildkoordinaten

$\vec{x}_{ell,1}$: Ellipsenmittelpunkt der 1. Ellipse

$\vec{x}_{ell,2}$: Ellipsenmittelpunkt der 2. Ellipse

$R_{1/2}$: Radius des 1. bzw. 2. Kreises

Abbildung 3 zeigt einen Bildausschnitt mit einer Doppelringmarke, bei der beide Ellipsen gemessen wurden. Das Beispiel zeigt einen Extremfall mit sehr großen Ellipsen (große Halbachse 291 px (innen), 585px (außen)), um den Effekt zu verdeutlichen und sichtbar zu machen. Die innere Ellipse und deren Mittelpunkt sind rot hervorgehoben, während die äußere Ellipse grün gekennzeichnet ist. Rechts ist eine Vergrößerung der inneren Marke dargestellt. Das blaue Kreuz zeigt den korrigierten Bildpunkt, der mit dem gedruckten schwarzen Kreuz übereinstimmt.

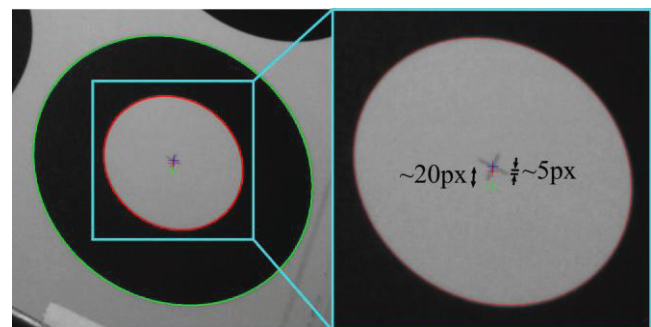


Abbildung 3 Exzentrizitätskorrektur mit konzentrischer Doppelringmarke. Die äußere Ellipse ist grün, die innere rot dargestellt. Rechts ist eine Vergrößerung der Marke dargestellt, in der der Mittelpunkt der äußeren Ellipse mit einem grünen Kreuz, das Zentrum der inneren Ellipse mit einem roten Kreuz und die korrigierten Koordinaten mit

einem blauen Kreuz eingezeichnet sind. Das blaue Kreuz stimmt mit dem gedruckten schwarzen Kreuz im Zentrum überein. Abbildung übernommen aus (Liebold & Maas, 2024).

Der Vorteil dieser Methode ist, dass keine Information über die Kreisnormale benötigt werden. Für schräge Visuren werden allerdings entsprechend große Markendurchmesser nötig, um eine ausreichende Auflösung zur Ellipsenmessung zu ermöglichen.

3.2.3 Exzentrizitätskorrektur für Kugeln im Bildraum

Bei kugelförmigen Anzielungen muss für eine Exzentrizitätskorrektur der Hauptpunktstand des Ellipsenzentrums verkürzt werden. Formel (15) beschreibt den Vorgang mit dem Korrekturfaktor f_{korr} :

$$\vec{x}_{korr} = \vec{x}_H + f_{korr} \cdot (\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H) \quad (15)$$

Für den Korrekturfaktor f_{korr} existieren verschiedene Möglichkeiten. Neukamm et al. (2010) nutzten Winkelbeziehungen zur Berechnung:

$$f_{korr} = \frac{c}{r_{ell}} \cdot \tan \frac{\arctan \frac{r_{ell}+a}{c} + \arctan \frac{r_{ell}-a}{c}}{2} \quad (16)$$

mit dem Hauptpunktstand des Ellipsenmittelpunktes $r_{ell} = \|\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H\|$

Weiterhin lässt sich der Korrektur mit Objektinformationen, also dem gegebenen Kugelradius R und der z-Koordinate des Kugelmittelpunktes im Kamerakoordinatensystem, beschreiben. Die Methode eignet sich, wenn die Halbachsen unbekannt sind oder nur ungenau bestimmt werden können:

$$f_{korr} = 1 - \frac{R^2}{z_{M,kam}^2} \quad (17)$$

Im Falle einer Bündelblockausgleichung oder eines räumlichen Rückwärtsschnitts kann die Korrektur iterativ angebracht werden, wenn die z-Koordinate unbekannt ist. In einer ersten Iteration kann diese ohne Exzentrizitätskorrektur berechnet werden.

Außerdem gibt es zwei Faktoren, in deren Berechnung beide Halbachsen einfließen, die aber nahe des Hauptpunkts

weniger stabil sind, sodass man (16) oder (17) bevorzugen sollte ((18) von Deng et al. (2015), (19) von Maalek & Lichti (2021)):

$$f_{korr} = 1 - \frac{a^2 - b^2}{r_{ell}^2} \quad (18)$$

mit b : kleine Halbachse

$$f_{korr} = 1 - \frac{1}{r_{ell}} \cdot \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{1 + \frac{c^2}{b^2}}} \quad (19)$$

Des Weiteren entwickelten Butzhammer et al. (2023) eine Näherungsformel für $R^2 \ll Z_{M,kam}^2$, die für hauptpunktnahe Kugeln stabiler ist als die beiden vorhergehenden Ansätze:

$$f_{korr} \approx 1 - \frac{b^2}{c^2} \quad (20)$$

Aufgrund der Stabilität empfehlen wir die Anwendung von Gl. 16 für eine bildseitige Korrektur. Lassen sich die Halbachsenlängen nur ungenau messen, bietet sich die iterative Methode mit Gl. 17 an.

4 Auswirkung und Abschätzung des systematischen Fehlers

4.1 Auswirkung der Exzentrizität im Bild

Mit Hilfe der Abbildungsmodelle für Kreise und Kugeln lassen sich verschiedene Szenarien simulieren. Für ebene Testfelder mit kreisförmigen bzw. kugelförmigen Anzielungen sind im Folgenden jeweils ein Beispiel für die Schräg- und die Frontalansicht gezeigt. Abbildung 4 zeigt den Fall der Schrägansicht für ein Testfeld mit 5 x 5 Kreismarken. Die Maße lassen aus Abbildung 4a entnehmen. Die angenommene Kamera hat eine Kamerakonstante von 12 mm mit 2048² px (Pixelgröße 5,5 μ m). In Abbildung 4b ist das entstehende Bild mit entsprechenden Bildellipsen und den Exzentrizitäten als Vektorfeld dargestellt. Die Pfeile zeigen eine klare Systematik in eine Richtung, was bei einem räumlichen Rückwärtsschnitt zu einem verfälschten Kippwinkel (Nicken) bzw. einer Verschiebung des Projektionszentrums führen kann.

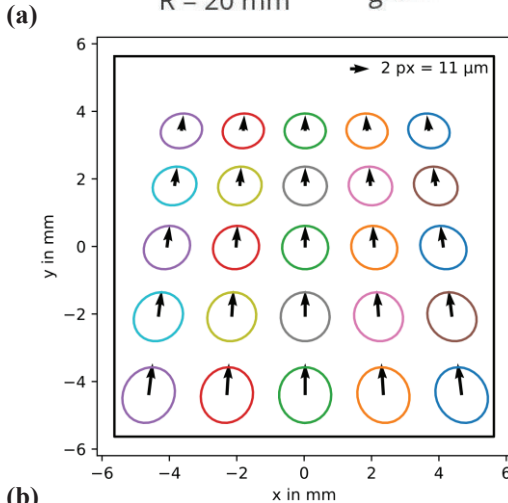
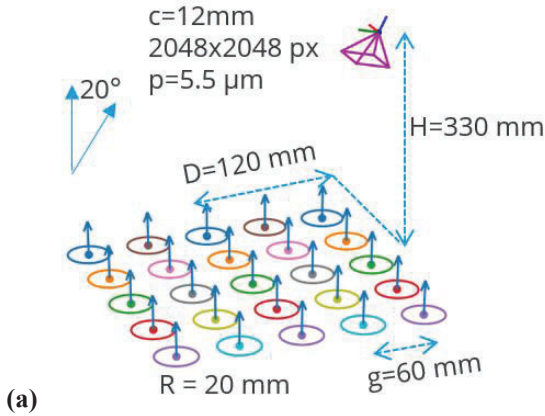


Abbildung 4 (a) Schräge Aufnahme eines ebenen Testfelds mit Kreismarken (Normalen als blaue Pfeile); **(b)** resultierendes Bild mit Bildellipsen und den Exzentrizitäten als Vektorfeld. Angepasste Abbildung aus Liebold & Maas (2024).

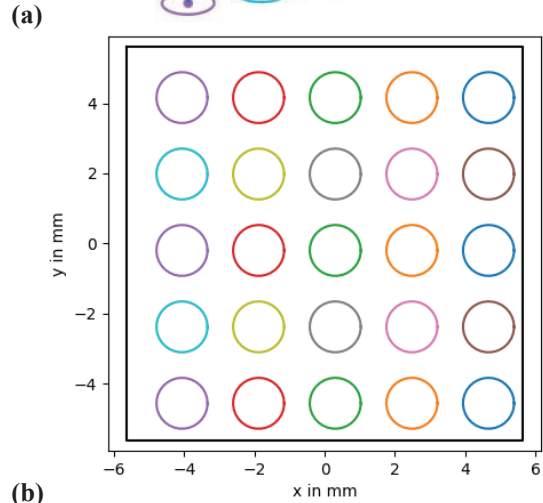
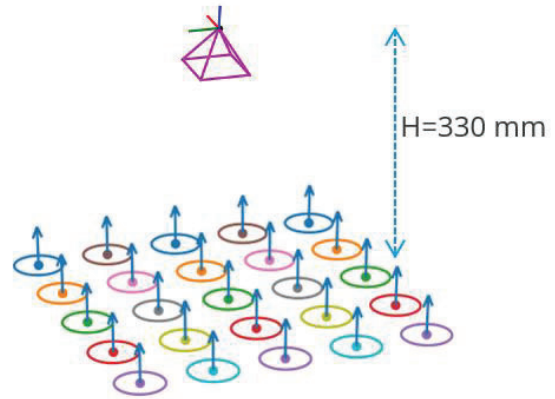


Abbildung 5 (a) Frontale Aufnahme eines ebenen Testfelds mit Kreismarken (Normalen als blaue Pfeile); **(b)** resultierendes Bild mit Bildkreisen, Exzentrizitäten treten hier nicht auf.

Hingegen zeigt Abbildung 5 den Fall für eine Frontalaufnahme, sodass die Marken als Kreise abgebildet werden und keine Exzentrizitäten auftreten. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen die Analyse für ein ebenes Kugelfestfeld. Hier treten für beide Ansichten, schräg wie auch frontal, Exzentrizitäten auf. Die Exzentrizitätsvektoren

zeigen Richtung Bildhauptpunkt und sind mit zunehmendem Abstand zum Hauptpunkt größer, im Hauptpunkt Null.

Dieser radial-symmetrische Effekt lässt eine starke Korrelation zur Kamerakonstante und der radial-symmetrischen Objektivverzeichnung vermuten.

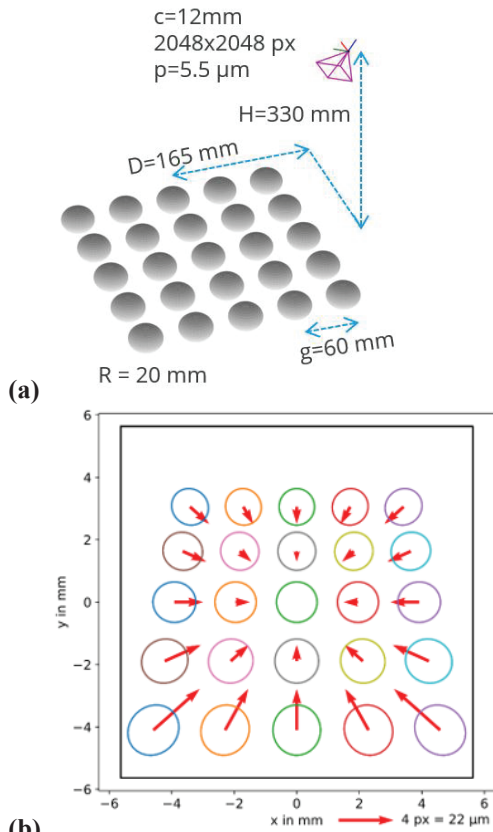


Abbildung 6 (a) Schräge Aufnahme eines ebenen Testfelds mit Kugeln; **(b)** resultierendes Bild mit Bildellipsen und den Exzentrizitäten als Vektorfeld (rote Pfeile). Angepasste Abbildung aus Liebold & Maas (2026b).

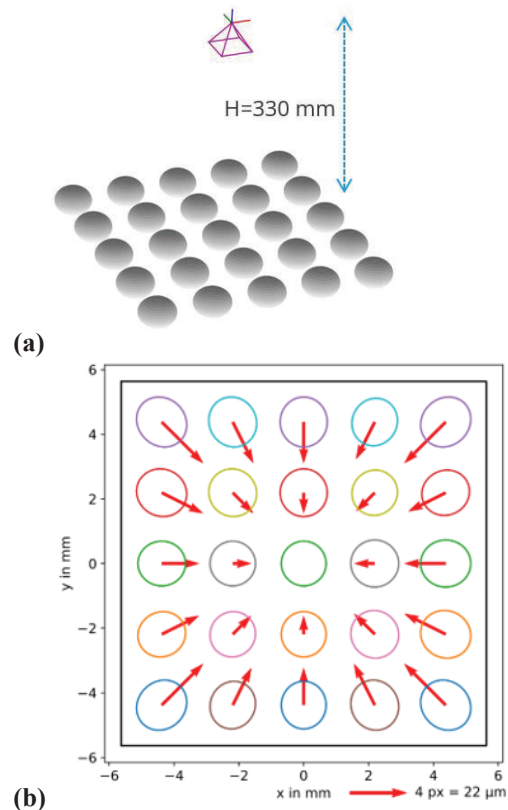


Abbildung 7 (a) Frontalaufnahme eines ebenen Testfelds mit Kugeln; **(b)** resultierendes Bild mit Bildellipsen und den Exzentrizitäten als Vektorfeld (rote Pfeile). Abbildung aus Liebold & Maas (2026b).

4.2 Betrag der Exzentrizität

Weiterhin existiert für Kreismarken folgende Näherungsformel (Liebold & Maas, 2026a), die für eine Abschätzung zu Hilfe genommen werden kann:

$$\vec{\varepsilon} \approx c \cdot \frac{R^2 \cdot n_{z,kam}}{Z_{M,kam}^2} \cdot \begin{pmatrix} n_{x,kam} \\ n_{y,kam} \end{pmatrix} \quad \text{für } R^2 \ll Z_{M,kam}^2 \quad (21)$$

Daraus lässt sich der Betrag ermitteln:

$$\|\vec{\varepsilon}\| \approx c \cdot \frac{R^2 \cdot \|n_{z,kam}\|}{Z_{M,kam}^2} \cdot \sqrt{n_{x,kam}^2 + n_{y,kam}^2} \quad (22)$$

Da $\|n_{z,kam}\| \leq 1$ und $n_{x,kam}^2 + n_{y,kam}^2 \leq 1$, gibt es eine obere Schranke:

$$\|\vec{\varepsilon}\| \leq c \cdot \frac{R^2}{Z_{M,kam}^2} \quad (23)$$

Ist der Radius und die z-Koordinate im Kamerakoordinaten-system für jede Marke in jedem Bild bekannt, kann also für jede Markenmessung ein Maximalfehler berechnet werden. Ist dieser deutlich kleiner als die Ellipsenmessgenauigkeit, kann man deren Einfluss ignorieren. Abbildung 8 zeigt Graphen für die obere Schranke für verschiedene Kamerakonstanten in Abhängigkeit vom Verhältnis des Radius zur z-Koordinate im Kamerakoordinatensystem. Da Gl. 23 die Normalrichtung nicht einbezieht, ist sie nur bedingt sinnvoll anwendbar. Bei Frontalaufnahmen großer Marken wäre die Exzentrizität Null und damit deutlich kleiner als der Wert aus Gl. 23. Ist die Normalenrichtung bekannt, ist also die exakte Berechnungsformel (Gln. 5-9) vorzuziehen.

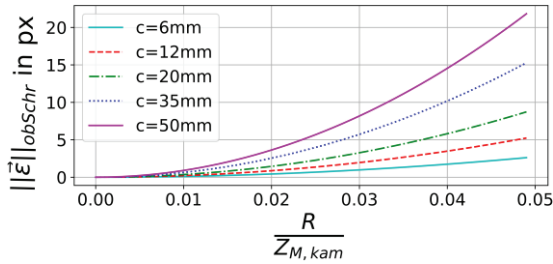


Abbildung 8 Obere Grenze für absolute Exzentrizität durch die Abbildungsexzentrizität bei Kreisen in Abhängigkeit vom Verhältnis des Radius zur z-Koordinate im Kamerakoordinatensystem (für Pixelgröße von 5,5 μm).

Für Kugeln lässt sich die Exzentrizität deutlich leichter aus den Gln. 13 und 15 ableiten:

$$\vec{\varepsilon} = -\frac{R^2}{Z_{M,kam}^2} \cdot (\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H) \quad (24)$$

Der Betrag der Exzentrizität ist dann:

$$\|\vec{\varepsilon}\| = \frac{R^2}{Z_{M,kam}^2} \cdot \|\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H\| \quad (25)$$

Auch hier kann man bei einem gegebenen Bildverband die Fehler berechnen und mit der Ellipsenmessgenauigkeit vergleichen und somit entscheiden, ob man die Exzentrizität ignorieren kann. Abbildung 9 zeigt den relativen Fehler bezüglich des Hauptpunktabstandes in Abhängigkeit des Verhältnisses vom Radius zur z-Koordinate im Kamerakoordinatensystem.

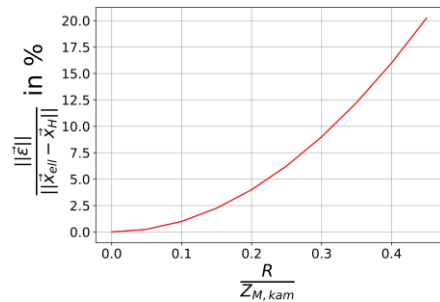


Abbildung 9 Relative Exzentrizität bezüglich des Hauptpunktabstandes durch die Abbildungsexzentrizität bei Kugeln in Abhängigkeit vom Verhältnis des Radius zur z-Koordinate (im Kamerakoordinatensystem).

Mit Hilfe der Näherungsformel (Gl. 20) lässt sich die Exzentrizität für Kugeln auch mit der kleinen Halbachse, also nur mit Bildmesswerten, ausdrücken:

$$\vec{\varepsilon} \approx -\frac{b^2}{c^2} \cdot (\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H) \quad \text{für } R^2 \ll Z_{M,kam}^2 \quad (26)$$

Der Betrag der Exzentrizität ist dann:

$$\|\vec{\varepsilon}\| \approx \frac{b^2}{c^2} \cdot \|\vec{x}_{ell} - \vec{x}_H\| \quad \text{für } R^2 \ll Z_{M,kam}^2 \quad (27)$$

Der relative Fehler bezüglich des Hauptpunktabstandes lässt sich für verschiedene Kamerakonstanten graphisch darstellen, siehe Abbildung 10.

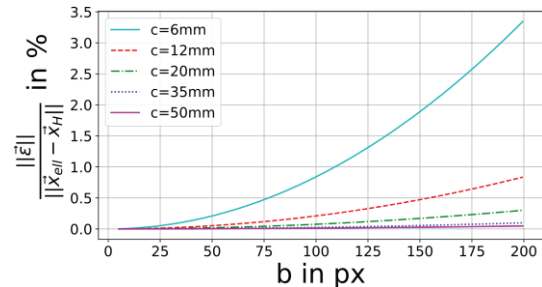


Abbildung 10 Relative Exzentrizität bezüglich des Hauptpunktabstandes durch die Abbildungsexzentrizität bei Kugeln in Abhängigkeit vom Verhältnis der kleinen Halbachse zur Kamerakonstante (für Pixelgröße von 5,5 μm).

4.3 Auswirkung auf die Bündelblockausgleichung

Eine weitere Strategie zur Bestimmung der Auswirkung der Exzentrizität im Bündelblock ist im Schema in Abbildung 11 dargestellt.

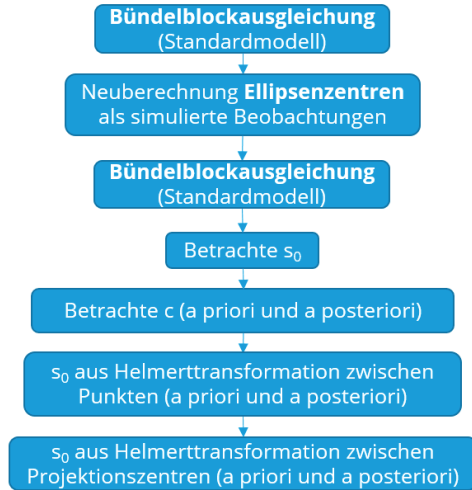


Abbildung 11 Schema zur Berechnung der Auswirkung des systematischen Fehlers der Exzentrizität.

Zunächst nutzt man die mit dem Standardlochkameramodell berechneten Parameter (Parameter der inneren und äußeren Orientierung sowie Mittelpunkte, Radien und für Kreise Normalen) aus einer bestehenden Bündelblockausgleichung und berechnet damit simulierte Beobachtungen (Ellipsenzentren) mit dem Abbildungsmodell aus dem Kapitel 3.1.2 (für Kreise) bzw.

3.1.3. (für Kugeln). Man kann dann dabei die Verzeichnungsparameter initial auf null setzen.

Dann berechnet man die Bündelblockausgleichung erneut mit den soeben simulierten Beobachtungen statt den gemessenen. Durch die Diskrepanz zwischen Standardlochkameramodell (für Punkte) und dem Abbildungsmodell für Kreise bzw. Kugeln entstehen nun Abweichungen zwischen Initialwerten und den ausgeglichenen Parametern.

Die Abweichungen können durch folgende Größen verglichen werden:

- Standardabweichung der Gewichtseinheit $s_{0,BBA}$ aus der Ausgleichung, die die Auswirkung auf den Modellfehler zeigt.
- Standardabweichung der Gewichtseinheit $s_{0,H-M}$ aus der Parameterbestimmung einer Ähnlichkeitstransformation als Ausgleichung zwischen den a priori und a posteriori Mittelpunkten zum Feststellen der Auswirkung auf die Kreis-/Kugelmittelpunkte,
- Standardabweichung der Gewichtseinheit $s_{0,H-PZ}$ aus der Parameterbestimmung einer Ähnlichkeitstransformation als Ausgleichung zwischen den a priori und a posteriori Projektionszentren zum Feststellen der Auswirkung auf die äußere Orientierung,
- Differenz der a priori und a posteriori Kamerakonstante c zum Feststellen der Auswirkung auf die innere Orientierung.

Auf Basis der aufgelisteten Größen kann entschieden werden, ob der systematische Fehler relevant im Vergleich zu den zu erwartbaren Genauigkeiten ist.

Im Folgenden ist die Vorgehensweise für Beispiele mit ebenen Testfeldern dargestellt. In Abbildung 12 wird die Analyse für einen Bildverband (4 rotierte Frontalaufnahmen + 8 Schrägaufnahmen) für ein 4 x 3-Doppelringmarkentestfeld gezeigt. Im Beispiel liegen Exzentrizitäten von bis zu 6 px für die inneren Ringe und 23 px für die äußeren Ringe vor. Die Balkendiagramme enthalten die vier vorgeschlagenen Größen zur Beurteilung der Auswirkung der Exzentrizität. In der ersten Zeile wurden die Werte mit den Innenringen ($R=15\text{mm}$, rot) berechnet, in der zweiten Zeile mit den doppelt so großen Außenringen ($R=30\text{mm}$, grün). Die Standardabweichungen sind wie erwartet für die Außenringe deutlich größer (Faktor 4-5). Die a posteriori Kamerakonstanten sind kleiner als der a priori Wert von 12 mm (gestrichelt). Der systematische Fehler wirkt sich kaum auf Mittelpunkte aus, sondern eher auf die innere und äußere Orientierung.

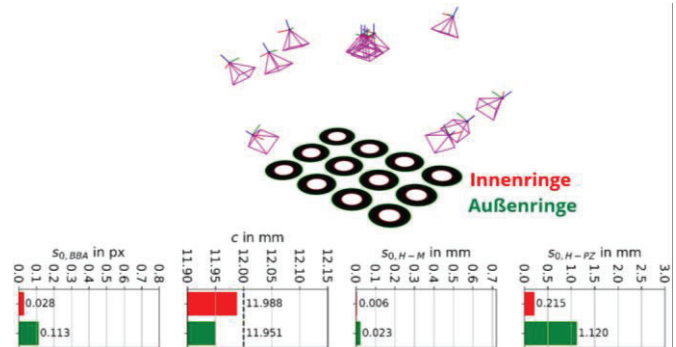


Abbildung 12 Bildverband eines ebenen Testfeldes mit 12 gleichgroßen Doppelringmarken, darunter Balkendiagramme mit Größen zur Auswirkung der Exzentrizität. Angepasste Abbildung nach Liebold & Maas (2026a).

Das Verhalten ändert sich deutlich, wenn kleinere Marken hinzugefügt werden. Im Testfeld von Abbildung 13 sind zusätzlich 8 kleinere Marken enthalten (3 mm Innenring-radius, 6mm Außenringradius). Der Modellfehler $s_{0,BBA}$ ist siebenmal größer als im Beispiel davor und die a posteriori Kamerakonstante wird nun zu groß bestimmt. Es zeigt sich nun auch ein deutlicher Effekt auf die Mittelpunkte mit $s_{0,H-M}$ von 0,16 mm bzw. 0,64 mm. Der Effekt auf die Projektionszentren ($s_{0,H-PZ}$) ist weiterhin am größten.

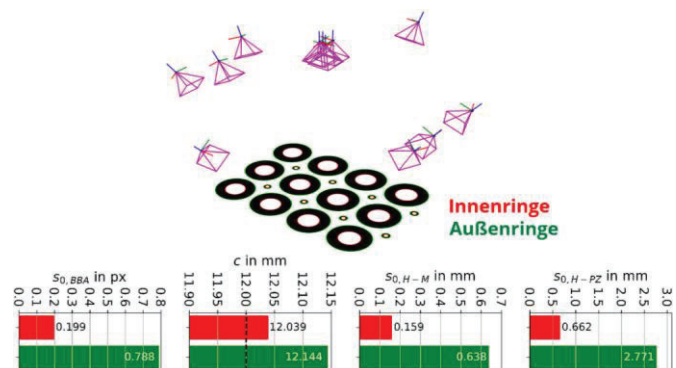


Abbildung 13 Bildverband eines ebenen Testfeldes mit 12 großen und 8 kleinen Doppelringmarken, darunter Balkendiagramme mit Größen zur Auswirkung der Exzentrizität. Angepasste Abbildung nach Liebold & Maas (2026a).

Das Vorgehen wurde auch auf ein Kugeltestfeld angewandt, siehe Abbildung 14. Im ersten Fall (rot eingerahmt) wurden 5 x 5 Kugeln mit 38 mm bzw. 40 mm Durchmesser verwendet, im erweiterten Fall (grün eingerahmt) wurden 16 weitere kleinere Kugeln mit 4 mm Durchmesser hinzugefügt. Es ergeben sich Exzentrizitäten von bis zu 4 px. Auch hier wurden 12 Bilder aufgenommen wie im Beispiel mit den Kreismarken. Die Modellfehler sind 0,02 mm für die etwa gleichgroßen Kugeln und 0,22 mm

(zehnfach größer) für den Fall mit den unterschiedlich großen Kugeln. Die ausgeglichenen Kamerakonstanten sind in beiden Fällen kleiner als der initiale Wert von 12 mm. Die Mittelpunkte werden im rot eingerahmten Fall kaum beeinflusst, im grün eingerahmten Fall ist die Restabweichung vierfach größer. Der Effekt wirkt sich stärker auf die Projektionszentren aus, aber deutlich weniger als bei den Kreisen. Die Vergrößerung des $s_{0,H-PZ}$ ist bei Hinzunahme der 16 kleinen Kugeln auch deutlich geringer als bei $s_{0,H-M}$.

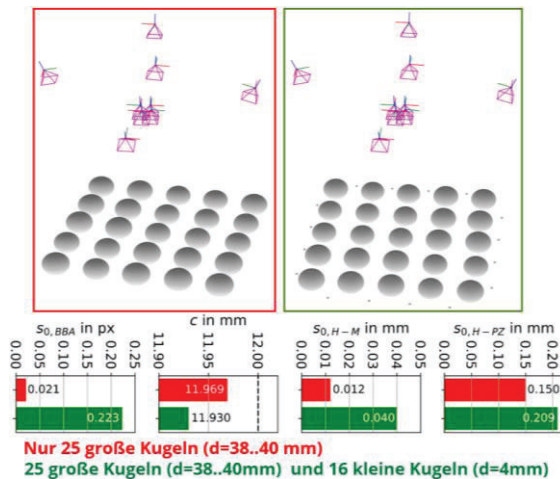


Abbildung 14 Bildverband für ebene Testfelder mit Kugeln: 5x5 etwas gleichgroße Kugeln (rot eingerahmt) und mit zusätzlich 16 kleineren Kugeln (grün eingerahmt). Balkendiagramme mit Größen zur Auswirkung der Exzentrizität. Angepasste Abbildung nach Liebold & Maas (2026b).

5 Fazit

Der Artikel zeigt Auswirkungen und Korrekturmethode für die Exzentrizität bei der photogrammetrischen Messung von kreis- und kugelförmigen Messmarken. Die Exzentrizität kann im Extremfall mehrere Pixel betragen. Die Systematiken unterscheiden sich zwischen Kreisen und Kugeln. Bei ebenen Testfeldern sind die Exzentrizitätsvektoren bei Kreisen nahezu parallel, bei Kugeln zeigen sie Richtung Bildhauptpunkt. Bei Nichtbeachtung wirkt sich der systematische Effekt bei ebenen Testfeldern vorwiegend auf die innere und äußere Orientierung aus. Das Verhalten bei unterschiedlich großen Marken ist deutlich anders als bei gleich großen. Die Korrekturen können als Offset an die gemessenen Bildkoordinaten angebracht werden oder im Abbildungsmodell berücksichtigt werden. Es wurden Verfahren zur Abschätzung der Auswirkung der systematischen Fehler bei Nichtbeachtung gezeigt, die

genutzt werden können, um die Relevanz für Korrekturen im konkreten Fall festzustellen.

6 Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert (SFB/TRR 280, Projektnummer: 417002380).

Literaturverzeichnis

- Ahn, S. J., Warnecke H.-J., & Kotowski R. (1999). Systematic geometric image measurement errors of circular object targets: mathematical formulation and correction. *Photogramm. Rec.*, 16(93), 485-502. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00138>
- Andresen, K. (1991). Ermittlung von Raumelementen aus Kanten im Bild. *ZPF*, 59(6), 212-220.
- Butzhammer, L., Braun, M., & Hausotte, T. (2023). CT scan trajectory calibration based on projected metal spheres: When and how should errors from elliptical distortion be corrected? *e-Journal of Nondestructive Testing*, 28(3). <https://doi.org/10.58286/27730>
- Clackdoyle R., & Mennessier, C. (2011). Centers and centroids of the cone-beam projection of a ball. *Physics in Medicine & Biology* 56. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/23/003>
- Deng, L., Xi, X., Li, L., Han Y., & Yan, B. (2015). A method to determine the detector locations of the cone-beam projection of the balls' centers. *Phys. Med. & Biol.*, 60(24). <https://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/60/24/9295>
- Dold, J. (1996). Influence of Target Size on the Results of Photogrammetric Bundle Adjustment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 31(B5), 119-123.
- He, D., Liu, X., Yin, Y., Li, A., & Peng X. (2012). Correction of circular center deviation in perspective projection. *Proceedings of SPIE 8499: Applications of Digital Image Processing* 35, 625-631, <https://doi.org/10.1117/12.928171>
- Liebold, F., & Maas, H.-G. (2024). Eccentricity Correction Methods for Circular Targets in Perspective Projection. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 48-2/W7, 65-72, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W7-2024-65-2024>
- Liebold, F., & Maas, H.-G. (2026a). Eccentricity Correction Methods for Circular Targets in Perspective Projection. *Metrology* 6(2), <https://doi.org/10.3390/metrology6020028>
- Liebold, F., & Maas, H.-G. (2026b). Spherical target eccentricity correction in photogrammetric applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 231, 761-777. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.11.022>

- Luhmann, T. (2014). Eccentricity in images of circular and spherical targets and its impact on spatial intersection. *Photogramm. Rec.*, 29(148), 417-433. <https://doi.org/10.1111/phor.12084>
- Maalek, R., & Lichti, D. (2021). Correcting the Eccentricity Error of Projected Spherical Objects in Perspective Cameras. *Remote Sens.*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/rs13163269>
- Matsuoka R., & Maruyama S. (2016). Eccentricity on an image caused by projection of a circle and a sphere. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 3(5), 19-26. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-5-19-2016>
- Neukamm, M., Schulze, M., & Staude, A. (2010). Untersuchung der geometrischen Eigenschaften industrieller CT mit Hilfe eines neuartigen Prüfkörpers und den Methoden der Photogrammetrie. Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2010 - Di.2.A.2, Erfurt.
- Otepka, J., O., & Fraser, C., S. (2004). Accuracy Enhancement of Vision Metrology Through Automatic Target Plane Determination. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 35-B5, 873-879.
- Wrobel, B., P. (2012). Kreismarken in perspektiver Abbildung – im Bild und im Bündelblock. *PFG – Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2012(3), 221–236. <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2012/0113>

Erweiterung des klassischen Lochkameramodells für die Verwendung von Ultra-Weitwinkelobjektiven bei der 3D-Rekonstruktion

Christian Bräuer-Burchardt¹, Christoph Freitag¹, Roland Ramm¹, Matthias Heinze¹, Christoph Munkelt¹, Peter Kühmstedt¹ & Gunther Notni^{1,2}

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein neues Kalibrierkonzept für fotogrammetrische Stereo-Sensoren mit Weitwinkelobjektiven vorgestellt, bei dem das klassische Lochkameramodell nicht mehr ausreichend für eine adäquate Genauigkeit der dreidimensionalen Rekonstruktionsergebnisse ist. Dabei wird ein Ansatz vorgestellt, der die Kamerakonstante als variable Größe in Abhängigkeit von der radialen Entfernung vom Bildhauptpunkt modelliert. Es wird ein praktikables Kalibrierverfahren vorgestellt, das eine initiale Kalibrierung auf Grundlage des Lochkameramodells erweitert und iterativ optimiert. Es werden experimentell gewonnene mit solchen auf herkömmlicher Weise erzielten Messergebnissen verglichen. Erste Untersuchungen ergaben eine Reduzierung des systematischen Messfehlers um den Faktor anderthalb bis zwei. Es werden Verbesserungsmöglichkeiten des Verfahrens diskutiert.

Schlagwörter Kameramodellierung · 3D-Rekonstruktion · Weitwinkelobjektive · Kamerakalibrierung

1 Einführung

Die dreidimensionale Oberflächenerfassung verschiedenster Objekte mittels optischer Stereo-Sensoren kann je nach Auslegung des Systems mit sehr hoher Messgenauigkeit erfolgen. Neben dem Ziel der Entwicklung immer genauerer Messsysteme für unterschiedlichste Anwendungsgebiete besteht auch der Wunsch, die 3D-Messsysteme immer universeller und kostengünstiger zu gestalten. Mit Verwendung von Weitwinkelobjektiven kann auf kurzer Messentfernung ein großes Messvolumen realisiert werden. Neben den Vorteilen eines geringen Platzbedarfes bestehen jedoch auch bestimmte Einschränkungen. Aufgrund der geringen Objektauflösung ist sowohl eine geringere absolute Messgenauigkeit zu erwarten als auch ein höheres Messrauschen zu vermuten.

Ein weiterer Aspekt, der häufig zum Ausschluss führt, ist die Eigenschaft der Weitwinkelobjektive, außerhalb der Bildmitte stark zu verzeichnen. Diese Verzeichnungen können dann gut kompensiert werden, wenn sich das Messobjekt annähernd in einer Ebene befindet. Besitzt die Messtiefe jedoch eine große Variation, so führt diese Objektiveneigenschaft dazu, dass große systematische Messfehler im Messvolumen auftreten. Dies bedeutet, dass die rechnerisch ermittelte Position eines 3D-Punktes im Weltkoordinatensystem nicht seiner tatsächlichen Position

entspricht. Da diese Fehler typischerweise über das Messvolumen stark variieren, kommt es insbesondere bei Längenmessungen zu großen (systematischen) Messfehlern.

Aufgrund dieser Eigenschaften arbeiten kommerziellen optischen 3D-Scanner kaum auf Weitwinkelbasis. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass unter Verwendung des klassischen Lochkameramodells häufig gar keine valide Kalibrierung eines solchen Scanner-Systems erreichen lässt. Um diesen Umstand zu beenden und die Möglichkeit der Realisierung eines Weitwinkel-Scanner-Systems zu schaffen, wird der Ansatz eines erweiterten Kameramodells verfolgt. Dabei wird nicht wie beim klassischen Lochkameramodell angenommen, dass alle Sehstrahlen durch ein singuläres Projektionszentrum verlaufen. Vielmehr werden sowohl das Projektionszentrum als auch die Kamerakonstante als variable Größen betrachtet. Zur Vereinfachung wird jedoch angenommen, dass diese Größen lediglich vom Abstand zum Bildhauptpunkt abhängen, das heißt, radialsymmetrisch wirken.

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Möglichkeiten der Kameramodellierung untersucht. Neben dem klassischen Lochkameramodell, das sich als Standard für optische 3D-Messsysteme ergeben hat, lassen sich die typischerweise verwendeten Kameras am besten durch das allgemeine strahlbasierte Kameramodell beschreiben.

¹ Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena, Deutschland, E-Mail: [vorname.name]@iof.fraunhofer.de

² Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau, Deutschland; E-Mail: gunther.notni@tu-ilmenau.de

Dieses Modell kann jede beliebige 3D-2D-Abbildung, die durch optische Abbildungen entstehen und bei denen ein geradliniger Sehstrahlverlauf angenommen wird, beschreiben. Aufgrund seiner Universalität besitzt dieses Modell jedoch auch einige Nachteile. Erstens ist es schwierig, eine Kamera entsprechend dieses Modells exakt zu kalibrieren. Dies liegt daran, dass zu jedem Bildpunkt auf dem Kamerachip der entsprechende Strahl im 3D-Objektraum gefunden und exakt beschrieben werden muss. Dazu sind sowohl aufwändiges Equipment als auch qualifiziertes Fachpersonal notwendig.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst verschiedene Möglichkeiten der Kameramodellierung vorgestellt und auf Vor- und Nachteile eingegangen. Dann wird ein neuer Ansatz zur Erweiterung des Lochkameramodells vorgestellt und beschrieben, wie damit ein Setup mit Ultra-Weitwinkelobjektiven aufgebaut wurde und welche Messergebnisse damit im Vergleich zu herkömmlicher Kalibrierung erzielt wurden. Es werden das Potenzial des neuen Modellieransatzes diskutiert und Ausblicke für zukünftige weiterführende Entwicklungen gegeben.

2 Kamera-Modellierungen für optische 3D-Sensoren

Die geometrische Kameramodellierung ist Grundlage der klassischen Fotogrammetrie, bei der aus Fotografien 3D-Messdaten gewonnen werden. Im Verlauf der Geschichte hat es dabei die verschiedensten Entwicklungen der Kameramodellierung und Bereitstellung entsprechender Kalibrierverfahren gegeben (siehe z. B. Brown 1971, Remondino & Fraser 1992, Sturm et al. 2010, Luhmann et al. 2023). Als für die 3D-Rekonstruktion am besten geeignet hat sich das bekannte Lochkameramodell herausgestellt.

Im Folgenden werden eine kurze Erläuterung der Vor- und Nachteile des Lochkameramodells und des allgemeinen strahlbasierten Kameramodells und die Vorstellung eines Ansatzes zur Erweiterung des Lochkameramodells und eines entsprechenden Kalibrierverfahrens gegeben.

2.1 Klassisches Lochkameramodell

In der Stereo-Fotogrammetrie wird am häufigsten das klassische Lochkameramodell verwendet (siehe z. B. Luhmann et al. 2023). Zusammen mit sogenannten Verzeichnungsfunktionen (von Gioi et al. 2010) liefert es in der Regel für die meisten Anwendungsfälle gute 3D-Messgenauigkeiten. Besteht jedoch die Notwendigkeit eines sehr großen Bildwinkels, z. B. wegen wenig verfügbaren

Platzes oder sehr großer Messobjekte, und sollen Weitwinkelobjektive eingesetzt werden, dann kommen 3D-Stereo-Scanner schnell an ihre Grenzen, was ihre Messgenauigkeit angeht. Ursache hierfür ist, dass die Modellierung des Verlaufs aller Sehstrahlen durch ein singuläres Projektionszentrum nicht den tatsächlichen Verlauf der Strahlen beschreiben. Abbildung 1 zeigt schematisch den Verlauf eines Sehstrahls. Für bestimmte Ebenen im Objektraum lassen sich die Abweichungen durch radialsymmetrische Verzeichnungsfunktionen beschreiben und bei der 3D-Punktberechnung entsprechend korrigieren. Bei großen Messtiefen und bei Weitwinkel-Optiken sind die Unterschiede dieser Abweichungen in unterschiedlichen Entfernungen nicht mehr vernachlässigbar. Um sie zu kompensieren, müssen die Verzeichnungsfunktionen entfernungsabhängig wirken (Magill 1955, Fraser & Shortis 1992).

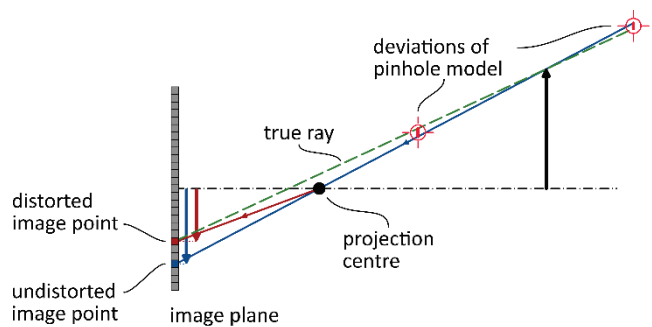


Abbildung 1 Tatsächlicher Sehstrahlverlauf

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für entfernungsabhängige Verzeichnungsfunktionen eines Weitwinkelobjektivs für unterschiedliche Entfernungen im Messvolumen.

Die Beschaffung der entfernungsabhängigen Verzeichnungsfunktionen machen den Kalibrierprozess wesentlich aufwändiger und fehleranfälliger und auch bei der 3D-Punktberechnung wird eine aufwändigere Vorgehensweise notwendig.

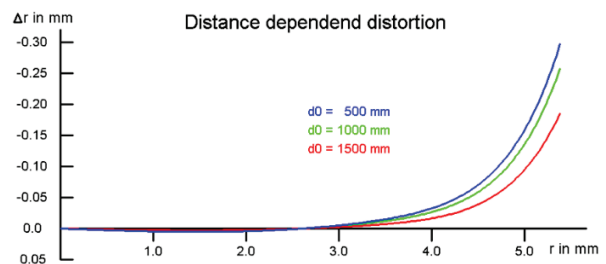


Abbildung 2 Entfernungsabhängige radialsymmetrische Verzeichnungsfunktionen (simuliert)

2.2 Strahlbasiertes Kameramodell

Mit dem strahlbasierten oder generischen Kameramodell (siehe z. B. Sturm & Ramalingam 2004) lassen sich alle möglichen Kameras beschreiben, bei denen der Strahlverlauf im Objektraum als geradlinig angenommen wird. Jedem Kamerabildpunkt (Pixel) wird ein Strahl im Objektraum zugeordnet. Damit kann wie beim Lochkameramodell mit einem Stereo-Kamerapaar und der Kenntnis korrespondierender Bildpunkte durch einen Strahlschnitt ein 3D-Objektpunkt rekonstruiert werden. Der Vorteil des strahlbasierten Modells ist, dass die Sehstrahlen beliebig genau beschrieben werden können und somit theoretisch keine Korrekturen bei der 3D-Punktberechnung vorgenommen werden müssen. Der Nachteil ist, dass eine qualitativ gute Kalibrierung einen wesentlich höheren Aufwand erfordert und keine kommerzielle Software für die 3D-Punktberechnung zur Verfügung steht. Der Umstieg vom Lochkamera- auf das strahlbasierte Kameramodell lohnt sich insbesondere bei kurzbreitweitigen Setups sowie bei hohen Präzisionsanforderungen über große Objektiefen, auch wenn die begrenzte Langzeitstabilität der Kameras häufigere Kalibrierungen erforderlich macht.

Eine erfolgreiche Implementierung des strahlbasierten Kameramodells und ein entsprechendes Kalibrierungsverfahren werden in (Bräuer-Burchardt et al. 2022) beschrieben. Die Vorteile des Verfahrens sind die Reduzierung des systematischen Messfehlers um den Faktor vier bei Verwendung von Weitwinkelobjektiven. Nachteile sind das aufwändigere Kalibrierungsverfahren und die signifikante Erhöhung der Rechenzeit.

Methoden für die Implementierung auf Grundlage des strahlbasierten Kameramodells stellen u. a. Grossberg & Nayar (2001) oder Sturm & Ramalingam (2004) vor.

2.3 Lösungsansatz zur Erweiterung des Lochkameramodells

Bei der Analyse der Messgüte von 3D-Stereo-Systemen fällt auf, dass von den Funktionen zur Kompensation der Messfehler die radialsymmetrischen Funktionen den größten Anteil haben. Häufig ist der durch sie kompensierte Fehler um eine ganze Größenordnung höher als alle restlichen, durch nichtradiale Verzeichnungsfunktionen beschriebene Fehler. Daher wurde nach einer Möglichkeit gesucht, für diese radialsymmetrischen Verzeichnungsfunktionen einen Ansatz zu finden, der die Fehler entsprechend ihrer entfernungsabhängigen Ausprägung mittels einer einzigen Funktion korrigiert. Dieser Ansatz besteht in der variablen Modellierung der Parameter

„Projektionszentrum“ und „Kamerakonstante“ (siehe Abb. 3) der klassischen Lochkameramodellierung und ersetzt damit die Schar entfernungsabhängiger Verzeichnungsfunktionen. Ein weiterer Vorteil dieses Ansatzes sollte es sein, dass er direkt in den Kalibrierprozess des Bündelblockausgleichs eingebunden werden kann.

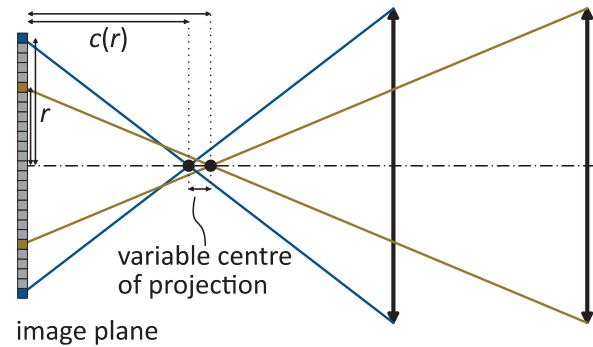


Abbildung 3 Sehstrahlverlauf

3 Erweitertes Lochkameramodell

Im Folgenden erfolgen die Beschreibung des erweiterten Lochkameramodells, die Vorstellung eines Kalibrierungsverfahrens und die Beschreibung des 3D-Berechnungsverfahrens.

3.1 Formale Beschreibung

Ausgehend vom klassischen Lochkameramodell mit den intrinsischen Parametern Kamerakonstante, Bildhauptpunkt und Verzeichnungsfunktionen sowie den extrinsischen Parametern der Position (Projektionszentrum) und Orientierung (Neigung, Schwenkung, Drehung) im Weltkoordinatensystem wird die Kamerakonstante als radiale Funktion $c(r)$ des Abstandes r der Bildpunkte vom Hauptpunkt und das Projektionszentrum als Punkt auf der optischen Achse der Kamera definiert. Dies entspricht dem axialen Kameramodell, das z. B. von Ramalingam et al. (2006) beschrieben wurde.

3.2 Kalibrierverfahren

Zur Kalibrierung nach dem erweiterten Lochkameramodell wird folgendes Verfahren vorgeschlagen. Wie bei der klassischen Kalibrierung wird ein gängiges Kalibrieremuster (z. B. Schachbrettmuster, Punkt- oder Gittermuster, ArUco-Markerplatte) in unterschiedlichen Positionen und Entfernungen im Messvolumen vom Stereo-Kamerapaar aufgenommen. In einem Vorverarbeitungsschritt werden die Kalibrierpunkte in allen Bildpaaren extrahiert. Diese dienen als Input für die eigentliche Kalibrierprozedur. Unter

Verwendung einer kommerziellen Software (Bingo 2006) wird zunächst eine Kalibrierung zur Bestimmung der klassischen Parameter auf Grundlage des Lochkameramodells durchgeführt. Aus der initialen Kamerakonstante c_0 und der Summe radialsymmetrischer Verzeichnungsfunktionen $f(r) = \Delta r$ wird im nächsten Schritt eine Startlösung für das Polynom $c(r)$ bestimmt. Dabei wird von einer mittleren Referenzentfernung d_0 der Kalibrierpunkte ausgegangen und angenommen, dass der bestimmte Kalibrierdatensatz für diese Referenzentfernung die optimalen Werte liefert. Unter dieser Annahme, können aus c_0 , d_0 und $f(r)$ Startwerte für $c(r_i)$ entsprechend

$$c(r_i) = \frac{c_0 r_i (c_0 + d_0)}{d_0 (r_i - \Delta r_i) + c_0 r_i} \quad (1)$$

für ausgewählte Werte r_i von r bestimmt werden. Aus den berechneten Stützstellenwerten $c(r_i)$ wird ein Polynom P n -ten Grades mit Koeffizienten a_k angepasst:

$$c(r) = P = \sum_{k=0}^n a_k r^k.$$

Dieses Polynom wird unter Verwendung von Längenmessungen zwischen ausgewählten Messpunkten auf der Markerplatte mittels Minimierung der Testgröße T entsprechend

$$T = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (L_{ki}(pp) - L_{kj}(pp))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

optimiert, wobei die L_k Messungen gleicher Längen in den Entfernungen i und j von m Punktepaaren pp sind. Das heißt, bei der Optimierung wird ausgenutzt, dass die Abstände von Paaren rekonstruierter 3D-Kalibrierpunkte in allen Messentfernungen gleich sein müssen.

3.3 3D-Punktberechnung

Das Verfahren zur Berechnung der 3D-Messpunkte hängt davon ab, ob die Zuordnung korrespondierender Bildpunkte in den beiden Stereo-Bildpaaren durch explizite Punktlokalisierung beider Bildpunkte (üblich bei Verwendung gekreuzter Streifenmuster) oder unter Verwendung der Epipolargeometrie (Luhmann et al. 2023) erfolgt. Im ersten Fall erfolgt die 3D-Punktberechnung durch klassischen Strahlschnitt. Im zweiten Fall ist zu beachten, dass aufgrund der erweiterten Modellierung die Epipolarlinien keine Geraden mehr sind, sondern wegen der variablen Position des Strahldurchgangs durch die optische Achse der Kamera vielmehr zu Kurven werden (Abb. 4). Die Korrespondenzfindung erfolgt daher in zwei Schritten.

Zunächst wird der Punkt auf einer approximierten Epipolargeraden gesucht. Im zweiten Schritt wird seine Position entsprechend der durch die Kalibrierung bekannten Form der Epipolarlinie in der Bildebene korrigiert. Auf dem korrigierten Epipolarlinienssegment erfolgt eine erneute Suche, um den korrespondierenden Punkt in der sekundären Kamera mit höherer Genauigkeit zu finden.

Mit der korrigierten berechneten Position und den variablen Werten für die Kamerakonstanten erfolgt der Strahlschnitt in üblicher Weise.

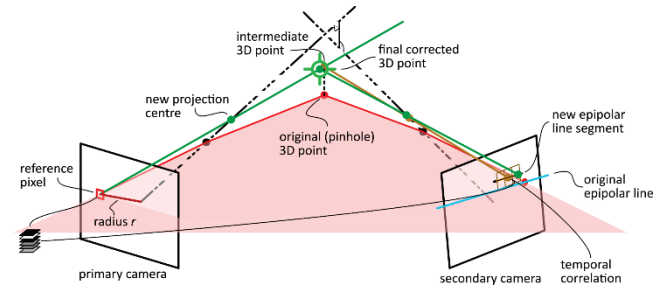


Abbildung 4 Schema der iterativen 3D-Punktberechnung unter Verwendung der initialen Epipolargeometrie

4 Experimente und Ergebnisse

Zur Evaluierung des Verfahrens wurde ein Setup eines Stereo-Kamerasystems (Abb. 5) zusammen mit einer Projektionseinheit zur Generierung strukturierter Lichtmuster auf die Messobjekte als Laboraufbau realisiert. Es wurden zwei 4,7 mm Weitwinkelobjektive (Kowa 4.7 mm/F2.4) an Kameras des Typs FLIR Blackfly S BFS-U3-20S4C montiert.

Die initiale Kalibrierung wurde gemäß dem in 3.2 beschriebenen Verfahren unter Verwendung einer ArUco-Markerplatte (Abb. 5) und der Kalibriersoftware BINGO (Bingo 2026) durchgeführt. Im ersten Schritt wurde eine initiale Funktion für die variable Kamerakonstante aus den Parametern der Verzeichnungsfunktionen und der Kamerakonstanten gemäß (1) ermittelt.

Anschließend erfolgte die Optimierung der Polynome $c_1(r)$ und $c_2(r)$ für jede der beiden Kameras entsprechend (2).

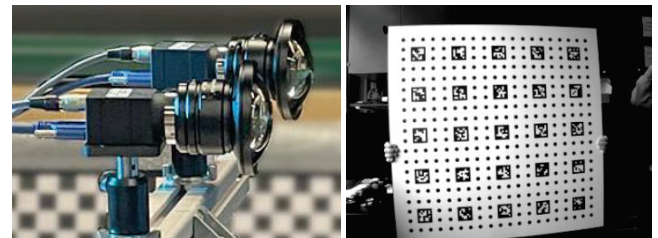


Abbildung 6 Stereo-Kamera-Setup mit 4,7mm-Objektiven (links) und ArUco-Markerplatte (rechts)

4.1 Evaluierung

Für die Evaluierung des Verfahrens wurden Aufnahmen von Referenzmesskörpern Kugelstab und Ebenen-Normal (siehe Abb. 6) in unterschiedlichen Positionen des Messvolumens in Anlehnung an die ISO-Norm 10360-13 (ISO 2021). Zur Erhöhung der Messgenauigkeit und der Anzahl valider 3D-Messpunkte wurde die Oberfläche der Referenzmesskörper mit strukturierten Streifenmustern mittels eines Projektors der Firma Optoma beleuchtet.

Die Berechnung der 3D-Messdaten erfolgte zum einen auf klassische Weise unter Verwendung des initial generierten Kalibrierdatensatzes und der herkömmlichen Berechnungsmethode. Diese Berechnungsmethode wird im Folgenden mit LM (Lochkameramodell), die Berechnung nach dem erweiterten Modell mit EM (erweitertes Lochkameramodell) abgekürzt.



Abbildung 6 Kugelstab (links) und Ebenen-Normal (rechts)

4.2 Ergebnisse

Eine signifikante Verbesserung der Messergebnisse wird insbesondere in den Randbereichen des Messvolumens bzw. in besonders kurzer oder langer Messentfernung erwartet. Daher wurden die Messungen über einen möglichst großen Entfernungsbereich durchgeführt, nämlich zwischen 650 und 1500 mm Abstand vom Sensor.

An die 3D-Messpunkte der Kugeloberflächen wurden mittels geometrischem Fit Kugeln angepasst und die Radien und die Standardabweichung auf den Kugeloberflächen bestimmt. Der Abstand zwischen den Kugelmittelpunkten wurde als Längenmaß bestimmt. An die Messpunkte des Ebenen-Normals wurde eine Ebene angefitet und die globale Standardabweichung bestimmt. Weiterhin wurde die tatsächliche „Durchbiegung“ der Ebene geschätzt, indem die rauschbereinigte Differenz der größten und kleinsten Abweichung von der angefiteten Ebene bestimmt wurde.

Tabelle 1 zeigt die mittleren Längenmessfehler (Err), Standardabweichungen (SD) und Spannen (PV) bei jeweils 25 Kugelstabsmessungen für die klassische (LM) und die Kalibrierung mit dem erweiterten Modell (EM) bei drei aufeinanderfolgenden unabhängigen Kalibrierungen.

Tabelle 1 Mittlere Längenmessfehler, Standardabweichungen und PV-Werte bei LM und EM, alle Werte in mm

Kalib.	LM			EM		
	Err	SD	PV	Err	SD	PV
1	0.07	0.58	2.39	-0.09	0.38	1.72
2	0.29	0.79	2.98	0.08	0.56	1.93
3	0.22	0.62	2.33	-0.02	0.38	1.35

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Ebenenmessungen (globale Standardabweichung SD und „Durchbiegung“ DB) für die klassische Kalibrierung (LM) und die Kalibrierung mit dem erweiterten Modell (EM).

Tabelle 2 Ergebnisse Ebenheitsmessung

Distanz [mm]	LM		EM	
	SD [mm]	DB [mm]	SD [mm]	DB [mm]
650	0.75	2.9	0.57	1.8
760	0.40	1.8	0.55	1.4
880	0.25	0.9	0.52	1.6
1000	0.27	0.9	0.46	1.3
1100	0.41	1.2	0.40	1.0
1350	0.93	2.7	0.35	0.6
1500	1.15	3.9	0.41	0.3
MW	0.60	2.0	0.47	1.1
SD_{mean}	0.35	1.2	0.08	0.6
DB_{max}		3.9		1.8

5 Diskussion

Die erzielten Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der Messgüte mit dem erweiterten Modell. Der systematische Messfehler wird etwa um den Faktor anderthalb bis zwei reduziert. Allerdings ist damit das Potenzial der erweiterten Modellierung noch nicht ausgeschöpft.

Insbesondere bei der Bestimmung der Ebenen-Durchbiegung können die gewonnenen Messdaten nur eine qualitative Aussage bezüglich des Messfehlers machen, da das Ebenen-Normal mit den Maßen von 1000 mm x 200 mm nur eine geringe Fläche im Messvolumen abdeckt. Sinnvoll wäre eine Referenzebene von etwa 1.5 m x 1.5 m. Eine solche exakt ebene Fläche stand jedoch nicht zur Verfügung. Die geringer werdenden Durchbiegungswerte bei größerer Messentfernung lassen sich dadurch erklären, dass für die 3D-Messwerte ein immer kleiner werdender zentraler Teil der Kamera-Chip-Ebenen beiträgt, wo der „Verzeichnungsfehler“ am geringsten ist.

Ein weiterer Nachteil der Weitwinkelobjektive ist die mit größerer Messdistanz geringer werdende örtliche Auflösung, was zu erhöhtem Messwerauschen führt. Um dies bei zukünftigen Messungen zu reduzieren, kann die Anzahl der für die 3D-Berechnung verwendeten Folgebilder drastisch erhöht werden, z. B. um den Faktor vier, um eine Halbierung des Rauschens zu erreichen.

Neben der Kalibrierung mit der Bingo-Software wurde mit den identischen Punktdaten jeweils eine Kalibrierung mittels OpenCV-Software (OCV 2026) durchgeführt. Dabei zeigte sich jedoch, dass weder die initialen Kalibrierungen noch die Erweiterungen verwendbare Resultate lieferten.

6 Fazit & Ausblick

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Erweiterung des klassischen Lochkameramodells eine Reduzierung des systematischen Messfehlers bei fotogrammetrischen Stereo-Sensoren mit Weitwinkel-Objektiven erreicht werden kann. Die untersuchte Erweiterung in Richtung auf eine strahlbasierte Kameramodellierung bezieht sich allerdings nur auf die Verschiebung des Durchstoßpunktes der Sehstrahlen auf der optischen Achse der Kamera und bewirkt somit die Variabilität von Kamera-Konstante und Projektionszentrum der Kamera.

Die Ermöglichung weiterer Freiheitsgrade bei der Kameramodellierung bis hin zur individuellen Modellierung jeden Sehstrahls durch einen Startpunkt und einen Richtungsvektor im Objektraum dürfte eine weitere signifikante Reduzierung des systematischen Messfehlers bewirken.

Für zukünftige Arbeiten stehen daher mehrere Aufgaben im Fokus. Erstens soll das aktuell verwendete Modell um weitere, z. B. tangentielle Parameter ergänzt werden. Weiterhin sollen in den Prozess der erweiterten Kalibrierung die Parameter der äußeren Orientierung zwischen den beiden Stereo-Kameras einbezogen werden, um Verspannungen des Gesamtsystems aufzulösen.

Zweitens soll bei zukünftigen Experimenten die Messwerterfassung dahingehend verbessert werden, dass das Messrauschen durch längere Bildsequenzen reduziert wird und mehr Längennormale (z. B. Kugelstäbe unterschiedlicher und größerer Längen) gemessen werden. Statt der verwendeten Ebenheits-Normale wird eine größere ebene Referenzfläche für die Bestimmung der Ebenheit benötigt. Mit solch einem verbesserten Equipment sollten dann auch Experimente mit Fish-Eye-Optiken erfolgreich durchgeführt werden können.

Literaturverzeichnis

- Bingo (2026). <https://bingo-atm.de> (Zugriff: 31.03.2026).
- Bräuer-Burchardt, C., Ramm, R., Kühmstedt, P. & Notni, G. (2022). The Duality of Ray-Based and Pinhole-Camera Modeling and 3D Measurement Improvements Using the Ray-Based Model. *Sensors* 2022, 22, 7540. <https://doi.org/10.3390/s22197540>
- Brown, D.C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogramm. Eng.*, 37, 855–866.
- Garrido-Jurado, S., Munoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J. & Marin-Jimenez, M. J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recogn.* 47, 6 (June 2014), 2280–2292. <https://doi.org/j.patcog.2014.01.005>
- Grossberg, M.D. & Nayar, S.K. (2001). A General Imaging Model and a Method for Finding Its Parameters. In *Proceedings of the Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001; IEEE Comput. Soc: Vancouver, BC, Canada, 7–14 July 2001; Volume 2*, 108–115.
- Fraser, C.S. & Shortis, M.R. (1992). Variation of distortion within the photographic field. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 58, 851–855.
- ISO, (2021). ISO 10360-13. Geometrical product specifications (GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) - Part 13: Optical 3D CMS.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. (2023). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. De Gruyter.
- Magill, A.A. (1955). Variation in distortion with magnification. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 54(3):153–142.
- OCV (2026). <https://opencv.org/> (Zugriff: 01.04.2026).
- Ramalingam, S., Sturm, P. & Lodha, S.K. (2006). Theory and Calibration for Axial Cameras. *Asian Conference on Computer Vision, 2006, Hyderabad, India*. pp.704–713.
- Remondino, F. & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000158067>
- Sturm, P., Ramalingam, S., Tardif, J.-P., Gasparini, S. & Barreto, J. (2010). Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision. *Found. Trends® Comput. Graph. Vis.* 2010, 6, 1–183. <https://doi.org/10.1561/06000000023>
- Von Gioi, R.G., Monasse, P., Morel, J.-M. & Tang, Z. (2010). Towards high-precision lens distortion correction. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Image Processing, Hong Kong, China, 26–29, 4237–4240*. <https://doi.org/10.1109/icip.2010.5651928>

Geometrische Modellierung und Kalibrierung eines rotierenden 360°-Panoramakamerasystems mit Flächensensor

Ellen Schwalbe¹, & Danilo Schneider¹

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur Nutzung von 360°-Panoramakamerasystemen mit rotierendem Flächensensor für vermessungstechnische Anwendungen vorgestellt. Dabei wird aus den überlappenden Einzelbildern einer rotierten Aufnahme ein sphärisches Panorama erzeugt. Für die photogrammetrische Verwendung dieser Panoramen ist eine präzise Kalibrierung der Kamera und ihres Rotationsverhaltens erforderlich. Hierfür wurde ein spezieller Kalibrierraum eingerichtet und ein mathematisches Projektionsmodell entwickelt. Dieses wurde als Rückwärtsschnitt implementiert und schrittweise verfeinert, so dass gegenwärtig eine Genauigkeit von ca. einem Pixel erreicht werden kann. Anschließend wurde das Modell in eine Bündelblockausgleichung integriert, wodurch mehrere Panoramen gemeinsam ausgewertet und 3D-Koordinaten berechnet werden können.

Schlagwörter Panoramakamera · Kalibrierung · geometrische Modellierung · vollsphärisch

1 Einführung

360°-Panoramakameras haben sich als effiziente Werkzeuge zur schnellen und vollständigen Erfassung komplexer Umgebungen etabliert. Sie ermöglichen die simultane Aufnahme des gesamten Sichtfeldes und bieten damit erhebliche Vorteile gegenüber klassischen, richtungsgebundenen Kamerasystemen.

Grundsätzlich lassen sich verschiedene Arten von 360°-Kamerasystemen unterscheiden. Weit verbreitet sind Mehrkamerasysteme, bei denen mehrere Einzelsensoren mit Fischaugenobjektiven kombiniert werden, um durch Bildfusion ein sphärisches Panorama zu erzeugen (Blaser et al., 2017; Flores et al., 2024). Daneben existieren katadioptrische Systeme, die mithilfe von Spiegeln ein Rundumbild auf einen einzelnen Sensor projizieren (Baker & Nayar, 1999; Barone et al., 2018). Eine weitere, im vermessungstechnischen Kontext besonders relevante Kategorie stellen rotierende Kamerasysteme dar. Diese erfassen die Umgebung sequenziell durch eine mechanische Rotation des Sensors und erzeugen sehr hochauflösende Panoramen. Bei den rotierenden Systemen kann es sich um Zeilensensorsysteme mit Fischaugenobjektiven (vgl. Schneider et al., 2010) oder um Systeme mit rotiertem Flächensensor handeln.

1.1 Motivation

Für die Zustandserfassung denkmalgeschützter Bauwerke sind Messverfahren notwendig, die eine detailgetreue und vollständige Aufnahme ermöglichen. Neben der Erfassung der reinen Geometrie (z.B. mittels terrestrischem Laserscanning) spielen in diesem Anwendungsbereich aber auch hochauflösende, farbtreue Bildinformationen eine große Rolle, um eine möglichst realitätsnahe Bestandsdokumentation zu gewährleisten. Im Kontext der digitalen Denkmalpflege besteht daher ein wachsender Bedarf an Verfahren, geometrische und radiometrische Informationen effizient miteinander zu kombinieren.

Mit der im Folgenden betrachteten 360° Panoramakamera RODEON piXplorer (Dr. Clauss Bild- und Datentechnik GmbH) mit rotierendem Flächensensor (Abb. 1) können Panoramen mit hoher Auflösung, Farbqualität und geometrischer Genauigkeit aufgenommen werden. Um zum einen geometrische Repräsentationen denkmalgeschützter Gebäude in Form von 3D-Punktwolken oder 3D-Modellen mit der hochwertigen Farbinformation dieser Panoramen geometrisch korrekt zu kolorieren und zum anderen aus mehreren Panoramen selbst 3D-Informationen ableiten zu können, ist die Entwicklung eines geeigneten Abbildungsmodells notwendig. Auf dessen Grundlage kann schließlich eine Kalibrierung der Kamera und damit die Bestimmung kamera-spezifischer Abbildungsparameter erfolgen.

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Geoinformation, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland, E-Mail: ellen.schwalbe@htw-dresden.de; danilo.schneider@htw-dresden.de

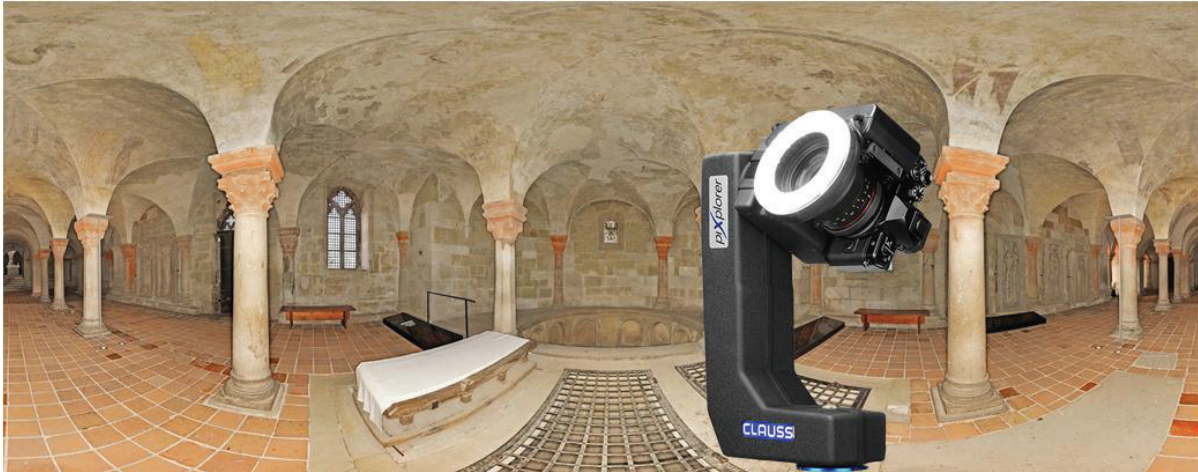


Abbildung 1 Verwendung einer 360°-Panoramakamera zur Dokumentation und Vermessung denkmalgeschützter Bauwerke

1.2 Zielstellung

Mit der geometrischen Modellierung und Kalibrierung der Panoramakamera können zwei wesentliche Ziele verfolgt werden:

Zum einen bilden sie die Grundlage, um die Einzelbilder der Panoramaaufnahme zu einem versatzfreien, entzeichneten sphärischen Panorama mit hoher geometrischer Genauigkeit zusammensetzen sowie Algorithmen zu entwickeln, die der Übertragung der Panoramabildraten in den Objektraum dienen. Hierfür ist es erforderlich, sämtliche systematischen Einflüsse auf den Abbildungsvorgang möglichst vollständig zu identifizieren und mathematisch zu modellieren.

Zum anderen sollen die Kalibrierergebnisse genutzt werden, um die physikalischen Ursachen systematischer Abweichungen nachzuvollziehen zu können. Damit soll gleichzeitig ein Werkzeug geschaffen werden, welches zur Qualitätskontrolle bei der Kamerafertigung eingesetzt werden kann. Dies setzt voraus, dass aussagekräftige Modellparameter gefunden und Korrelationen zwischen den einzelnen Parametern vermieden werden.

1.3 Funktionsweise Panoramakamera

Bei der verwendeten Panoramakamera handelt es sich um eine Flächensensorkamera (Micro-Four-Thirds-Format) mit einem 17 mm Objektiv, die auf einem Kameraarm montiert ist, mit dem sie präzise horizontal rotiert und vertikal verschwenkt werden kann. Auf diese Weise wird ein bestimmtes Winkelraster abgefahren und an den definierten Winkelpositionen (Hz, Vz) jeweils eine zentralperspektive Aufnahme gemacht (siehe Abb. 2). Bei ausreichender Anzahl an Aufnahmen kann so die gesamte Umgebungssphäre erfasst

werden. Die gewählte Winkelrasterdichte beeinflusst die Aufnahmezeit für ein Panorama und in welchem Maße sich die Bildinhalte benachbarter Einzelbilder überlappen. Die Aufnahmereihenfolge der Einzelbilder kann variiert werden.

Für die folgenden Betrachtungen wurde ein Aufnahmeraster bestehend aus 60 Einzelbildern gewählt, welches sich aus 12 Horizontal- und 5 Vertikalpositionen zusammensetzt. Beginnend mit dem niedrigsten Vertikalwinkel wird jeweils zunächst die Vertikalwinkelposition und daraufhin alle 12 zugehörigen Horizontalwinkelpositionen angefahren. Die Aufnahmereihenfolge der einzelnen Bilder im Aufnahmeraster (Abb. 2, unten) erfolgt somit zeilenweise von unten nach oben und innerhalb jeder Zeile jeweils von links nach rechts.

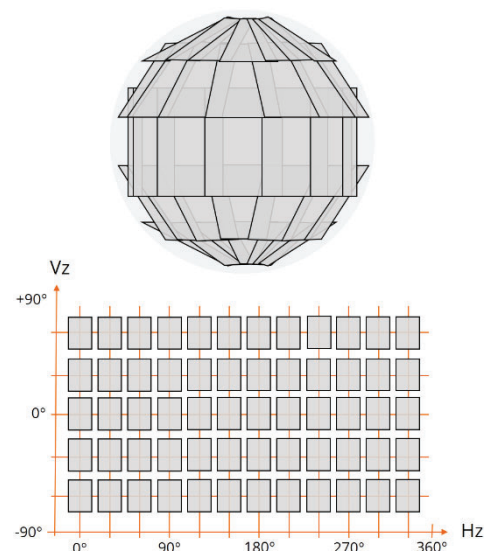


Abbildung 2 Aufnahmeraster der Einzelbilder einer Panoramaaufnahme

2 Methoden

Im folgenden Abschnitt werden die methodischen Aspekte zur Bereitstellung geeigneter Kalibrierdaten, der Entwicklung und Parametrisierung des funktionalen Abbildungsmodells der Panoramakamera und dessen Implementierung als Rückwärtsschnitt und Bündelblockausgleich betrachtet.

2.1 Datenaufnahme

Die Grundlage für die geometrische Modellierung und Kalibrierung einer 360°-Kamera bildet die Einrichtung einer geeigneten Kalibrierumgebung sowie die Aufnahme eines Panoramakalibrierdatensatzes.

2.1.1 Kalibrierraum

Der Panoramakalibrierraum für 360°-Aufnahmen wurde so konzipiert, dass eine gute Punktverteilung in den Einzelbildern jeder Panoramaaufnahme gewährleistet werden kann. Es wurde ein leerer Raum mit den Raumabmessungen von $3,5 \times 7,0 \times 3,0$ m gewählt und mit Marken versehen, deren Koordinaten mit hoher Genauigkeit bestimmt wurden.

Insgesamt wurden rund 400 kodierte Marken gleichmäßig über alle 6 Raumflächen verteilt, um eine stabile und eindeutige Orientierung der Panoramen zu gewährleisten. Zwischen den kodierten Punkten erfolgte eine Verdichtung des Punktfeldes mit ca. 2000 unkodierten Punkten, welche sicherstellen, dass auch jedes Einzelbild einer Panoramaaufnahme ausreichend Punkte enthält, um gegebenenfalls auch individuell orientiert werden zu können (Abb. 3).

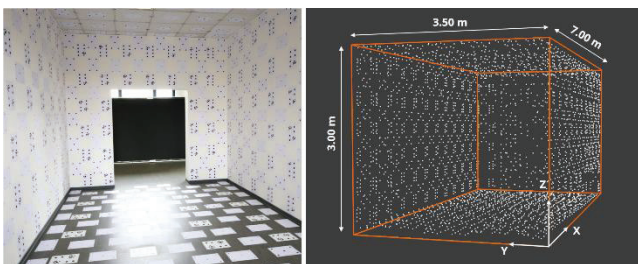


Abbildung 3 Kalibrierraum

Die Koordinatenbestimmung der Objektpunkte erfolgte photogrammetrisch auf Basis von etwa 250 Einzelaufnahmen. Zur metrischen Skalierung wurden kalibrierte, hochgenaue Referenzmaßstäbe eingesetzt. Die erreichte Genauigkeit der Objektpunktbestimmung liegt im Submillimeterbereich mit RMS-Werten von 0,16 mm in X-, 0,14 mm in Y- und 0,13 mm in Z-Richtung.

2.1.2 Aufnahmekonfiguration

Für die Modellierung und Kalibrierung der Panoramakamera wurde ein geeigneter Testdatensatz in Form eines Panorama-Bildverbands aufgenommen. Insgesamt wurden 22 Panoramen erfasst, wobei jedes Panorama aus jeweils 60 Einzelaufnahmen besteht. Die Aufnahmestandpunkte wurden so gewählt, dass sie gut über die gesamte Raumfläche verteilt sind und zudem in zwei unterschiedlichen Höhen liegen (siehe Abb. 4).

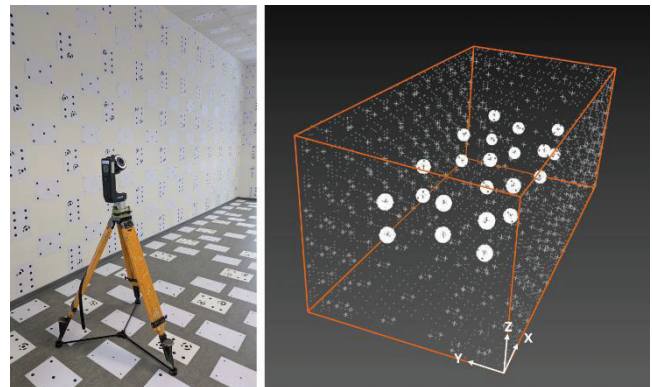


Abbildung 4 Aufnahmekonfiguration

Um Korrelationen zwischen den Modellparametern zu minimieren, wurden die Panoramen zudem mit unterschiedlichen Startausrichtungen aufgenommen. Durch diese gezielten Variationen der Aufnahmegeometrie wird eine robustere und stabilere Parameterbestimmung im Rahmen der Kalibrierung unterstützt.

2.2 Geometrisches Modell

2.2.1 Grundmodell

Unter dem geometrischen Grundmodell wird die Abbildungsfunktion einer ihrem Aufnahmeprinzip nach idealen Kamera verstanden. Für den Fall einer Panoramakamera mit rotiertem Flächensensor bedeutet dies, dass die vertikale Rotationsachse der Kamera mit der x-Achse des Gerätekoordinatensystems (Abb. 5, oben, oranges Koordinatensystem) übereinstimmt und das Rotationszentrum im Ursprung dieses Koordinatensystems liegt. Das Rotationszentrum entspricht damit zugleich dem Projektionszentrum der rotierenden Flächensensorkamera.

Zur Fixierung der Nullrichtung für die Rotationen wird die z-Achse des Gerätekoordinatensystems als identisch mit der optischen Achse des Einzelbildes an der Rasterposition $(0^\circ, 0^\circ)$ definiert (Abb. 5). Die Position (X_0, Y_0, Z_0) und die

Orientierungswinkel (ω , φ , κ) des so festgelegten Gerätekoordinatensystems im übergeordneten Koordinatensystem entsprechen der äußeren Orientierung der Panoramakamera.

Zur Beschreibung der Abbildung eines Objektpunktes in ein individuelles Einzelbild, werden ausgehend von dieser initialen Orientierung, die spezifischen Orientierungswinkel für das jeweilige Einzelbild durch Rotation um die ihm zugeordneten vordefinierten Rasterwinkel H_z und V_z abgeleitet und die äußere Orientierung in Bezug auf das Kamerakoordinatensystem des Einzelbildes bestimmt (Abb. 5, oben, schwarzes Koordinatensystem). Bei idealer Aufnahmegeometrie könnte von diesem Koordinatensystem ausgehend die zentralperspektive Abbildung des Objektpunktes ins Bild erfolgen.

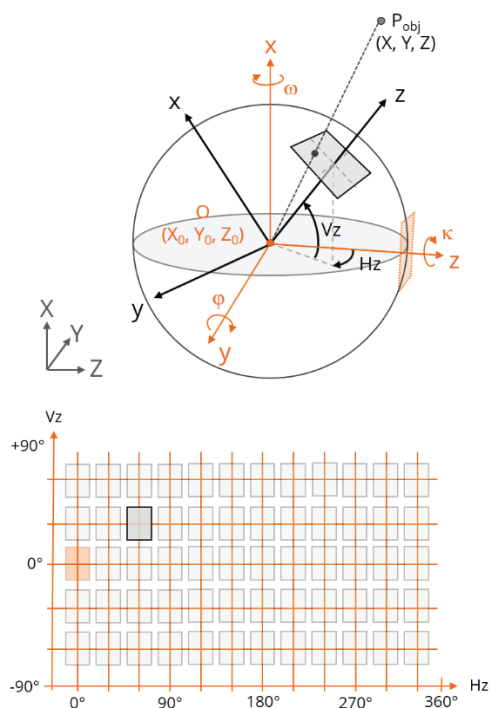


Abbildung 5 Geometrisches Grundmodell

2.2.2 Zusatzparameter

Systematische Abweichungen vom geometrischen Grundmodell bedingen die Einführung geeigneter Zusatzparameter, welche diese Abweichungen modellieren und in das funktionale Abbildungsmodell integrieren. Dazu zählen zum einen Einflüsse, die eine Abweichung der Rotationsachse der Kamera von der x -Achse des Panoramakamerakoordinatensystems bewirken (Winkelabweichungen), und zum anderen Einflüsse, die eine Abweichung des Projektionszentrums der Kamera vom Ursprung des Panoramakamerakoordinatensystems verursachen (Exzentrizitäten).

In Bezug auf die Winkelabweichungen wird als wesentlicher Einfluss die Ansteuerung der Winkelpositionen (H_z , V_z) der Panoramakamera betrachtet. Die motorische Ansteuerung dieser Sollwinkel ist systematisch fehlerbehaftet, sodass die tatsächlich eingenommenen Winkel von den vorgegebenen Positionen abweichen können. Dies wird durch die Korrekturterme dH_z und dV_z berücksichtigt. Weiterhin können beispielsweise Taumelfehler der Rotations- und Kippachse in diese Korrekturterme eingehen sowie auch eine Verkantung der Einzelbilder verursachen, welche durch einen entsprechenden Korrekturterm $d\kappa$ modelliert wird (siehe Abb. 6).

Zur Berücksichtigung der Exzentrizitäten werden für die Abweichung des Projektionszentrums von der horizontalen Rotationsachse der Parameter E_h und für die Abweichung von der vertikalen Rotationsachse der Parameter E_v eingeführt. Durch Einführung zusätzlicher Rotationen um die Parameter der Winkelabweichungen sowie Translationen um die Parameter der Exzentrizitäten in das Abbildungsmodell kann eine Annäherung an das tatsächliche Kamerakoordinatensystem eines Einzelbildes erreicht werden (Abb. 6, grünes Koordinatensystem).

Ausgehend von diesem Koordinatensystem erfolgt schließlich die Abbildung des Objektpunktes in das Bild mittels Kollinearitätsgleichung unter Berücksichtigung der Parameter der inneren Orientierung der Flächensensorkamera sowie des Parametersatzes für die Objektivverzeichnung (Brown, 1971).

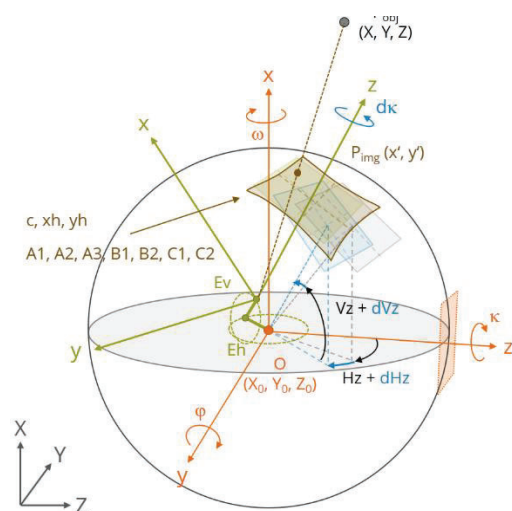


Abbildung 6 Geometrisches Modell mit Zusatzparametern

2.2.3 Gültigkeit der Modellparameter

In Bezug auf die Gültigkeitsbereiche Panoramakamera, Panoramabild und Einzelbild innerhalb einer Panoramaaufnahme können die einzelnen Modellparameter als variant oder invariant definiert werden.

Die Parameter der inneren Orientierung und der Verzerrung werden für alle Panoramen einer bestimmten Panoramakamera als invariant angenommen. Gleiches gilt für die Exzentrizitätsparameter E_h und E_v . Dagegen sind die Parameter der äußeren Orientierung für jedes Panorama einer Panoramakamera individuell zu bestimmen.

Winkelabweichungen werden grundsätzlich auf die Panoramakamera bezogen als invariant definiert, können innerhalb einer Aufnahme jedoch unterschiedliche Geltungsbereiche aufweisen: So können sie etwa für eine ganze Zeile oder Spalte des Aufnahmerasters gelten oder für jedes Einzelbild individuell bestimmt werden.

Da die getroffenen Konventionen die Anzahl der Modellparameter erheblich beeinflussen, ist es sinnvoll, diese soweit möglich als invariant zu setzen, um die Parameteranzahl auf das notwendige Maß zu reduzieren: Die Kamera fährt zunächst eine Vertikalwinkelposition an und anschließend die Horizontalwinkel der entsprechenden Rasterzeile. Deshalb wird eine Korrektur aller drei Winkelabweichungen angesetzt, die für alle Bilder der jeweiligen Rasterzeile i gilt (dHz_row_i , dVz_row_i , dK_row_i). Unter der Annahme, dass der Fehler bei der Ansteuerung einer bestimmten Horizontalwinkelposition konstant bleibt, kann zudem eine Horizontalwinkelkorrektur invariant für jede Rasterzeile j definiert werden (dHz_col_j).

2.3 Implementierungen

Das geometrische Modell wurde als Rückwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung implementiert.

2.3.1 Rückwärtsschnitt

Die Umsetzung als Rückwärtsschnitt ermöglicht eine schnelle und unkomplizierte Kalibrierung einer Kamera, setzt jedoch einen Kalibrierraum mit hoher Abdeckung durch übergau bekannte Punkte voraus, um Parameter, die auf jedes Einzelbild der Aufnahme wirken, zuverlässig modellieren zu können. Dies ist insbesondere für die Schätzung der Parameter der Winkelabweichungen von Bedeutung. Je weniger diese für bestimmte Bildergruppen als invariant angenommen werden können, desto dichter und gleichmäßiger müssen die Punkte im Raum verteilt sein.

Abb. 7 zeigt als Ergebnis einer Ausgleichung mit 404 Objektpunkten (1674 Beobachtungen) und 43 zu schätzenden Modellparametern die verbleibenden Restresiduen (150-fache Überhöhung) für jeden Objektpunkt, welche überlagert zu den Einzelbildern des Aufnahmerasters der Panoramaaufnahme dargestellt sind. Die Standardabweichung des Rückwärtsschnitts für diese spezifische Aufnahme beträgt $s_0=0,8$ Pixel.

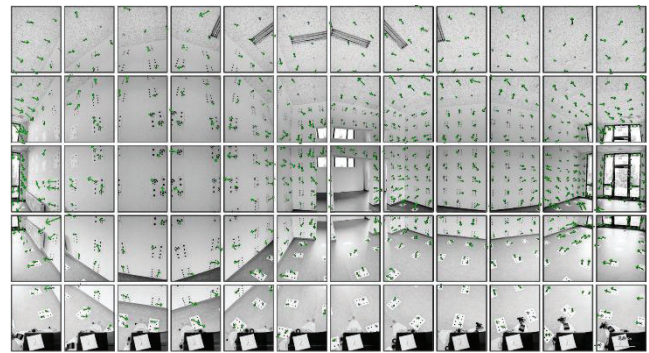


Abbildung 7 Residuenbild Rückwärtsschnitt

2.3.2 Bündelblockausgleichung

Um die Panoramakamera für die direkte Bestimmung von 3D-Koordinaten nutzbar zu machen, wurde das geometrische Modell zudem als Bündelblockausgleichung implementiert. Diese ermöglicht zudem eine geometrisch stabilere Kamerakalibrierung, da mehr Redundanz vorhanden ist und insbesondere jedes Einzelbild eine gute Punktabdeckung erhält. Korrelationen können durch Variationen der Aufnahmegeometrie reduziert werden. Darüber hinaus erlaubt sie eine bessere Kontrolle über den Einfluss bestimmter Effekte, wie Instabilitäten von Parametern oder verbleibende entfernungsabhängige Systematiken, da sich diese bei der Auswertung eines Bildverbandes in einer schlechteren Gesamtgenauigkeit der Ausgleichung äußern.

Abb. 8 zeigt die Residuenbilder nach der Ausgleichung eines Bildverbandes aus 22 Panoramen mit 32 938 Beobachtungen und 169 Unbekannten. Die obere Darstellung in Abb. 8 (50-fache Überhöhung) zeigt das Ergebnis der Ausgleichung ohne Zusatzparameter (Grundmodell). Dabei ergibt sich eine Standardabweichung von 13,1 Pixeln, wobei sich alle systematischen Abweichungen der Kamera vom Idealmodell in den Residuen überlagert darstellen.

Die untere Abbildung zeigt im Vergleich dazu die Restresiduen (150-fache Überhöhung) nach der Ausgleichung mit dem vollständigen geometrischen Modell gemäß Abschnitt 2.2. Durch den Einbezug der zusätzlichen Modellparameter konnte die Genauigkeit der Ausgleichung um den Faktor zehn auf 1,3 Pixel verbessert werden.

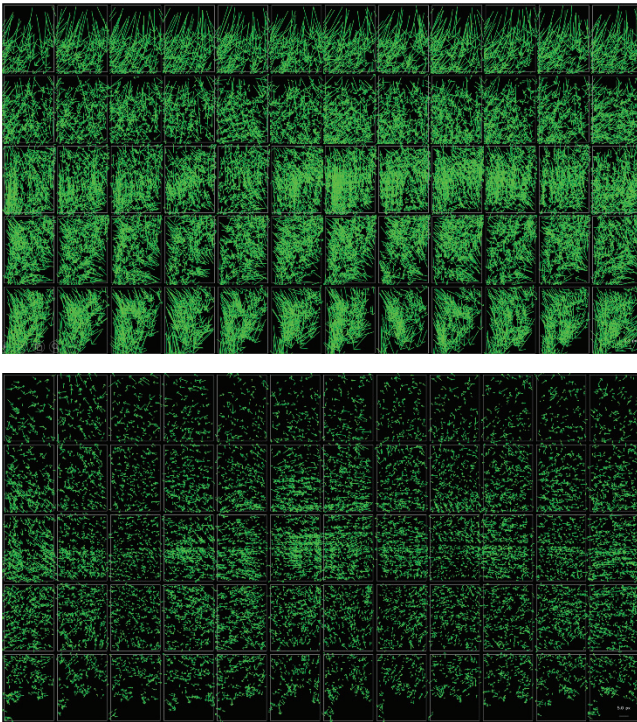


Abbildung 8 Residuenbilder Bündelblockausgleichung

3 Ergebnisse

Den in Abschnitt 1.2 formulierten Zielen entsprechend werden im Folgenden als Ergebnis der Modellierung der Panoramakamera die Resultate einer durchgeführten Kalibrierung sowie die Erstellung eines Panoramas auf Grundlage des funktionalen Modells vorgestellt.

3.1.1 Kalibrierung

Als Beispiel für die Anwendung des geometrischen Modells sind in Tabelle 1 die Ergebnisse der Kalibrierung einer RO-DEON piXplorer Kamera dargestellt, die aus der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Ausgleichung eines Bildverbandes von 22 Panoramen hervorgehen ($s_0 = 1,3$ Pixel). In Bezug auf die Fertigungsgenauigkeit der individuellen Kamera lassen sich aus den Werten folgende Aussagen ableiten:

Die rasterzeilenbezogenen Winkelabweichungen, die durch das vertikale Anfahren einer Zeile entstehen, liegen im Zehntelgradbereich. Die verbleibenden, spaltenweise angesetzten Abweichungen der Horizontalwinkelpositionen sind deutlich geringer und bewegen sich im Hundertstelgradbereich. Die Exzentrizitäten zu den Rotationsachsen liegen im Halbmillimeterbereich. Die Parameter der Verzeichnung des Objektivs wurden auf signifikant wirksame Werte reduziert. Obwohl die Kamera mit hoher Genauigkeit gefertigt ist und das ideale Abbildungsmodell physikalisch gut

angenähert wird, ist es erforderlich, im Rahmen einer Kalibrierung Zusatzparameter zu bestimmen und in das Abbildungsmodell zu integrieren, um eine Nutzung der Kamera für Messzwecke zu ermöglichen und eine angestrebte Genauigkeit von ca. 1 Pixel bis Subpixelbereich zu erreichen.

Tabelle 1 Werte Kalibrierbeispiel

Korrektur für Abweichungen von den Rasterpositionen pro Rasterzeile:		
dVz_row_1	$-0.4575^\circ \pm 0.00091^\circ$	
dHz_row_1	$0.1113^\circ \pm 0.00091^\circ$	
dk_row_1	$-0.4362^\circ \pm 0.00209^\circ$	
...		
dVz_row_5	$-0.4650^\circ \pm 0.00095^\circ$	
dHz_row_5	$0.3631^\circ \pm 0.00095^\circ$	
dk_row_5	$0.2359^\circ \pm 0.00199^\circ$	
Korrektur für Abweichungen von den Rasterpositionen pro Raster-spalte:		
dHz_col_2	$0.0054^\circ \pm 0.00065^\circ$	
dHz_col_3	$-0.0037^\circ \pm 0.00069^\circ$	
dHz_col_4	$-0.0305^\circ \pm 0.00073^\circ$	
...		
dHz_col_{12}	$0.0635^\circ \pm 0.00073^\circ$	
Exzentrizitäten:		
Eh	$0.685 \text{ mm} \pm 0.024 \text{ mm}$	
Ev	$0.639 \text{ mm} \pm 0.034 \text{ mm}$	
Innere Orientierung:		
c	$17.029 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$	
xh	$0.063 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$	
yh	$0.083 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$	
Verzeichnung:		
A1	$-4.444 \cdot 10^{-4} \pm 2.79 \cdot 10^{-6}$	
A2	$1.486 \cdot 10^{-6} \pm 5.71 \cdot 10^{-8}$	
C2	$1.467 \cdot 10^{-4} \pm 1.25 \cdot 10^{-5}$	

3.1.2 Panoramagenerierung

Mit dem entwickelten geometrischen Modell und den zugehörigen, im Rahmen einer Kalibrierung bestimmten Modellparametern ist die Grundlage geschaffen, aus den Einzelbildern einer Panoramaaufnahme (siehe Abb. 7) ein versatz-freies Kugelpanorama zu erzeugen. Da die Abbildung eines

Objektpunktes in ein Einzelbild sowie dessen Bezug zum Koordinatensystem der Panoramakamera mathematisch beschrieben sind, kann jeder Bildpunkt aus dem Kamerakoordinatensystem eines Einzelbildes in das Koordinatensystem der Panoramakamera transformiert werden (siehe Abb. 6). Ausgehend davon lässt sich die Punktlage im Kugelpanorama eindeutig durch sphärische Koordinaten (Azimut und Elevation) ausdrücken und der zugehörige Grauwert zuweisen.

Zur flächenhaften Gesamtdarstellung wurde das Kugelpanorama in Abb. 9 mittels equirektangulärer Projektion abgebildet. Überlappende Bereiche der Einzelbilder sind dabei transparent überlagert, sodass die Passgenauigkeit an den Bildgrenzen visualisiert werden kann. Abb. 9 links zeigt einen vergrößerten Bildausschnitt in perspektivischer Projektion, der verdeutlicht, dass die Bildränder die Raumkanten im Rahmen der Kalibriergenauigkeit versatzfrei schneiden.

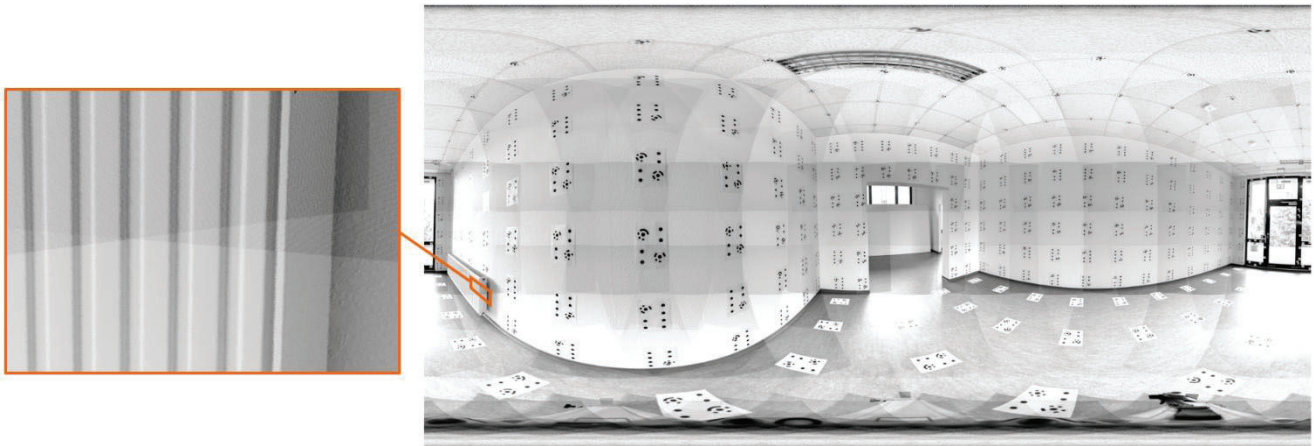


Abbildung 9 Aus Einzelbildern einer Panoramaaufnahme erzeugtes Kugelpanorama mit Detailvergrößerung

4 Diskussion

Im Folgenden werden die Genauigkeitsaspekte der Panoramakamera sowie die praktische Anwendbarkeit der erzeugten Panoramen bewertet und die Ergebnisse im Hinblick auf ihre Eignung für 3D-Messungen und Farbtexturierungen analysiert.

4.1.1 Genauigkeitsaspekte

Die Panoramakamera mit rotierendem Flächensensor kann nach Integration der in dieser Arbeit betrachteten Modellparameter mit einer Genauigkeit von 1,3 Pixel kalibriert werden. Dies entspricht einer Querabweichung im Objektraum von etwa 2,5 mm in 10 m Entfernung und liegt damit in der Größenordnung der erreichbaren Punktlagegenauigkeit terrestrischer Laserscanner in diesem Distanzbereich. Für die Kolorierung terrestrischer Laserscannerpunktwolken mit Farbwerten aus einem Panorama ist somit die Mindestanforderung an die geometrische Modellierung der Panoramakamera erfüllt. Die Aufnahme eines Panoramabildverbandes kann zudem zur direkten Bestimmung von 3D-Koordinaten genutzt werden, deren Genauigkeitspotential mit dem terrestrischer Laserscanner korrespondiert. Somit können die Panoramaaufnahmen neben der hochwertigen Farbtextur

auch ergänzende, verdichtende 3D-Daten bei einer Gebäudeaufnahme liefern.

Der Vergleich der Kalibriergenauigkeit mittels Rückwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung zeigt, dass bei der Auswertung eines Einzelbildes via Rückwärtsschnitt eine geringere Standardabweichung erreicht wurde als bei der Auswertung des gesamten Bildverbandes via Bündelblockausgleichung. Dies könnte auf mögliche Instabilitäten der Parameter während der Aufnahme des Bildverbandes hinweisen oder auf noch nicht modellierte Effekte, die sich in der Auswertung eines Bildverbandes stärker auswirken als beim Rückwärtsschnitt eines Einzelpanoramas, beispielsweise entfernungsabhängige systematische Einflüsse.

4.1.2 Anwendung der Panoramen

Ziel der Modellierung der Panoramakamera war es unter anderem versatzfreie, entzeichnete Panoramen erzeugen zu können. Sind Exzentrizitäten bei einer Panoramakamera nicht vorhanden oder vernachlässigbar klein, kann nach der Erstellung des Kugelpanoramas wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, von einem „entzeichneten“ Panorama gesprochen werden, das einer rein sphärischen Zentralprojektion entspricht. Solche Panoramen können unter Verwendung einfacher sphärischer Abbildungsfunktionen zu Messzwecken

genutzt werden, ohne dass Kenntnisse über die zusätzlichen Modellparameter der Kamera erforderlich sind.

Sind signifikante Exzentrizitäten bei einer Kamera vorhanden, kann zwar ein versatzfreies Panorama aus den Einzelbildern erzeugt werden, dieses lässt sich jedoch nicht als „entzeichnet“ im Sinne einer sphärischen Zentralprojektion verwenden, da sonst entfernungsabhängige systematische Fehlereinflüsse auftreten würden. Die Exzentrizitätsparameter müssen in diesem Fall mit in die Abbildungsgleichungen der Anwendung integriert werden.

5 Fazit & Ausblick

Die vorliegende Studie zeigt die erfolgreiche Entwicklung eines geometrischen Modells für Panoramakameras mit rotierendem Flächensensor. Mit der vorgestellten, aktuellen Parametrisierung des Modells wird eine mittlere Genauigkeit von etwa 1,3 Pixeln (ca. 2,5 mm im Objektraum bei 10 m Distanz) erreicht. Die Implementationen des geometrischen Modells als räumlicher Rückwärtsschnitt und Bündelblockausgleichung sind flexibel um Parameter erweiterbar und können als Werkzeuge zur Kalibrierung sowie zur geometrischen Analyse der Panoramakamera dienen. Die Anwendung des Modells zur Erstellung versatzfreier sphärischer Panoramen bestätigt die Praxistauglichkeit des Ansatzes.

Für zukünftige Arbeiten stehen vor allem Modellverbesserungen im Vordergrund: Es sollen weitere Parameter getestet, Parameterdekorrelationen durchgeführt und funktionale Zusammenhänge spalten- oder zeilenweise wirksamer Parameter untersucht werden. Parallel dazu sind Untersuchungen zur kurz- als auch langfristigen Stabilität der Parameter vorgesehen.

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen wird die Integration geometrischer und radiometrischer Kalibrieransätze angestrebt, um die Panoramaerstellung weiter zu optimieren. Zudem soll der geometrische Zusammenhang zwischen Panorama und Objektraum in die Software metigoMAP des Projektpartners fokus GmbH Leipzig eingebunden werden, um die Nutzung des Modells in praktischen Anwendungen zu realisieren und so den Einsatz von Panoramen aus rotierten Flächensensoraufnahmen zur Vermessung und Dokumentation historischer Gebäude zu ermöglichen.

6 Danksagung

Das dem Beitrag zugrundeliegende Forschungsprojekt wird kofinanziert aus Mitteln der Europäischen Union und mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



Kofinanziert von der Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Literaturverzeichnis

- Baker, S., & Nayar, S. K. (1999). A theory of single-view-point catadioptric image formation. *International Journal of Computer Vision*, 35(2), 175–196. <https://doi.org/10.1023/A:1008128724364>
- Barone, S., Carulli, M., Neri, P., Paoli, A., & Rationale, A. V. (2018). An Omnidirectional Vision Sensor Based on a Spherical Mirror Catadioptric System. *Sensors*, 18(2), 408. <https://doi.org/10.3390/s18020408>
- Blaser, S., Nebiker, S., & Cavegn, S. (2017). System design, calibration and performance analysis of a novel 360° stereo panoramic mobile mapping system. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-1/W1, 207–214. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-207-2017>
- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855–866.
- Flores, M., Valiente, D., & Peidr , A. (2024). Generating a full spherical view by modeling the relation between two fisheye images. *The Visual Computer*, 40, 7107–7132. <https://doi.org/10.1007/s00371-024-03293-7>
- Schneider, D., Maas, H.-G., & Seitz, P. (2010). A novel panoramic camera system with rotating line sensor. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(5), 451–459. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.05.001>

Nahechtzeit Change Detection Tool für die photogrammetrische Hochwasservorsorge

Michael Kögel¹, Dirk Carstensen¹

Zusammenfassung

Durch die Mobilisierung beweglicher Objekte infolge extremer hydraulischer Belastungen während eines Hochwasserereignisses können Verklausungen, Infrastrukturschäden sowie Gefährdungen für Menschen entstehen. Zur Identifikation potenzieller Gefahren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Change Detection Tool (CDT) entwickelt und anhand eines Untersuchungsgebiets an der Aisch erprobt. Der Fokus des CDT lag auf der Nahechtzeit-Auswertung von Punktwolken, die mittels Structure-from-Motion (SfM) aus multitemporalen Luftbildaufnahmen generiert werden. Ziel ist es, Veränderungen zeitnah zu erfassen und darauf aufbauend gezielte Maßnahmen abzuleiten. Die im Untersuchungsgebiet mittels Distanzanalyse (M3C2) identifizierten Unterschiede wurden segmentiert, einzelnen Objekten zugeordnet und anschließend kategorisiert. Darauf aufbauend erfolgte ein Abgleich mit bestehenden hydrodynamisch-numerischen Simulationsergebnissen.

Schlagwörter Change detection · Echtzeit · Photogrammetrie · Hochwasser · 2d-hn · M3C2

1 Einführung

Die Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen in Deutschland und ganz Europa hat sich in den vergangenen Jahrzehnten verändert (Blöschl et al., 2019). In Verbindung mit der zunehmenden Flächenversiegelung sowie anthropogenen Eingriffen in die Gewässermorphologie, wie der Begradigung von Fließgewässern und der Einengung von Abflussquerschnitten, führen teils intensivere Hochwasserereignisse zu einer Beschleunigung von Hochwasserwellen und einer Erhöhung der Abflussspitzen (Patt & Gonsowski, 2011). In LAWA (1995) werden daher unterschiedliche Maßnahmen definiert, durch die eine höhere Resilienz gegenüber Extremereignissen erreicht werden soll. Grundsätzlich ist ein vollständiger Schutz vor extremen Hochwasserereignissen allerdings nicht möglich (LAWA, 1995). Daher sind Hochwasserereignisse als natürlicher Prozess zu verstehen, denen Menschen grundsätzlich ausgesetzt sind (EU, 2007; Patt & Gonsowski, 2011).

Auf Grundlage der Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten (HWGK) und Hochwasserrisikokarten (HWRK) (LAWA, 2010) sowie deren Fortschreibungen (LAWA, 2018) wurden spezifische Analysewerkzeuge entwickelt, die die Charakterisierung von Hochwasserereignissen mit variierenden statistischen Wiederkehrintervallen anhand hydraulischer Parameter, insbesondere Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe und Strömungsvektoren,

visualisieren und eine Bewertung der Gefährdung für Infrastrukturen ermöglichen. Die Grundlage dieser Karten bilden Ergebnisse zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer (2D-HN) Simulationen. Die Risikobewertung erfolgt dabei in der Regel durch die Verknüpfung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses mit den potenziellen Schadensfolgen (Müller, 2010).

Die Risikobewertung konzentriert sich überwiegend auf stationäre und unbewegliche Infrastrukturen. Bewegliche Materialien, die zu Verklausungen führen können (Heimerl, 2018), Infrastrukturen beschädigen oder eine Gefahr für Menschen darstellen, werden bislang nur unzureichend berücksichtigt. Die Identifikation solcher potenziell mobilisierbaren Objekte liefert jedoch wichtige Hinweise auf mögliche Schadensmechanismen und eröffnet die Möglichkeit, durch präventive Maßnahmen Risiken gezielt zu reduzieren. Daher kommt der Nahechtzeit-Detektion potenzieller Gefahrenquellen (mobilisierbare Materialien) eine zentrale Bedeutung zu.

Moderne Messmethoden ermöglichen es, diese Prozesse mit vergleichsweise geringem Aufwand, hoher Genauigkeit und in kurzer Zeit zu erfassen und auszuwerten. Die luftbildphotogrammetrische Aufnahme mittels Structure from Motion (SfM) ermöglicht die hochgenaue dreidimensionale Rekonstruktion und Identifikation von beweglichen Materialien. Zu diesem Zweck wurde von Kögel und Carstensen (2025) das Change Detection Tool (CDT) entwickelt,

¹ Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Brucknerstraße 11, 90429 Nürnberg, Deutschland, E-Mail: michael.koegel@th-nuernberg.de

welches die Nahezeit-Erfassung dieser Objekte ermöglicht und die Ergebnisse in Verbindung mit zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Berechnungsergebnissen visualisiert, wodurch die Risikobewertung eines möglichen Transportbeginns schnell und anwenderfreundlich durchgeführt werden kann.

1.1 Untersuchungsgebiet

Das CDT wurde anhand von Aufnahmen im Bereich der Laufer Mühle an der Aisch entwickelt. Das Gebiet befindet sich ca. 30 km nordnordwestlich von Nürnberg. Das Gebiet wurde gewählt, da bereits bei Hochwasserereignissen kleiner HQ₁ die Vorlandbereiche überschwemmt werden und das Gebiet durch anthropogene Einflüsse kontinuierlich Veränderungen ausgesetzt ist, welche durch multitemporale Aufnahmen detektiert werden können

Im Untersuchungsgebiet befindet sich ein Pegel zur kontinuierlichen Messung der Wasserspiegellage (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2026). Dieser wurde bereits zur Validierung von segmentierten Hochwasserflächen durch künstliche Intelligenz und das eigens entwickelte SSegRef2Surf-Tool (Kögel et al., 2025) herangezogen. Das Untersuchungsgebiet und die Lokalisierung des Messpegels werden in Abb. 1 dargestellt.

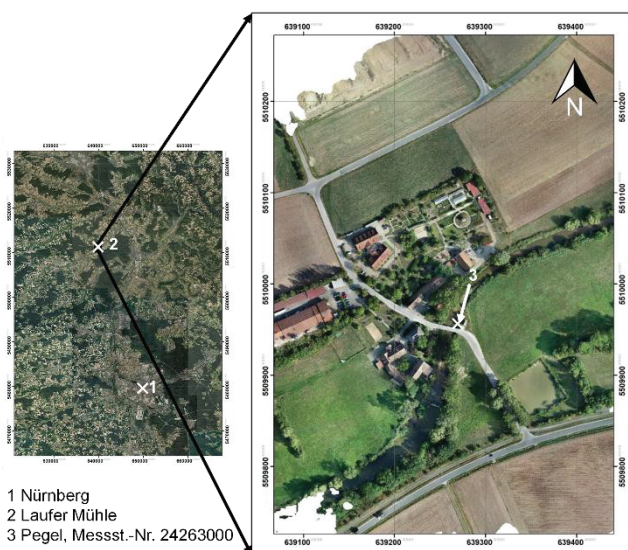


Abbildung 1 Untersuchungsgebiet an der Laufer Mühle (nach Kögel & Carstensen, 2024, adaptiert)

1.1.1 Hochwasserereignis 07/2021

Im Juli 2021 war die Aisch von einem Hochwasserereignis betroffen, welches statistisch in etwa einem HQ₁₀₀ entsprach (Kögel et al., 2025). Dabei traten großräumige Überflutungen der angrenzenden Infrastruktur auf. In der ca. 500 m flussauf der Laufer Mühle liegenden Ortschaft Weppersdorf wurden während dieses Hochwasserereignisses mehrere Holzlager mobilisiert und als Treibgut in Richtung einer stromab befindlichen Brücke transportiert, was zur Verklauung der Brücke führte (Abb. 2).

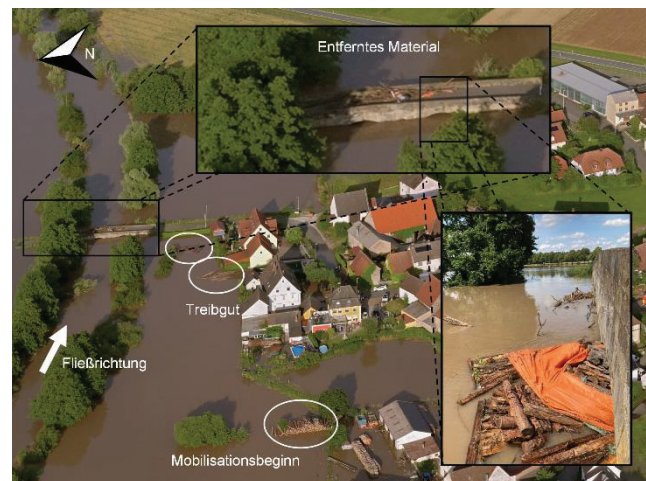


Abbildung 2 Weppersdorf an der Aisch während des Hochwassers 07/2021 und Kennzeichnung von bereits mobilisiertem Material (Treibgut), Holzlagerungen kurz vor Mobilisationsbeginn sowie entferntem Verklauungsmaterial an der Brücke (Quelle Fotoaufnahmen: NÜRNBERGLUFTBILD, 2021, Wasserwirtschaftsamt Nürnberg, 2021)

Das Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit, potenzielle Gefahrenquellen frühzeitig zu identifizieren und nach Möglichkeit zu beseitigen. Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf an Methoden, die eine kurzfristige und flexible Erkennung solcher Risiken bereits vor dem Eintritt eines Hochwasserereignisses ermöglichen. Aus dieser Zielsetzung heraus wurde das CDT entwickelt.

2 Methoden

2.1 Detektion und Kategorisierung von Veränderungen

Die Veränderungen in einem Untersuchungsgebiet mittels CDT werden auf Basis von multitemporalen LuftbildFotoaufnahmen ermittelt. Die Fotoaufnahmen aus unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (Aufnahme 1: Referenzdatensatz; Aufnahme 2: Vergleichsdatensatz) werden mittels

photogrammetrischer Rekonstruktion und Structure from Motion (SfM) mit der Software Agisoft Metashape Pro v.1.8.4 (Agisoft LLC, 2022) in dreidimensionale Abbildungen (Punktwolken) des Geländes überführt (Eltner et al., 2022). Durch einen Distanzvergleich mit der von Lague et al. (2013) entwickelten und in der Software CloudCompare (CC) v.2.12.4 integrierten Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2) Methode werden geometrische Unterschiede zwischen den beiden Punktwolken festgestellt. Für diese Untersuchungen wurde das Gebiet an der Laufer Mühle am 01.09.2022 (Referenzzustand) und am 30.11.2022 (Vergleichszustand) photogrammetrisch erfasst.

Nach Filterung von Streupunkten werden die detektierten Veränderungen mittels Label Connected Components (LCC) Algorithmus (Girardeau-Montaut, 2015) in einzelne Komponenten unterteilt. Die Komponenten werden mit bestehenden zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen (2D-HN) Simulations-ergebnissen überlagert, wodurch die hydraulischen Belastungen auf die jeweilige Komponente abgeschätzt werden können.

2.2 CDT-Prozessablauf und -optimierung zur Nahechtzeitumsetzung

Die photogrammetrische Rekonstruktion kann, insbesondere bei einer hohen Anzahl von zu verarbeitenden Fotoaufnahmen, einen umfangreichen Zeitaufwand und umfangreiche Rechenressourcen erfordern. Eines der Hauptziele des CDT liegt in der Nahechtzeit-Datenerfassung und -verarbeitung, um kurzfristig und mit minimalem Vorbereitungsaufwand vor einem Hochwasserereignis potenziell bewegliches Material identifizieren zu können. Zu diesem Zweck wurden diverse Optimierungsmaßnahmen durchgeführt:

- Ermittlung zeiteffizienter Aufnahmeparameter des UAV-Systems (DJI Phantom 4 RTK) zur hochgenauen photogrammetrischen Nahechtaufnahme; Aufbau der internen Recheninfrastruktur (Kögel & Carstensen, 2024)
- Ermittlung von Nahechtzeit-SfM-Berechnungsparametern (Kögel & Carstensen, 2025)
- Optimierung der Rechenressourcen (Anzahl der CPU-Einheiten n_{CPU} je Rechenvorgang), Berechnungsprozesse und -abläufe (Kögel & Carstensen, 2025)

Aufbauend auf den Optimierungsuntersuchungen in Kögel und Carstensen (2024, 2025) wurde das CDT entwickelt, dessen Berechnungsprozess mit den parallelisierten Abläufen und optimierten Prozessorenanzahlen n_{CPU} in Abbildung 3 dargestellt ist.

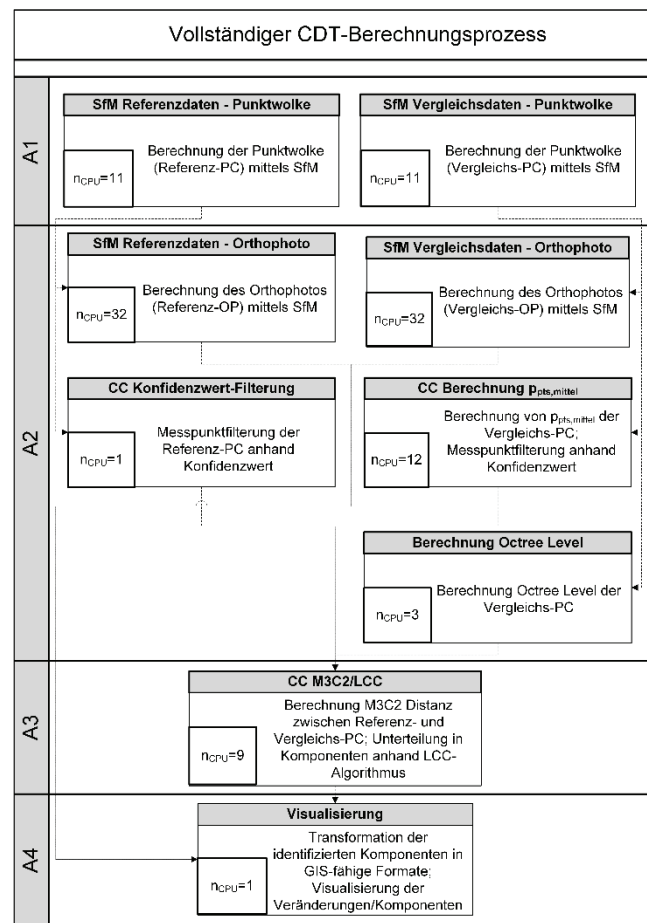


Abbildung 3 Prozesse des CDT mit Spezifikation der optimierten Anzahl der zu nutzenden Prozessoren n_{CPU} und der parallelisierten Abläufe A1-4 (nach Kögel & Carstensen, 2025, übersetzt)

3 Ergebnisse

3.1 Visualisierung der detektierten Veränderungen

Die mittels CDT detektierten Veränderungen werden in einem Bericht sowohl anhand der Lage der Komponenten im Untersuchungsgebiet als auch deren Koordinatenangaben präsentiert. Die Veränderungsbereiche werden durch Orthophotos der Referenz- und Vergleichsaufnahmen dargestellt. Durch die Überlagerung mit hydraulischen Kenngrößen aus bestehenden 2D-HN-Simulationsergebnissen (hier HQ100) lässt sich eine vereinfachte Abschätzung des möglichen Mobilisierungspotenzials ableiten. Die Vergleichbarkeit zwischen Referenz- und Vergleichsdatensätzen wird mittels einer Gauß-Verteilungsfunktion bewertet (Abb. 4).

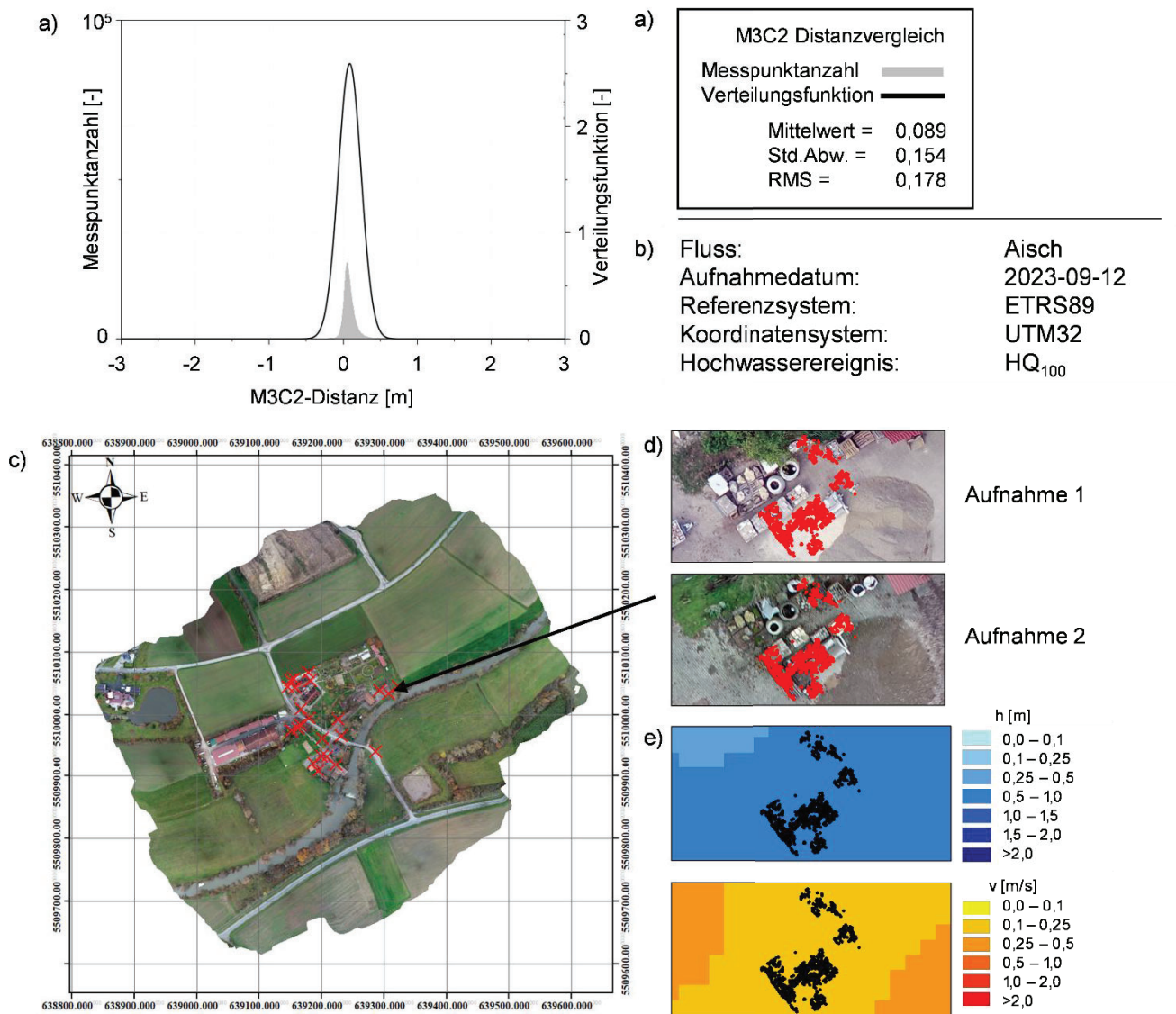


Abbildung 4 Auszug des Berichts zur Veränderungsanalyse; a) Normalverteilungsfunktion zur Einschätzung der Vergleichbarkeit von Datensatz 1 und 2; b) Allgemeine Informationen; c) Lokalisierung aller detektierten Veränderungen im Untersuchungsgebiet; d) Darstellung einer kategorisierten Veränderung anhand der Orthophotos aus Aufnahme 1 und 2; e) Überlagerung der Komponente mit 2D-HN-Berechnungsergebnissen (HQ100); (nach Kögel & Carstensen, 2025, übersetzt und adaptiert)

3.2 Berechnungsoptimierung

Durch Optimierung der SfM-Berechnungsparameter, der Berechnungsabläufe (Abb. 3) und der Auslastung des Hochleistungsrechners konnte, im Vergleich zu

standardmäßig genutzten Einstellungen, eine Reduktion der Gesamtberechnungsdauer um 62,3 % erreicht werden. Die Berechnungsdauern der CDT-Teilprozesse für die Standard- und optimierten Parameter werden in Abb. 5 abgebildet.

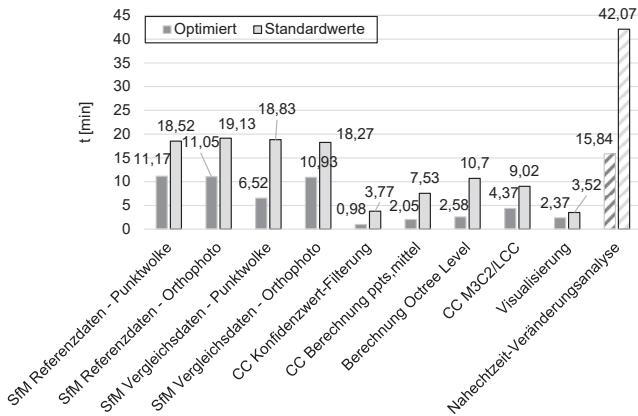


Abbildung 5 Berechnungsdauern der Teilprozesse des CDT unter Anwendung von Standard- und optimierten Parametern (nach Kögel & Carstensen, 2025)

4 Diskussion

4.1 Bewertung und Kategorisierung detektierter Veränderungen

Im Untersuchungsgebiet an der Laufer Mühle konnten durch die mit dem CDT durchgeführte Veränderungsanalyse unterschiedliche Komponenten identifiziert werden. In Abb. 6 werden beispielhaft drei dieser Veränderungen (Baumaterial, Stahlcontainer/Schutt, Kraftfahrzeug) bei der Datenaufnahme 1 und 2 und im Zusammenhang mit den numerischen Berechnungsergebnissen eines HQ100 dargestellt.

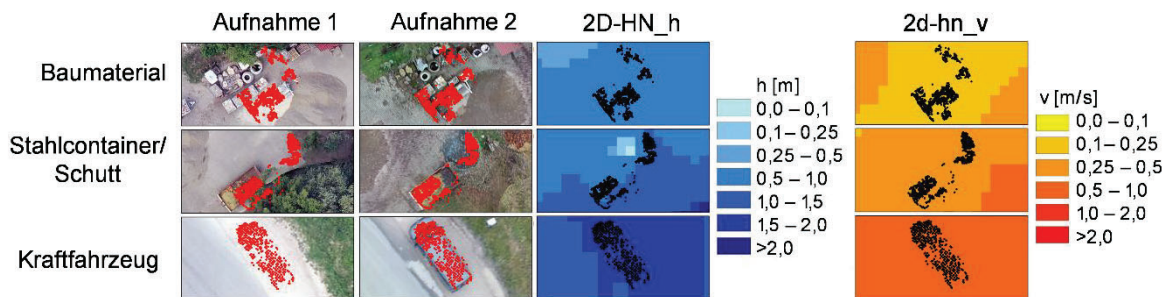


Abbildung 6 Mittels CDT detektierte Veränderungen/Komponenten und deren Wechselwirkung mit durch 2D-HN-Simulationen ermittelten hydraulischen Parametern (nach Kögel & Carstensen, 2025, übersetzt)

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere schwimmfähige Materialien ein relevantes Gefährdungspotenzial darstellen. Im Bereich von Baumateriallagerungen konnten potenzielle Schwimmstoffe, insbesondere Holzpaletten, identifiziert werden. Diese befinden sich entsprechend der numerischen Ergebnisse in Bereichen mit Wassertiefen von etwa 0,5 bis 1,0 m und vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten von ca. 0,1 bis 0,25 m/s. Auch wenn diese hydraulischen Bedingungen für den sohnahen Feststoff- und Materialtransport als gering einzustufen sind, ist mit einer Mobilisierung schwimmfähiger Materialien unter diesen Randbedingungen zu rechnen.

Insgesamt wird deutlich, dass insbesondere schwimmfähige Objekte frühzeitig identifiziert und gesichert werden sollten, da sie bereits unter moderaten Abflussbedingungen mobilisiert werden und somit ein erhebliches Risiko für Verkläusungen darstellen können. Aber auch Objekte wie Kraftfahrzeuge können aufgrund signifikanter Wassertiefen und moderaten Fließgeschwindigkeiten, wie sie beim hier dargestellten HQ₁₀₀-Hochwasserereignis auftreten (in manchen Bereichen Wassertiefe = 1,5 m – 2,0 m,

Fließgeschwindigkeit = 0,5 m – 1,0 m), mobilisiert werden. Eine exakte Abschätzung des Geschiebetransports ist in diesem Zusammenhang nicht möglich, da dieser neben der Fließtiefe und -geschwindigkeit stark von objektspezifischen Eigenschaften wie Dichte und Form sowie den Untergrundbedingungen abhängig ist. Im Falle des Stahlcontainers ist aufgrund seiner Materialeigenschaften nicht von einer Mobilisierung auszugehen.

4.2 Erfassung von Langzeitveränderungen

Die Veränderungsdetektion mittels CDT basiert auf dem Vergleich zweier multitemporaler Datensätze, wobei Differenzen über Distanzanalysen zwischen den jeweiligen Punktwolken ermittelt werden. Auf diese Weise lassen sich insbesondere solche Veränderungen identifizieren, die im Zeitraum zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten entstanden sind, also kurzfristige, dynamische Prozesse widerspiegeln.

Dieser Ansatz ist jedoch primär auf tatsächlich eingetretene Veränderungen beschränkt. Objekte, die zwar potenziell mobilisierbar sind, sich jedoch zwischen den

Aufnahmezeitpunkten nicht bewegt haben, werden durch die reine Differenzanalyse nicht erfasst. Um auch diese relevanten Objekte in die Bewertung einzubeziehen, ist eine gezielte Aufbereitung und Analyse des Referenzdatensatzes erforderlich. Dabei müssen potenziell gefährdende, bewegliche Materialien unabhängig von einer tatsächlichen Positionsänderung identifiziert und klassifiziert werden, um deren Risiko im Hochwasserfall bewerten zu können.

4.3 Übertragbarkeit auf andere Untersuchungsgebiete und Messsysteme

Das CDT basiert auf der Datenerfassung mittels handelsüblicher UAV-Systeme und optischer Sensorik in Form von RGB-Kameras. Eine Übertragbarkeit auf andere Messsysteme ist insbesondere über die Berücksichtigung der Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) gewährleistet. Durch eine Anpassung der Flughöhe lassen sich auch bei variierender Sensorauflösung vergleichbare Ergebnisqualitäten erzielen, sodass die Aussagekraft der Untersuchungen grundsätzlich reproduzierbar ist.

Die bisherige Anwendung des CDT beschränkt sich auf das Untersuchungsgebiet an der Laufer Mühle. Da sich Fließgewässer jedoch hinsichtlich ihrer morphologischen und anthropogenen Rahmenbedingungen, etwa Infrastruktur, Vegetation oder Ausdehnung der Überflutungsflächen, teils deutlich unterscheiden, ist eine Anpassung der Methodik erforderlich. Diese kann aktuell insbesondere über Parameter wie das Mindestvolumen der zu detektierenden Objekte erfolgen.

Durch diese Parametrisierungsansätze weist das CDT eine hohe Flexibilität auf und ist grundsätzlich auf unterschiedliche Untersuchungsgebiete und Messsysteme übertragbar. Eine weiterführende Anwendung und Validierung unter variierenden Umgebungsbedingungen wird für zukünftige Untersuchungen empfohlen.

5 Fazit & Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem CDT eine kurzfristige Risikobewertung möglich ist. Unter Berücksichtigung einer Flugzeit von ca. 15 Minuten, einer Logistikzeit (Rückkehr UAV, Akkuwechsel, Auslesen der Speicherkarte) von etwa 5 Minuten sowie einer Verarbeitungsdauer von rund 16 Minuten konnte die Analyse im Untersuchungsgebiet innerhalb von insgesamt etwa 36 Minuten durchgeführt

werden. Dabei wurden verschiedene Veränderungen identifiziert, von denen ein Großteil unter den hydraulischen Bedingungen eines HQ₁₀₀-Ereignisses voraussichtlich nicht mobilisiert wird. Gleichzeitig konnten jedoch auch potenzielle Vulnerabilitäten erkannt werden, deren frühzeitige Beseitigung zur Schadensreduktion beitragen kann.

Die Anwendung mit einer UAV-Plattform wurde in einem kleinräumigen Gebiet demonstriert, erfordert jedoch im Ereignisfall eine Ausweitung auf größere Fließgewässerabschnitte. Hierfür eignen sich insbesondere Starrflügel-UAVs, die eine effiziente großräumige Datenerfassung ermöglichen, deren Einsatz jedoch, insbesondere im Betrieb außerhalb der Sichtweite (BVLOS), regulatorischen Einschränkungen unterliegt. Alternativ kann der Einsatz bemannter Luftfahrzeuge in Betracht gezogen werden, wenn gleich dies mit einer geringeren operativen Flexibilität verbunden ist.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial des CDT für eine UAV-gestützte Nahechtzeit-Risikoanalyse.

Nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungen setzt die Anwendung des CDT einen photogrammetrisch rekonstruierten Referenzzustand voraus. In zukünftigen Studien soll geprüft werden, inwieweit die Methode auch unter Verwendung frei verfügbarer Geländedaten, wie beispielsweise des DGM1, anwendbar ist. Auf diese Weise könnten Untersuchungen künftig ohne vorherige Vorbereitungsmaßnahmen auf eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsgebiete übertragen werden.

6 Literaturverzeichnis

- Agisoft LLC (2022). Metashape Python Reference: Release 1.8.4. https://www.agisoft.com/pdf/metashape_python_api_1_8_4.pdf
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., . . . Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Eltner, A., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Karrasch, P., Klingbeil, L., Stöcker, C. & Rovere, A. (Hrsg.). (2022). UAVs for the environmental sciences: Methods and applications. wbg Academic.
- EU. (2007). Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von

- Hochwasserrisiken: (ABl. L 288 vom 06.11.2007, S. 27). Europäische Union.
- Girardeau-Montaut, D. (2015, 12. Februar). Label Connected Components. https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Label_Connected_Components
- Heimerl, S. (2018). Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-21839-3>
- Kögel, M. & Carstensen, D. (2024). Using structure from motion for analyzing change detection and flood events in the context of flood preparedness: a case study for the Laufer Muehle area at the Aisch river in Germany for conducting near real-time analyses. Applied Geomatics. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.1007/s12518-024-00561-y>
- Kögel, M. & Carstensen, D. (2025). Near real-time change detection tool for photogrammetric flood preparedness. Environmental monitoring and assessment, 197(2), 129. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13597-9>
- Kögel, M., Feile, L., Möldner, F. & Carstensen, D. (2025). SSegRef2Surf—Near Real-Time Photogrammetric Flood Monitoring and Refinement of Classified Water Surfaces. Remote Sensing, 17(8), 1351. <https://doi.org/10.3390/rs17081351>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- LAWA. (1995). Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz – Hochwasser – Ursachen und Konsequenzen.
- LAWA. (2010). Empfehlungen der Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten.
- LAWA. (2018). Empfehlungen der Bund/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten.
- Müller, U. (2010). Hochwasserrisikomanagement: Theorie und Praxis. Vieweg+Teubner.
- Nürnbergluftbild. (2021). Die Laufer Mühle an der Aisch: Hochwasser am 10. Juli 2021. <https://www.nuernbergluftbild.de/en/luftbilder/5329-die-laufer-muehle-an-der-aisch-hochwasser-am-10-juli-2021>
- Patt, H. & Gonsowski, P. (2011). Wasserbau (7. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11963-7>
- Wasserwirtschaftsamt Nürnberg. (2021). Luftbilder Hochwasserereignis Februar 2021.

BIM2water – 3D Bestandsmodelle für den Wasserbau im Konflikt zwischen der BIM-Methode und den Genauigkeitsanforderungen für die Fertigung oder hydraulische Modelle

Lars Sörensen¹ & Theo Haschke²

Zusammenfassung

Im Stahlwasserbau ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für Bestandsmodelle als Grundlage für die Sanierung und Instandhaltung. Auf der einen Seite werden BIM-konforme Modelle der Bauwerke benötigt, um die Bauwerkssanierung mit BIM-Werkzeugen zu planen. Auf der anderen Seite gibt es Bereiche, in denen Grundlagen für hydraulische Modelle zur Optimierung der Anlagen benötigt werden. Hinzu kommen im Stahl-Wasserbau Bauteile, die neu gefertigt und ersetzt werden müssen. Für die Dimensionierung und Fertigung sind für den Anschluss von Stahlbauteilen an die Betonkonstruktionen Genauigkeiten im mm-Bereich erforderlich. Wenn es um den Stahlbau selbst geht, müssen zum Teil sogar Toleranzen im Bereich von 10tel Millimetern erfüllt werden.

Schlagwörter Laserscanning · Bestandsmodelle · Wasserbau · BIM-Methode · Anforderungen · Genauigkeit · Fertigung

1 Einführung

Im Wasserbau erfolgt die Planung nicht nur in BIM-Plattformen, sondern auch in Stahlbau- und Industriesoftware. Einige Konstruktionen erfordern hierbei die Verwendung von Freiformflächen. Das gängige Austauschformat IFC unterstützt zwar in den aktuellen Versionen theoretisch Freiformen, aber fast keine BIM-CAD-Plattform übersetzt diese in geeigneter Art und Weise fehlerfrei, ohne dass sich die Geometrie der CAD-Objekte verändert oder in Polygonnetze auflöst. In einer Durchführbarkeitsstudie haben wir in Vorbereitung auf unser aktuelles Forschungsprojekt Lösungsansätze untersucht, die wir in den kommenden zwei bis drei Jahren in Zusammenarbeit mit einem Softwarepartner und zwei Forschungspartnern bearbeiten werden.

1.1 BIM2water

Grundlage dieses Beitrags ist die Durchführbarkeitsstudie „BIM2water“ in Vorbereitung auf das Forschungsprojekt BIM4water. In Zusammenarbeit mit Lupos3D haben wir auf Grundlage bestehender Aufträge zur Digitalisierung von Bauwerken in der Wasserwirtschaft Lösungsansätze für die Nutzung von BIM im Hafen- und Wasserbau untersucht.

Die erforderliche Arbeitsweise führt zu einer Kombination aus BIM-Bestandsmodellen und Fachmodellen für die

Fertigung und den Stahlbau, bei denen dem aus aktueller Sicht das IFC-Format nicht ausreicht.

1.2 BIM4water

In Zusammenarbeit mit Lupos3D sowie der HTW Dresden und Bauhaus-Universität Weimar als Forschungspartner bereiten wir ein Forschungsprojekt vor, um praxistaugliche Lösungen für den Stahlwasserbau in Kombination aus BIM-fähigen Bestandsmodellen mit weiteren Konstruktionsmodellen z.B. für Stahlbau und Sonderkonstruktionen mit Fertigungstoleranzen zu erarbeiten. Wir erhalten Unterstützung von der GEOkomm und gefördert wird diese Initiative vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Referat Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM).

2 Stahlwasserbau

Viele der Infrastrukturbauwerke der Hafen- und Wasserwirtschaft stammen aus den 1970er bis 1990er Jahren und befinden sich in unterschiedlichem Zustand. In den meisten Fällen liegen oft nur Papierpläne vor. Seit der Errichtung haben Modernisierungsmaßnahmen, Umbauten und Erweiterungen die Bauwerke verändert und es fehlt oft an digitalen und dreidimensionalen Dokumentationen, die heutzutage für die Planung und Instandsetzung erforderlich sind.

¹ Scan3D / Dipl.-Ing. TU-Berlin, Franklinstr. 28-29, 10587 Berlin, D, E-Mail: soerenen@scan-3d.com

² Scan3D / M.Sc. TU-Dresden, Kamenzer Str. 39, 01099 Dresden. 28-29, D, E-Mail: haschke@scan-3d.com

Die Anforderungen an die Bestandsmodelle sind unterschiedlich. Sie reichen von vereinfachten Modellen der Bauwerke, über verformungsgetreue Modelle für den Stahlbau bis hin zu Anlagenmodellen mit Maschinenbautoleranzen. Somit kommen unterschiedliche Sensoren vom terrestrischen Laserscanner, über Spezialscanner wie den Surphaser und handgeführte Nahbereichsscanner zum Einsatz.

Das 3D-Laserscanning findet Anwendung zur Bestandsdigitalisierung von Schleusen, Wehranlagen, Pumpwerken, Düchern, Sperrwerken, Wasserkraftwerken und weiteren. In der Regel bestehen folgende Anforderungen an Bestandsmodelle für die Sanierungsplanung im Wasserbau.

- a) Eine Grundlage sind BIM-konforme Modelle für die Planung der Sanierung und Instandhaltung von Stahlbeton und Mauerwerk. Hier genügen oft generalisierte BIM-Bestandsmodelle als geometrisches Abbild zzgl. der erforderlichen Parameter und semantischen Informationen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.
- b) Zusätzlich werden Grundlagen für die Ausführungsplanung sowie die Bauteilherstellung benötigt. Hierfür erfordern die CAD-Modelle Fertigungstoleranzen inkl. einer nachvollziehbaren und verlässlichen Dokumentation der Genauigkeit.
- c) Als letztes werden Grundlagenmodelle für hydraulische Berechnungen benötigt. Die CAD-Modelle sollen parametrisierbar oder bereits parametrisch sein sowie eine besonders hoher Genauigkeit haben, die nachzuweisen ist.

2.1 Anforderungen

Die Planung im Stahlwasserbau erfolgt nicht nur in BIM-Plattformen, sondern es wird Stahlbau- und Industriesoftware eingesetzt, die in der Lage ist mit Bestandsdaten von verformten oder gekrümmten Bauteilen umgehen zu können.

Höhere Genauigkeiten als mit BIM-Werkzeugen können am einfachsten durch die Verwendung von Freiformflächen wie NURBS (Hughes et al.; 2019) erreicht werden. Die Flächenrückführung auf Grundlage von 3D-Punktwolken haben wir bereits im letzten FuE-Projekt in Zusammenarbeit mit der fokus GmbH Leipzig und der TU Dresden als Forschungspartner in Teilen automatisiert. (Lordick et al.; 2023)

Das Austauschformat IFC für BIM-Planungsmodelle unterstützt ab Version 4.3 zwar Freiformflächen, allerdings ist der Datenaustausch nahezu nicht möglich. Die vorhandenen Werkzeuge in den proprietären CAD-Plattformen z.B. Morph in ArchiCAD, Sweep in Revit oder Parasolid in VectorWorks ermöglichen zwar die Abbildung gekrümmter

Objekte, aber keine BIM-CAD-Plattform unterstützt den Im- und Export von Freiformflächen einwandfrei. Mindestens geht die Parametrik verloren oder es findet eine Auflösung in Vermaschungen statt. Ein in unserer Studie untersuchter Lösungsansatz ist die Nutzung von Plattformen zur direkten Modellierung in NativeIFC (Postle et al., 2022). Die einzigen auffindbaren Plattformen sind BonsaiBIM als Blender-Plugin und FreeCAD. Beide sind aber nur eingeschränkt praxistauglich und können im jetzigen Entwicklungsstadium nicht für kommerzielle Bauvorhaben verwendet werden.

Die in folgender Tabelle dargestellten CAD-Programme zeigen die Möglichkeiten des Datenaustauschs für Freiformen über die IFC-Schnittstelle. Hieraus wird ersichtlich, dass derzeit kein einwandfrei funktionierender Austausch möglich ist und somit über andere Wege nachgedacht werden muss.

FREIFORM-FLÄCHEN	proprietäre Werkzeuge	NURBS	Export	Import
Allplan	„Mantel“	nein	nein	IFC
ArchiCAD	„Morph“	nein	nein	Rhino-Plugin
Bonsai BIM	NURBS	ja	IFC	IFC
BricsCAD BIM	„Surface“	nein	teilweise	Rhino-Plugin
FreeCAD	NURBS	ja	IFC	IFC
Microstation	„B-Spline“	teilweise	teilweise	teilweise
Revit	„Sweep“	nein	nein	Rhino-Plugin
VisualArq (Rhino)	NURBS	ja	IFC	IFC

keine Unterstützung
 eingeschränkt möglich
 vollständig unterstützt

Abbildung 1 Auswahl BIM-fähiger CAD-Plattformen – Unterstützung von NURBS über IFC

FREIFORM-FLÄCHEN	proprietäre Werkzeuge	NURBS	Export	Import
Allplan	„Mantel“	nein	nein	IFC
ArchiCAD	„Morph“	nein	nein	Rhino-Plugin
Bonsai BIM	NURBS	ja	IFC	IFC
BricsCAD BIM	„Surface“	nein	teilweise	Rhino-Plugin
FreeCAD	NURBS	ja	IFC	IFC
Microstation	„B-Spline“	teilweise	teilweise	teilweise
Revit	„Sweep“	nein	nein	Rhino-Plugin
VisualArq (Rhino)	NURBS	ja	IFC	IFC
Gemetry Gym	NURBS	ja	IFC	IFC

Abbildung 2 Genauigkeit in Abhängigkeit der Bauteile

Die obige Tabelle stellt die im Stahlwasserbau üblichen Genauigkeitsanforderungen in Abhängigkeit der Bauteile dar.

Die Gesamtfehler beschreiben die zulässige Abweichung des Modells von der gebauten Realität. Sie sind zu untersuchen und zu dokumentieren.

2.2 Ablauf

2.2.1 Bestandsvermessung

Zu Beginn einer Bestandsvermessung mit erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit ist eine Prüfung der Kalibrierung durchzuführen. Bei Bedarf kann je nach Scanner eine mehrlagige „Nullmessung“ zur Kontrolle und Korrektur von Parametern zur Verbesserung der Kalibrierung erfolgen.

Eine Prüfung der systematischen Fehler auf unterschiedlichen Oberflächen ist in vielen Fällen sinnvoll. Diese hängt vom ausgewählten Scanner und von der Reflektivität der Oberflächen ab.

2.2.2 Datenaufbereitung

Je nach verwendeter Software können beim Einlesen der Rohdaten qualifiziert konfigurierbare Filter angewendet werden. Voraussetzung ist aber das direkte Einlesen von Scanner-Rohdaten und der vorherige Scan mit deaktivierten Filtern der Scannerhersteller, was z.B. bei Scannern von Faro|Creaform oder Z+F möglich ist. Die Software LupoScan ermöglicht die Anwendung konfigurierbarer Filter in Abhängigkeit der Genauigkeitsanforderung. Es erfolgt darüber hinaus die subvoxelgenaue Messung von Zielmarken mit gewichteter Überbestimmung des Zentrums. Diese Kontrolle findet auch beim Messen natürlicher Punkte im Panoramabild des Scans statt.

Für eine besonders kontrollierte Orientierung eignet sich Scantra, die lokale Ausrichtung wird aufgrund einer ebenenbasierten Registrierung mit hunderten bis tausenden von Merkmalen „subvoxelgenau“ berechnet. Im Anschluss erfolgt die Netzausgleichung über alle Scans auf Grundlage geschlossener und überbestimmter Polygonzüge.

Für das Berechnen „verschmolzener“ Punktwolken stehen in metigo3D Werkzeuge zur hierarchisierten Filterung auf Basis der Entfernung, des Eintreffwinkels und der Intensität zur Verfügung. Die so berechneten Gesamtpunktwolken ermöglichen eine besonders präzise Flächenrückführung.

2.2.3 Modellierung

Grundlage für die Modellierung ist die „saubere“ Punktwolke. In Kombination aus LupoScan und Scantra kann eine Standardabweichung der Registrierung im Submillimeter-Bereich erreicht werden.

Zur Modellierung verfügt Rhinoceros über Werkzeuge zur Erstellung ausgleichender Kurvennetzwerke zum Aufbau von Freiformflächen. Der Vorgang lässt sich bei

mathematisch beschreibbaren Oberflächen als subvoxelgenaue Modellierung bezeichnen.

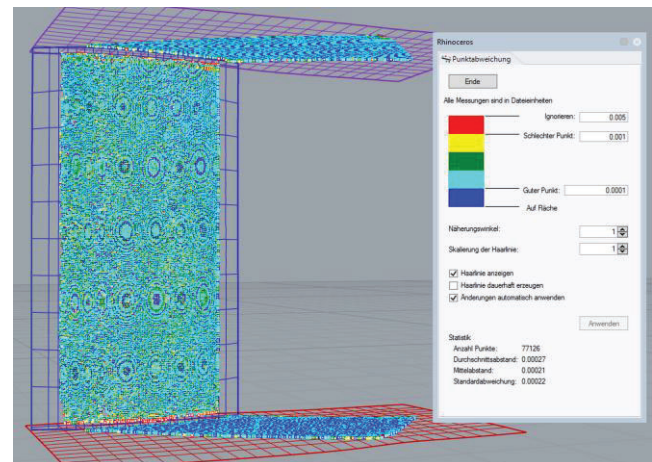


Abbildung 3 Vergleich Punktwolke ↔ Modell in Rhinoceros

Im obigen Screenshot wird ein Screenshot einer Punktwolke mit Qualitätsprüfung der rückgeführten Freiformfläche gezeigt. Die Standardabweichung beträgt hier 0,2 mm und der maximale Fehler beträgt 0,5 mm.

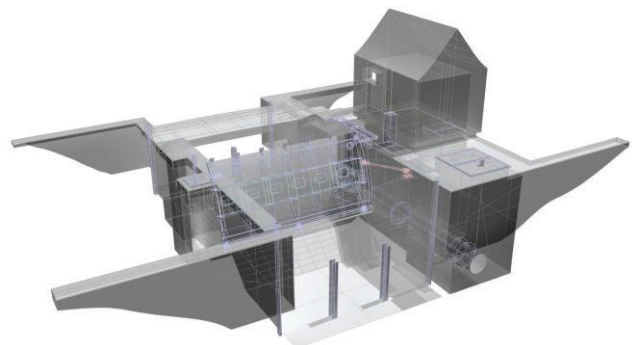


Abbildung 4 Digitales Bestandsmodell einer Wehranlage

Am Fallbeispiel des oben abgebildeten Bestandsmodells einer Wehranlage konnte die im folgenden dargestellte Genauigkeit erreicht werden.

In die Beurteilung des resultierenden Gesamtfehlers gehen alle auftretenden Fehler mit ein.

- Systematischer Fehler Laserscanner: hier 1 mm (im Nahbereich)
- Registrierung in Scantra: hier $\sigma_t < +/- 1$ mm
- Modellqualität: Hier Punktwolke ↔ Abweichung $< +/- 0,25$ mm

$$\text{Gesamtfehler} = \sqrt[3]{\text{Messsystem}^2 + \text{Registrierung}^2 + \text{Modellierung}^2}$$

Der Gesamtfehler beträgt hier 1,4 mm, wobei die Toleranzen auf den Stahlbauelementen geringer ausfallen.

2.2.4 CAD-Lösungen

In Rahmen unserer Durchführbarkeitsstudie wurde ein und dasselbe Modell in unterschiedlichen CAD-Plattformen aufgebaut, um den Austausch zwischen unterschiedlichen Softwarelösungen und die erreichbare Genauigkeit zu untersuchen. Verwendet wurden FreeCAD, BonsaiBIM in Blender, VisualArq in Rhino, Microstation, Revit, ArchiCAD und Allplan verwendet. Die höchste Genauigkeit konnte erwartungsgemäß in Rhinoceros ohne BIM-Plugin erreicht werden, wodurch das Modell im Übergabeformat STP nicht oder nur eingeschränkt BIM-fähig ist.

3 Anregung

Es ist von großer Bedeutung, dass der einheitliche Standard IFC von allen Plattformherstellern vollumfänglich unterstützt wird. So lange das nicht der Fall ist wird der für das Building Information Modeling erforderliche Austausch aller an der Planung und Ausführung Beteiligten nur mit erheblichen Einschränkungen funktionieren.

Gleichzeitig werden offene CDE-Server zum Austausch und zur Vernetzung aller Bestands- und Planungsdaten benötigt. Wird diese Umsetzung nicht erreicht, kann die Digitalisierung des Bauwesens zu einer negativen Entwicklung unserer Baukultur führen.

4 Ausblick

Unser Forschungsprojekt BIM4water wird zu einer Kombination von BIM-Bestandsmodellen mit dem Fachmodell „Fertigung“, „Stahlbau“ und „Maschinenbau“ führen. IFC-Modelle alleine werden nicht ausreichen, wofür es zwei

Gründe gibt. Erstens ist ein Austausch von Daten über die IFC-Schnittstelle bei präziser Modellierung mit Freiformflächen nicht möglich. Und zweitens kann Fachplanungssoftware für Stahl- und Anlagenbau in den meisten Fällen keine IFC-Daten verarbeiten.

Wir werden gemeinsam neue Werkzeuge für LupoScan und Rhinoceros konzipieren und entwickeln. Im Vordergrund steht die bauteilorientierte Segmentierung von Punktwolken und die Automatisierung des Modellaufbaus durch geometrische Primitive und die Teilautomatisierung für Freiformflächen.

Um diese Ziele umzusetzen, steht die Entwicklung einer Open CDE (Common Data Environment) mit einem Multimodellansatz im Vordergrund. Die CDE soll einen Open-BIM-Server, einen STP-Server und einen Punktwolkenserver beinhalten. Eine vereinheitlichte Plattform mit Viewer soll auf die Daten zugreifen, um erforderliche Beziehungen zwischen IFC, STP und Punktwolken definieren zu können. Die Entwicklung von Schnittstellen wird hierbei den Zugriff aus proprietären Plattformen ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- Thomas J.R. Hughes, Timon Rabczuk, Yuri Bazilevs, Stéphane P.A. Bordas; (2019); Non-Uniform Rational B-Splines. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/non-uniform-rational-b-splines>
- Daria Dordina, Cyrill Milkau, Zlata Tošić, Daniel Lordick, Danilo Schneider (2023); Point Cloud to True-to-Deformation Free-Form NURBS; Advances in Architectural Geometry, pp.125-136; <https://www.researchgate.net/publication/374223165>
- Bruno Postle, Dion Moulton; Native IFC, Whitepaper (2022); <https://www.researchgate.net/publication/374117871>

Eisenbahngeodäsie: Mobile Mapping / Digitaler Zwilling mit ± 5 mm bei 80 km/h

Volker Wegener¹

Zusammenfassung

Für die Deutsche Bahn sind aktuelle Bestands- und Zustandsdaten der Infrastruktur ein strategisches Instrument zur Erfüllung ihrer Kernziele: Sicherheit, Effizienz, Verfügbarkeit, Kundenzufriedenheit, Nachhaltigkeit und Innovationsfähigkeit. Klassische Aufnahmemethoden kommen aufgrund Fachkräftemangel, hoher Streckenauslastung und Kosten an ihre Grenzen. Fahrzeuggebundene Multi-Sensor-Systeme (MSS, Mobile Mapping) ermöglichen Messungen im regulären Zugbetrieb mit einer Genauigkeit von ± 5 mm. Der Beitrag beschreibt Rahmenbedingungen und Workflow von der Vorbereitung über die Befahrung bis zur geodätischen und topografischen Auswertung sowie die webbasierte Bereitstellung großer Punktwolken- und Bilddatensätze. Zwei Innovationsbausteine – kinematische Prüfung/Koordinierung von Gleisvermarkungspunkten (GVP) und hochauflösungsbildgestützte Weichenvermessung – zeigen, wie Prozesse weiter automatisiert und Risiken für Personal reduziert werden können.

Schlagwörter Mobile Mapping · Multi-Sensor-System · Bahnvermessung · Digitaler Zwilling · Gleisachse · Lichtraum

1 Einführung

Die sichere Durchführung des Eisenbahnbetriebs erfordert, dass die örtliche Position von Gleisen und Weichen über den Lebenszyklus hinweg den Planungen entspricht. Nur so können freigegebene Geschwindigkeitsprofile ausgeschöpft und Zwangspunkte (z. B. Bahnsteige, Brücken, Signalanlagen) mit ausreichenden Sicherheitsabständen passiert werden.

Terrestrische, tachymetrische Vermessungen sind hochgenau, erfordern jedoch den Aufenthalt im Gefahrenbereich und damit Sicherungsmaßnahmen und häufig Gleissperrungen. In einem stark ausgelasteten Netz führt dies zu hohen Kosten, langen Vorlaufzeiten und eingeschränkter Aktualität der Bestandsdaten.

Moderne fahrzeuggebundene Multi-Sensor-Systeme (MSS) schaffen Abhilfe: Sie kombinieren GNSS, IMU, LiDAR und Kameras und erfassen Infrastruktur im Regelbetrieb bei Geschwindigkeiten bis 80–100 km/h. Durch robuste Georeferenzierung im geodätischen Referenzrahmen sind Achs- und Objektbestimmungen mit Standardabweichungen im Bereich von 5 mm möglich.

2 Grundlagen der MSS-Bahnvermessung

MSS vereinen mehrere Sensorsysteme in einer Trägerplattform und erfassen Geometrie und Bildinformationen zeit- und lagekorreliert. Kernkomponenten sind:

- GNSS-Empfänger zur absoluten Positionierung im Referenzsystem
- IMU zur Bestimmung der Orientierung (Roll, Pitch, Yaw) und zur Trajektorienglättung
- LiDAR-Scanner zur hochdichten 3D-Geometrieaufnahme
- Kamera-/Panoramasysteme zur visuellen Interpretation und Objekterkennung (siehe Abb. 1)



Abbildung 1 MSS auf Trägerplattform, kombiniert mit Zusatzkameras und GV-Target (Beispiel).

¹ DataDEV GmbH, Herzog-Bernd-Str. 2–4, 29614 Soltau, Deutschland, E-Mail: wegener@datadev.de

Die Sensorfusion liefert georeferenzierte Punktwolken und Bilddaten, die für geodätische Auswertungen und für GIS/BIM-Anwendungen genutzt werden können.

3 Geodätisches Bezugssystem und Festpunktfeld

Die DB InfraGO nutzt das DB-Referenznetz (DB_REF) als geodätischen Referenzrahmen. Entlang der Strecken ist das Netz durch Grundnetzpunkte und Basispunkte verdichtet. Für hochpräzise Anwendungen werden Gleisvermarkungspunkte (GVP) als höchste Verdichtungsstufe genutzt; sie werden typischerweise an Oberleitungsmasten mit GV-Bolzen vermarket und liegen im Abstand von etwa 50–80 m. Für MSS-Befahrungen werden an den GVP dauerhaft erkennbare Targets montiert, um eine eindeutige Identifikation in Punktwolke und Bilddaten zu ermöglichen (siehe Abb. 2).

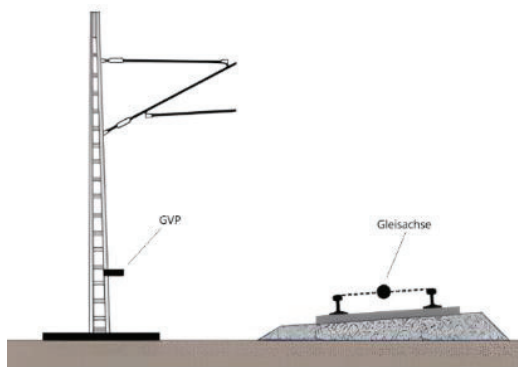


Abbildung 2 Prinzipielle Anordnung von GVP und Gleisachse (schematisch).

4 MSS-Befahrungen und Datenverarbeitung

Der Workflow gliedert sich in Vorbereitung, Befahrung, Trajektorienverarbeitung, Georeferenzierung, Punktwolkenvorverarbeitung sowie Auswertung und Bereitstellung.

Für Einsätze bei der DB sind Produktfreigaben erforderlich, die Zuverlässigkeit und Genauigkeit des Systems nachweisen. In der Verarbeitung werden GNSS- und IMU-Rohdaten per Post-Processing (u. a. mit Referenzstationsdaten) zu präzisen Trajektorien kombiniert (siehe Abb. 3). Anschließend werden die Punktwolken je Sensorlauf auf GVP/Targets referenziert und überlappende Befahrungen gemacht, um Konsistenz über lange Projektabschnitte herzustellen. Qualitätskontrollen (z. B. maximale Abweichungen zwischen Einzelbestimmungen) sind entscheidend, weil

Fehler in der Georeferenzierung unmittelbar zu systematischen Abweichungen in allen Folgeprodukten führen.

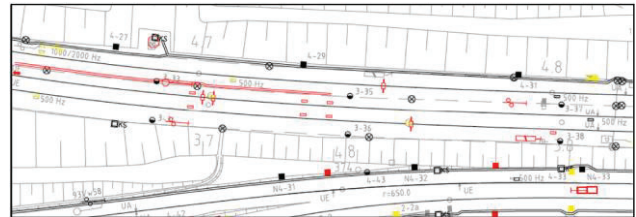


Abbildung 3 Beispiel einer bereinigten und klassifizierten Punktwolke (Auszug).

5 Standardauswertungen

5.1 Geodätische Auswertungen

Zentrale geodätische Ergebnisse sind die Ableitung der Gleisachse, die Erfassung von Zwangspunkten der Trassierung sowie die Berechnung von Profilen (Lichtraum, Engstellen, Vegetation).

5.1.1 Gleisachse

Die Gleisachse wird aus den Schienen in der Punktwolke abgeleitet. Dazu werden Messpunkte in definierten Intervallen (z. B. 3 m) bestimmt und Schienenprofile modellbasiert an die Punktwolke gefittet. Aus den Schienenoberkanten werden Lage, Höhe und Überhöhung ermittelt. Die Achspunkte dienen u. a. der Bestimmung von Soll-Ist-Abweichungen und der Planung von Gleisdurcharbeitungen (Dua).

5.1.2 Zwangspunkte der Trassierung

Zwangspunkte wie Bahnsteigkanten oder Brückenaufleger werden mit vergleichbaren Genauigkeitsanforderungen erfasst. Für Kantenbestimmungen werden aus der Punktwolke Flächenpunkte selektiert und ausgleichend modelliert; Schnittlinien liefern präzise Kantenverläufe. Änderungen an Zwangspunkten sind vor Instandhaltungsmaßnahmen kritisch, um Lichtraumverletzungen nach Gleisverschiebungen zu vermeiden.

5.1.3 Profile und Lichtraum

Aus Gleisachse und Objektpunkten werden Profile im lokalen Achssystem abgeleitet (siehe Abb. 4). Damit lassen sich Mindestlichtraum, absolute Grenzlinsen und spezielle Nachweise (z. B. Engstellen, Vegetation) effizient prüfen und dokumentieren.

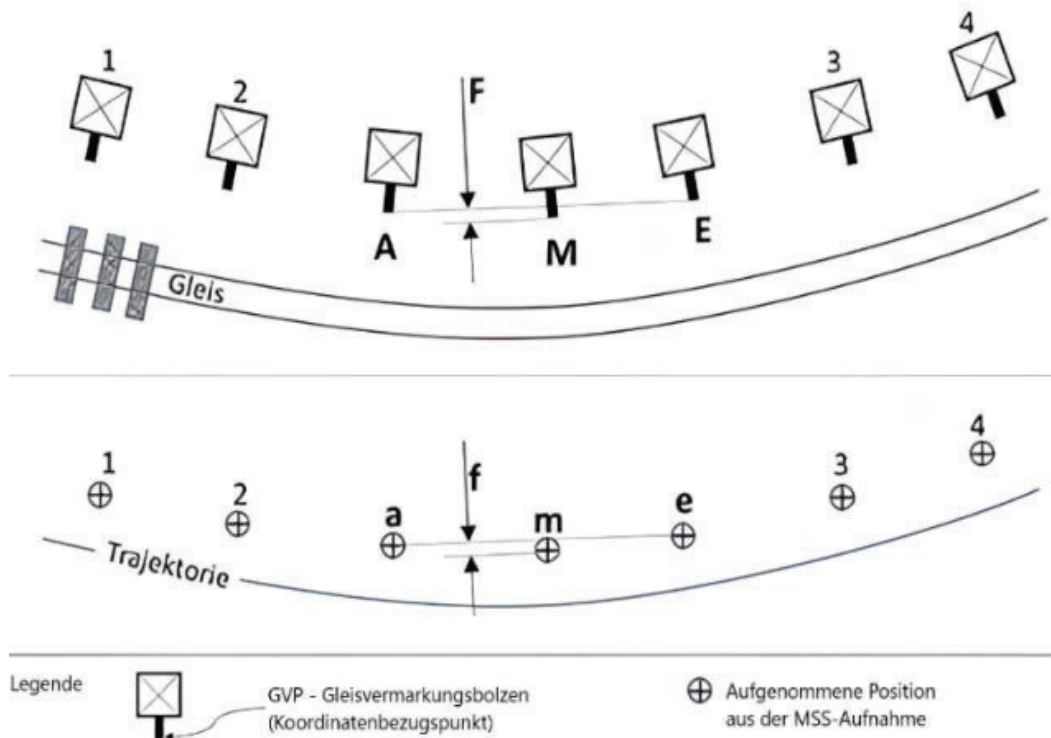


Abbildung 4 Lichttraumprüfung auf Basis von MSS-Daten (Beispielauswertung).

5.2 Topografische Auswertungen, GIS und BIM

Neben dem Fahrweg werden umgebende Assets (Signale, Masten, Bahnübergänge, Brücken, Tunnel, Wege usw.) aus der Punktwolke erfasst und attribuiert. Die Ergebnisdaten können als GIS- oder CAD/BIM-Objekte (u. a. GeoPackage/SQLite, DWG/DXF, IFC) bereitgestellt und mit Bestandsdaten (z. B. Kataster oder Netzdaten) integriert werden.

6 Datenbereitstellung über Web-Technologien

MSS-Projekte erzeugen sehr große Datenmengen (mehrere TB pro 100 km). Webbasierte Viewer ermöglichen den Zugriff ohne lokale Datenkopien und machen Punktwolken und Panoramen für eine breite Nutzergruppe verfügbar – vergleichbar in der Bedienung mit Street-View-Ansätzen, jedoch metrisch auswertbar. Mess- und Exportfunktionen unterstützen Planung, Bau und Betrieb.

7 Innovationen: kin-GV-PB und Weichenvermessung

7.1 Kinematische GVP-Prüfung und -Bestimmung (kin-GV-PB)

Die regelmäßige Prüfung des GVP-Festpunktfeldes ist geodätisch zwingend, wird klassisch aber mit aufwendigen terrestrischen Messungen durchgeführt. Der Ansatz „kin-GV-PB“ nutzt MSS-Daten selbst zur Detektion von Lage- und Höhenänderungen sowie zur Neukoordinierung über Abschnitte bis ca. 500 m, ohne Betreten des Gefahrenbereichs (siehe Abb. 5). Eine wandernde Sehne über benachbarte GVP erlaubt die robuste Identifikation signifikanter Abweichungen, die nur in Ausnahmefällen terrestrisch nachzuprüfen sind.



Abbildung 5 Prinzip der kin-GV-PB (schematisch).

7.2 Weichen-Vermessung mit Zusatzbilddaten

Weichenaufnahmen sind heute häufig manuell-tachymetrisch, weil markante Kennpunkte (Bohrungen/Körner) in Standard-Punktwolken teilweise nicht sicher identifizierbar sind. Durch zusätzliche hochauflösende, kurz belichtete Bildaufnahmen (z. B. nahe am Gleis) und strenge Synchronisierung mit dem MSS können Weichenanfänge/-enden, Zungenspitzen usw. im Bild identifiziert und metrisch über die referenzierte Punktwolke bestimmt werden (siehe Abb. 6). So lassen sich die Genauigkeitsanforderungen für absolute und relative Weichenmaße einhalten und Risiken sowie Kosten deutlich reduzieren.

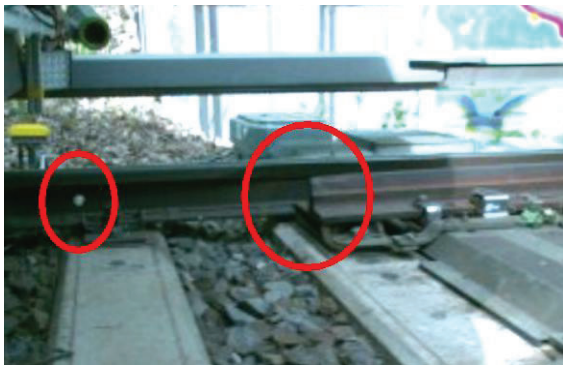


Abbildung 6 Identifikation eines Weichenmerkmals in hochauflösenden Bilddaten (Beispiel).

8 Aktuelle Entwicklungen 2025/2026

Die Digitalisierung der Schieneninfrastruktur gewinnt weiter an Dynamik. DataDEV berichtet Ende Januar 2026 über einen erstplatzierten Zuschlag in einem Rahmenvertrag der DB zur Digitalisierung der Bahninfrastruktur, u. a. für topografische Aufbereitung als Planungsgrundlage (BIM) und die Bereitstellung eines Punktwolken-Viewers (DataDEV, 2026).

Parallel dazu betont die DB in ihrem Zwischenbericht 2025 den hohen Bau- und Erneuerungsumfang im Netz im Rahmen des Restrukturierungsprogramms („S3“) und die Notwendigkeit, Infrastruktur- und Betriebsqualität nachhaltig zu verbessern (Deutsche Bahn, 2025). Solche Programme erhöhen den Bedarf an schnellen, sicheren und hochgenauen Bestandsdaten für Planung, Bauphasenkoordination und Instandhaltung.

Übergreifend verfolgt die Initiative Digitale Schiene Deutschland den Ausbau digitaler Leit- und Sicherheitstechnik; Volumen- und Rahmenverträge sollen die Umsetzung beschleunigen (Digitale Schiene Deutschland, 2025). Auch wenn diese Maßnahmen nicht unmittelbar Mobile Mapping betreffen, entsteht dadurch zusätzlicher Integrationsbedarf für georeferenzierte Bestands- und Projektgeometrien – eine Kernstärke von Mobile-Mapping-Workflows.

9 Fazit & Ausblick

Fahrzeuggebundene Multi-Sensor-Systeme sind heute das effizienteste Verfahren zur hochgenauen Erfassung linienförmiger Eisenbahninfrastruktur. Sie reduzieren betriebliche Einschränkungen und Sicherheitsrisiken, liefern die Datenbasis für digitale Zwillinge und ermöglichen standardisierte geodätische Produkte (Gleisachse, Lichtraum, Assets) im DB_REF. Weiterentwicklungen in Richtung KI-gestützter Automatisierung, wiederholter Befahrungen (Change Detection) und prozessintegrierter Webbereitstellung werden die Skalierbarkeit weiter erhöhen.

Literaturverzeichnis

- DataDEV. (2026). DataDEV awarded top-ranking contract for Deutsche Bahn's rail infrastructure digitalization. DataDEV Blog. <https://datadev-ds.com/datadev-awarded-top-ranking-contract-for-deutsche-bahns-rail-infrastructure-digitalization/>
- Deutsche Bahn AG. (2025). Integrated Interim Report January–June 2025. Deutsche Bahn AG. https://ir.deutschebahn.com/fileadmin/Deutsch/2025/DB_ZB25_e_web.pdf
- Digitale Schiene Deutschland. (2025). Volume contract worth EUR 6.3 billion concluded between DB and the rail industry – a milestone for faster realisation of digital control and safety technology. Deutsche Bahn AG. <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/news/2025/volume-contract>

Welchen Einfluss hat die kartographische Projektion auf die TLS-Registrierung?

Alexander Bong¹, Enrico Romanschek¹, & Christian Clemen¹

Zusammenfassung

Die Darstellung der Geometrie im „Building Information Modelling“ (BIM) wird in der Regel mit 3D-Volumenmodellen im kartesischen Einbettungsraum realisiert. Deshalb unterstützt die 3D-Modellierungs- und -Koordinationssoftware keine gekrümmten und skalierten geodätischen Koordinatenreferenzsysteme. Dieser Unterschied führt zu systematischen Abweichungen zwischen Punktwolke und tatsächlicher 3D-Geometrie. Um diese Abweichungen zu minimieren, können verzerungsminimierte kartographische Projektionen (LDP) verwendet werden. Im Idealfall ist die Punktwolke georeferenziert UND maßstabsfrei. Dieser Beitrag beschreibt eine empirische Studie anhand eines Labor-Gebäudes der HTW Dresden und prüft, ob sich der Aufwand einer Registrierung in einem solchen LDP-System lohnt und wie dieses Referenzsystem praktisch spezifiziert werden kann.

Schlagwörter Low-distortion-projection · Laserscan · Registrierung · BIM

1 Einführung und Motivation

Die Verknüpfung von Punktwolken und BIM-Projekten stellt eine große Herausforderung dar. Insbesondere die Modellierung von Bauteilen und Strukturen sowie der Vergleich der Realität mit dem Entwurf anhand von Punktwolken aus terrestrischen Laserscans (TLS) sind entscheidende Schritte, die als „Scan-to-BIM“ bzw. „Scan-vs-BIM“ bezeichnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Punktwolke des Scans sehr genau sein muss, oft mit maximalen Abweichungen zum BIM-Modell von weniger als 5 mm. Die Genauigkeit einer Messung mittels terrestrischen Laserscannern wird jedoch von einer Reihe von Faktoren beeinflusst. Wie von Stenz et al. (2017) und Hartmann & Hartmann (2022) beschreiben, hängt sie vom Beobachter, der Umgebung, dem zu scannenden Objekt, der Qualität des Sensors und der Systemkalibrierung ab. Beide Autoren betonen die Bedeutung der Georeferenzierung, insbesondere der Referenzierung von Koordinaten, als kritischen Faktor. Bei der Verwendung von Kontrollpunktkoordinaten in einem Koordinatenreferenzsystem wie ETRS89/UTM ist es wichtig, den Maßstabsfaktor zu beachten. Dies kann zu erheblichen Verzerrungen führen, insbesondere bei großen Bauwerken, wenn Komponenten oder Ausrichtungselemente auf der Grundlage des Entwurfs auf den tatsächlichen Standort übertragen werden sollen (Heunecke, 2017). Heunecke erklärt, wie der Maßstab einer UTM-Projektion berechnet wird und wie er durch die Quasigeoidhöhen im

Projektgebiet beeinflusst wird. Außerdem zieht er Schlussfolgerungen für die Verwendung offizieller Geodaten in der Gebäudeplanung. Das Problem der Georeferenzierung in BIM ist weithin bekannt. Es existieren verschiedene Methoden, um dieses Problem zu lösen (Jaud et al., 2020; Ugglä & Horemuz, 2018, 2018; Zhu & Wu, 2021). Low Distortion Map Projections (LDP) bieten eine einfache und effektive Methode, um die Auswirkungen des Projektmaßstabs auf ein BIM-Projekt zu mildern und so Fehler zu vermeiden. Dennis (2016) liefert eine klare und prägnante Erklärung von LDP und deren Gestaltung.

Clemen et al. (2023) setzen dies anhand von Personenbahnhöfen der Deutschen Bahn im deutschen Eisenbahnsystem in die Praxis um. Das für jeden Bahnhof verwendete VA-System ermöglicht die Verwendung eines Maßstabs von nahezu 1, was bedeutet, dass die Geodaten, Vermessungsdaten und das BIM-Modell in einem Koordinationsmodell exakt zusammenpassen. Diese Art der Georeferenzierung wird nun als Spezifikation für die Umsetzung der BIM-Methodik bei der Deutschen Bahn DB Netze (2024) verwendet. Die Auswirkungen der Verwendung eines LDP zur Referenzierung von Laserscans im BIM-Kontext wurden anhand eines Laborgebäudes der HTW Dresden analysiert.

2 Methoden

Die Durchführung der Untersuchung benötigt reale Testdatensätze des genannten Laborgebäudes in verschiedenen Koordinatenreferenzsystemen. Dafür ist es notwendig eine

¹ HTW Dresden, Fakultät Geoinformation, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland, E-Mail: vorname.name@htw-dresden.de

lokale kartographische Projektion für das betrachtete Projektgebiet zu erzeugen. In den folgenden Teilabschnitten werden die Erzeugung der Datensätze und die Erstellung des Referenzsystems beschrieben.

2.1 Erstellung der Testdatensätze

Das BIM-Modell basiert auf vorhandenen vergangenen Messungen. Als Lagebezugssystem wird das bestehende Festpunktfeld der HTW Dresden im Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM33 genutzt. Die Höhenfestlegung erfolgt im vertikalen Datum DHHN2016. Zudem sind im Inneren des Gebäudes bereits vereinzelte Bodenfestpunkte sowie Schwarz-Weiß-Zielmarken in einem lokalen Koordinatensystem vorhanden. Zur Georeferenzierung der terrestrischen Laserscans wird das Netz um das Laborgebäude und im Inneren verdichtet. Die Netzmessung erfolgt vollständig mit tachymetrischen Messungen. Die Ausgleichung der Beobachtungen und Berechnung der Festpunktkoordinaten wird mit der Software JAG3D durchgeführt. Dabei werden fehlerhafte TPS-Beobachtungen identifiziert und ausgeschlossen. Die verwendeten Festpunkte des HTW-Netzes werden als dynamische Fixpunkte in Position und Höhe verwendet. Abbildung 1 zeigt die neu vermarkten Netzpunkte.

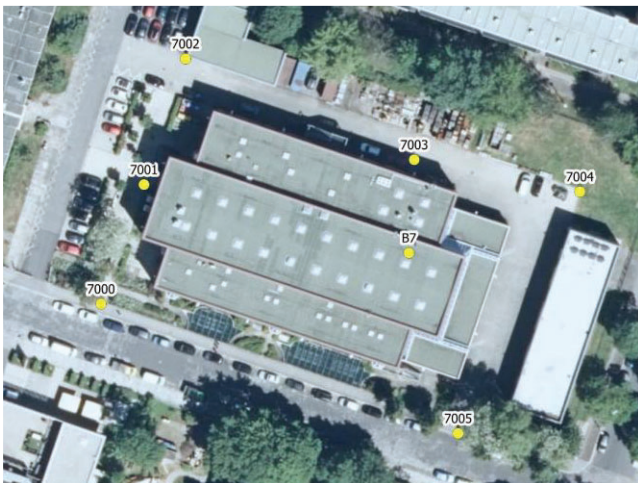


Abbildung 1 Verdichtung des Festpunktfeldes um das Messobjekt und im Inneren

Die 2D-Standardabweichungen der ausgeglichenen Netzpunkte betragen maximal 4,7 mm für 2σ (95 %). Im Anschluss dient die Erfassung einiger vorhandener Zielmarken zur Transformation aller vorhandenen 187 Targets und sechs Bodenpunkte in das übergeordnete Koordinatenreferenzsystem ETRS89/UTM. Der statische terrestrische Laserscan des Laborgebäudes erfolgt mit einem Faro Focus S 150. Es

werden das Innere der Halle, der westliche Vorplatz, die ebenerdigen Teile der Treppenhäuser im Süden und Norden sowie ein Wartungsgang im Osten mit einer anschließenden Werkstatt gescannt. Die Anordnung der 68 Scanstandpunkte in der Software Scantra der Firma Technet sind in Abbildung 2 zu sehen.

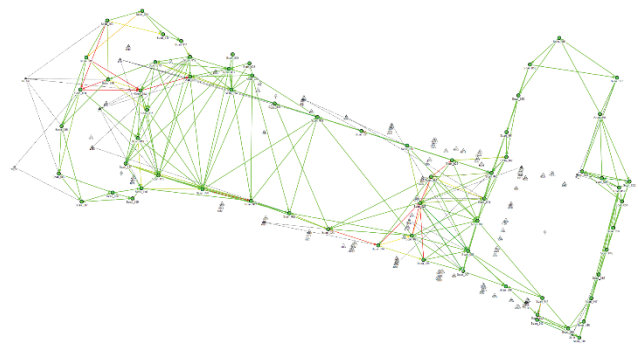


Abbildung 2 Anordnung der Scanstandpunkte und deren Verknüpfungen in Scantra

2.2 Erzeugung einer Low distortion projection

Die datumsgebenden Passpunkte werden für die Untersuchungen der Auswirkungen der kartographischen Projektion auf die Registrierung von terrestrischen Laserscans ebenso in einer verzerrungsarmen Projektion benötigt. Dafür wird zunächst das projektspezifische ETRS89/LDP-System erstellt. Um dies zu realisieren werden vier Punkte im Projektgebiet beispielsweise mit Hilfe der Software QGIS in ETRS89/UTM definiert. Diese Punkte erhalten die entsprechenden Höhen anhand der offenen Geodaten des digitalen Höhenmodells und des Quasigeoids für Sachsen. Es ist keine geodätische Datumsumwandlung notwendig. Die kartographische Projektion wird angepasst, indem der zentrale Meridian der transversalen Mercator-Projektion auf das Projektgebiet verschoben und der Maßstab für die Höhenkorrektur angewendet wird. Dadurch wird der Projektmaßstab auf nahezu 1 festgelegt, was die Registrierung der Punktwolken in beiden Systemen ermöglicht.

Daraus können die WKT-Transformationsparameter des projektspezifischen ETRS89/LDP-Systems für diesen Bereich bestimmt werden. In Abbildung 3 sind die notwendigen Parameter des proj-Strings für die Transformation in das erzeugte LDP-System orange gefärbt (Evenden et al, 2026). Es müssen die verwendete Projektion (proj) und das Referenzellipsoid (ellps) definiert werden. Zudem werden die geographische Länge (lon_0) und Breite (lat_0) des Zentrums des Punktes im Projektgebiet angegeben.

Der Mittelpunkt im neuen Koordinatenreferenzsystem erhält Verschiebungen in Nordrichtung (y_0) und Ostrichtung (x_0), um negative Koordinaten zu vermeiden und beide Achsrichtungen eindeutig in den Koordinaten identifizieren zu können. Der Maßstab (k) wird analog zu den Ausführungen von Otto Heunecke (2017) berechnet. Mithilfe eines solchen proj-Strings oder beispielsweise einer Parameterdatei für Geographische Informationssysteme (GIS) mit den gleichen Transformationsparametern können die benötigten Passpunkte in das lokale Projektkoordinatensystem transformiert werden.

```
cct -d 3 +proj=LGS \
+step +inv +proj=utm +zone=33
+ellps=GRS80 \
+step +proj=tmerc +ellps=GRS80 \
+lat_0=51.0352 \
+lon_0=13.7373 \
+k=1.0000249 \
+x_0=500 \
+y_0=1500 \
+units=m
```

Abbildung 3 WKT-Transformationsparameter für die Transformation mit proj in das neue LDP-System

2.3 Anwendung der LDP auf die Testdaten

Die Punktwolken werden mit den Softwarelösungen Scene von Faro und Scantra von Technet erstellt, was zu vier Punktwolken führt. Bei den jeweiligen Registrierungen werden die identischen Passpunkte verwendet. Zudem werden die Einstellungen in beiden Softwaresystemen annähernd gleich gewählt. Da die Software Scene ohne die Beachtung eines kartographischen Maßstabs arbeitet, wird dies in Scantra durch den Benutzer ebenso gewählt. Für die späteren Vergleiche werden die Koordinaten der TLS-Standpunkte aus ETRS89/UTM33 auf die gleiche Weise in das verzerrungsminimierte System ETRS89/LDP transformiert wie die datumsgebenden Passpunkte vor der Registrierung. Die TLS-Standpunkte liegen nun jeweils vier Mal als Ergebnisse der verschiedenen Registrierung-varianten vor.

3 Ergebnisse

Um die Vorteile eines LDP im Vergleich zu ETRS89/UTM33 aufzuzeigen, werden die Scanpositionskoordinaten für jede Registrierung und die entstandenen Punktwolken verglichen.

3.1 Vergleich der Standpunktkoordinaten

Es werden die Koordinatendifferenzen zwischen den jeweiligen Standpunkten aus den Registrierungen in ETRS89/UTM und ETRS89/LDP aus Scantra und aus Scene bestimmt. Die entstehenden Unterschiede werden aus Gründen der Visualisierung auf 5,0 m normiert mithilfe von Pfeilen dargestellt. In Abbildung 4 sind die Unterschiede zwischen den Standpunktkoordinaten aus der Software Scantra zu sehen. Der orangefarbene Punkt stellt das Zentrum der verzerrungsminimierten Projektion im Projektgebiet dar. Die resultierenden Vektoren zeigen eine zu erwartende gleichmäßige Verschiebung weg vom Zentrum der Projektion aufgrund des verwendeten Abbildungsmaßstabs in ETRS89/UTM. Es ergeben sich mittlere 2D-Unterschiede von 0,009 m sowie eine maximale Abweichung von 0,015 m zwischen den Ergebnissen.

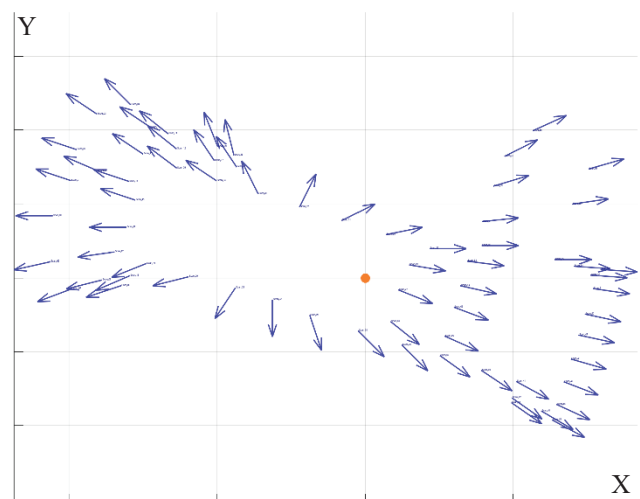


Abbildung 4 Normierte Residuen aus dem Vergleich der Standpunktkoordinaten in der Software Scantra

Der Vergleich erfolgt analog mit den Standpunktkoordinaten aus der Software Scene. In Abbildung 5 sind ebenfalls die Vektoren der Koordinatenunterschiede dargestellt. Es ist eine Verdrehung der gesamten Standpunktanordnung zu erkennen. Der Drehpunkt befindet sich in der Nähe des ersten Scanstandpunktes. Die Systematik der Verschiebungen ist nicht analog zu denen aus der Software Scantra. Zudem sind die Abweichungen mit einem Mittelwert in 2D von 0,678 m sowie einem Maximalwert in 2D von 1,248 m deutlich größer.

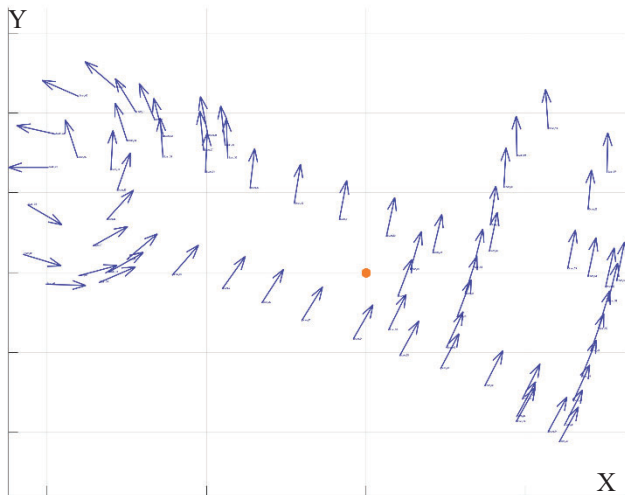


Abbildung 5 Normierte Residuen aus dem Vergleich der Standpunktkoordinaten in der Software Scene

3.2 Punktwolkenvergleich

Die festgestellten Unterschiede der Ausdehnung in den Scanstandpunkten sollen nun auch in den Punktwolken untersucht werden, die aus den Registrierungen entstanden sind. Es werden jeweils die Punktwolken aus einer Software verglichen. Diese müssen aufgrund der unterschiedlichen Georeferenzierung zunächst zueinander registriert werden. In der Software Cloud Compare werden in einem ersten Schritt beide Punktwolken aus Scantra importiert. Zudem wird das statistische Rauschen gefiltert und erfolgt ein Ausdünnen der Punktwolken, um die Rechenzeit zu verkürzen. Anschließend folgt eine manuelle Grobregistrierung der in ETRS89/UTM georeferenzierten Punktwolke zur Punktwolke in ETRS89/LDP. Somit kann eine Feinregistrierung mittels Iterative Closest Point (ICP) durchgeführt werden (*CloudCompare*, 2025). Diese Feinregistrierung wird zunächst inklusive der Schätzung des Maßstabs berechnet. Der Maßstab zeigt mit einem Wert von 0,996712 bereits, dass Unterschiede in den Ausdehnungen der Punktwolken existieren. In einer neuen Untersuchung wird der ICP-Algorithmus ohne die Schätzung des Maßstabs angewendet. Zum Vergleich werden anschließend die M3C2-Distanzen (Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison) zwischen beiden Punktwolken berechnet. Die in Abbildung 5 gezeigte Gauß-Verteilung weist einen Mittelwert von 0,015 m und eine Standardabweichung von 0,089 m auf. Dies bestätigt die zuvor durchgeführten Vergleiche der Scanstandpunktkoordinaten und den geschätzten Maßstab der Feinregistrierung mit ICP. Von einem Punktwolkenvergleich mit den Ergebnissen aus Scene wird abgesehen, da

der Import der Punktwolken in der Software CloudCompare teilweise nur profilweise erfolgt ist.

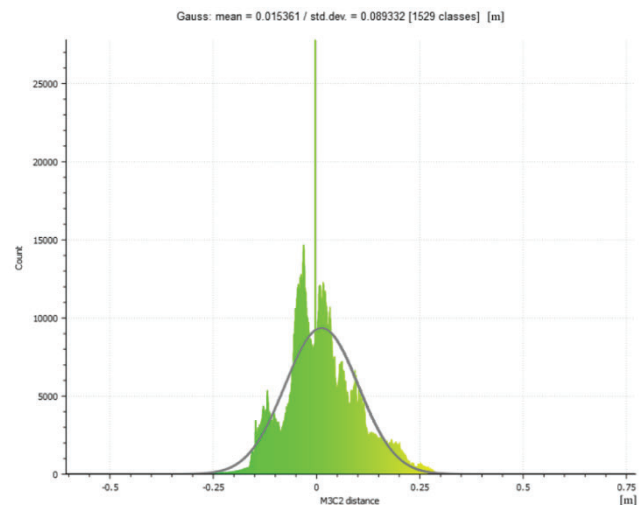


Abbildung 6 Gauß-Verteilung der M3C2-Distanzen zwischen den Punktwolken aus Scantra

4 Diskussion

Die durchgeführten Vergleiche der Standpunktkoordinaten und der erzeugten Punktwolken zeigen die Unterschiede der genutzten Koordinatenreferenzsysteme aufgrund der Maßstabsverzerrungen. Die Ergebnisse der Software Scantra weisen die erwartete Systematik der Verzerrungen in entgegengesetzter Richtung zum Projektionszentrum auf. Auch die Größenordnungen der Koordinatenunterschiede der Standpunkte von maximal 0,015 m bei einer Ost-West-Ausdehnung des Gebäudes von etwa 80 m sind aufgrund des Abstandes zum Zentralmeridian im UTM-System nachvollziehbar. Dies spiegelt sich auch im Vergleich der Punktwolken wider und zeigt eine systematisch größere Ausdehnung der Punktwolke in ETRS89/UTM.

Die Ergebnisse aus Scene weisen deutliche Unterschiede auf. Die Netzgeometrie der Scanstandpunkte ist verdreht dargestellt. Der erste Scanstandpunkt wird scheinbar durch die Software als datumsgebender Punkt genutzt und dient somit als Rotationszentrum. Aufgrund der sehr großen Abweichungen ist davon auszugehen, dass nicht nur die Systematik der Maßstabsverzerrung wirkt. Es lässt sich allerdings ableiten, dass je nach Verteilung der datumsgebenden Passpunkte deutlich unterschiedliche Registrierungsergebnisse in jeder Software möglich sind. In der durchgeführten Fallstudie in einem Laborgebäude der HTW Dresden wird auf die bereits vorhandenen Zielmarken für die Registrierung der Laserscans zurückgegriffen. Insbesondere im östlichen Bereich des Gebäudes ist die Verteilung der Zielmarken

aufgrund der Versuchsaufbauten nicht frei möglich. Zudem sind im gescannten Wartungsgang im Osten keine Zielmarken vorhanden. Deshalb werden im Gang mobile Zielmarken genutzt. Der Vergleich der Standpunktkoordinaten ohne die terrestrischen Laserscans im Wartungsgang ergibt allerdings ähnliche Unterschiede wie der Vergleich aller Scanstandpunkte.

5 Fazit & Ausblick

Der Vergleich der praktischen Anwendung von LDP mit UTM zeigt systematische Unterschiede in den Residuen der aus dem Laserscan gewonnenen Standpunktkoordinaten. Diese systematischen Unterschiede sind auch im direkten Vergleich der registrierten Punktwolken ersichtlich. Die Analyse der Laserscans ergibt unabhängig von der für die Registrierung verwendeten Software signifikante Unterschiede. Systematische Abweichungen sind auf Maßstabsverzerrungen zurückzuführen. Durch die Verwendung des Ansatzes der verzerrungsarmen Projektion ist es möglich, verzerrungsfreie 3D-Punktwolken mit einem Maßstab von nahezu 1 zu erzeugen. Dieser Ansatz ermöglicht eine hohe Genauigkeit für die gesamte Punktwolke des Laborgebäudes an der HTW Dresden und kompensiert den zusätzlichen Aufwand für die Erstellung des projektspezifischen LDP-Systems und der Kontrollpunkttransformationen. Im Zusammenhang mit BIM eignen sich die auf diese Weise generierten Koordinaten für die 3D-Modellierung und Kollisionserkennung in der jeweiligen Autoren- oder Koordinationssoftware. Um die 3D-Modellierung in BIM-Projekten zu ermöglichen, müssen Punktwolken in einem maßstabfreien Koordinatenreferenzsystem verfügbar sein, da kartografische Kartierungsmaßstäbe und Höhenreduktionen in den meisten BIM-Softwareprogrammen nicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus können externe Geodaten durch eine standardisierte Konvertierung in das lokale Koordinatenreferenzsystem unter Verwendung von CRS-WKT in GIS-Software und/oder proj-Routinen mit gesicherter Qualität in das Projekt importiert werden.

Aufgrund der sehr praxisnahen Studie empfehlen wir die Einführung eines LDP für alle Punktwolken in BIM-Projekten. Das lokale System bleibt im üblichen geodätischen Datum des Kunden (in diesem Fall ETRS89) und die Netzpunkte sind lokal nahezu maßstabslos. Nur dann kann aus den Punktwolken ein georeferenziertes BIM-Modell im Maßstab 1 abgeleitet werden.

Zukünftig können hinsichtlich der Möglichkeiten der Software Scantra weitere Untersuchungen durchgeführt werden. In Scantra kann die entsprechende Reduktion angebracht werden. Die Auswirkungen auf die

Punktwolkenregistrierung in ETRS89/UTM im Vergleich zu ETRS89/LDP sollte an dieser Stelle mit verschiedenen Einstellungen noch untersucht werden. Zudem kann ein Vergleich der Gebäudeeckpunkte der Punktwolken mit der Realität erfolgen. Dafür werden die Koordinaten der Eckpunkte aus den Punktwolken am Laborgebäude mit einem Tachymeter abgesteckt, um die Auswirkungen visualisieren zu können.

Literaturverzeichnis

- Clemen, C., Romanschek, E., & Fleischer, A. (2023). Georeferenzierung von 3D-Modellen mit dem VA-System für Personenbahnhöfe. In *EI - Der Eisenbahningenieur* (S. 56–59).
- CloudCompare (Version 2.12.4). (2025). [Software]. <http://www.cloudcompare.org/>
- DB Netze. (2024). Georeferenzierung von DB Personenbahnhöfen in BIM-Projekten (Informationsplattform Anlagentechnik, Hrsg.).
- Dennis, M. L. (2016). Ground Truth: Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS. *Pipelines* 2016, 857–869. <https://doi.org/10.1061/9780784479957.079>
- Evenden, G. I., Rouault, E., Warmerdam, F., Evers, K., Knudsen, T., Butler, H., Taves, M. W., Schwehr, K., Sales de Andrade, E., Karney, C., Couwenberg, S., Dawson, N., Snow, A. D., & Jimenez Shaw, J. (2026). PROJ (Version 9.8.0) [Software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5884394>
- Hartmann, J., & Hartmann, J. (2022). Unsicherheiten beim TLS – Aspekte der Modellierung. In *Qualitätssicherung geodätischer Mess- und Auswerteverfahren 2022* (S. 187–203). Wißner-Verlag.
- Jaud, Š., Donaubaauer, A., Heuncke, O., & Borrmann, A. (2020). Georeferencing in the context of building information modelling. *Automation in Construction*, 118, 103211. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211>
- Otto Heuncke. (2017). Otto Heuncke: Planung und Umsetzung von Bauvorhaben mit amtlichen Lage und Höhenkoordinaten. *ZfV*, (03), 180–187.
- Stenz, U., Hartmann, J., Paffenholz, J.-A., & Neumann, I. (2017). A Framework Based on Reference Data with Superordinate Accuracy for the Quality Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Multi-Sensor-Systems. *Sensors* (Basel, Switzerland), 17(8). <https://doi.org/10.3390/s17081886>

- Uggla, G., & Horemuz, M. (2018). Georeferencing Methods for IFC. 2018 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics), 207–211. <https://doi.org/10.1109/BGC-Geomatics.2018.00045>
- Zhu, J., & Wu, P. (2021). A Common Approach to Geo-Referencing Building Models in Industry Foundation Classes for BIM/GIS Integration. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(6), 362. <https://doi.org/10.3390/ijgi10060362>

Modellbasierte visuelle Qualitätskontrolle: Methoden & Workflows auf Basis von 3D-Vermessungsdaten

Joachim Bank¹, Marc Zschieschang¹

Zusammenfassung

Digitale Gebäudemodelle stehen im Spannungsfeld zwischen geplantem Entwurf und gebauter Realität. Der Beitrag untersucht deren Qualitätssicherung durch den Vergleich mit hochauflösenden Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning. Im Fokus stehen Verfahren zur Analyse geometrischer Abweichungen sowie deren visuelle und quantitative Bewertung. Darauf aufbauend wird eine Taxonomie marktverfügbarer Werkzeuge nach Automatisierungsgrad und Analysekontext entwickelt. Zentrale Kriterien sind Geschwindigkeit, Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit. Zudem wird die Integration der Qualitätskontrolle in Modellierungs- und Bauprozesse diskutiert und ein stärker verzahnter Ansatz vorgeschlagen. Abschließend werden Potenziale zukünftiger, insbesondere KI-gestützter Entwicklungen aufgezeigt.

Schlagwörter Qualitätssicherung, Punktwolken, Scan-to-BIM, Automatisierte Analyse

1 Einführung

Digitale Gebäudemodelle beschreiben den geplanten oder dokumentierten Zustand von Bauwerken. Soll ihre Übereinstimmung mit der gebauten Realität bewertet werden, ist ein systematischer Abgleich mit Messdaten erforderlich. Terrestrisches Laserscanning liefert hierfür hochauflösende Punktwolken als detaillierte geometrische Grundlage zur Analyse von Abweichungen zwischen Modell und Ist-Zustand. Diese Vergleiche sind sowohl für die Rekonstruktion von Bestandsmodellen (Scan-to-BIM) als auch für die Baufortschrittskontrolle (Scan-vs-BIM) zentral (Tang et al., 2010).

Insbesondere bei großen Projekten stellt sich die Frage, wie Abweichungen effizient, skalierbar und zuverlässig identifiziert und bewertet werden können. Hierfür haben sich unterschiedliche Werkzeuge und Verfahren etabliert, die sich hinsichtlich ihres Automatisierungsgrades, ihres Analysebezugs sowie ihrer praktischen Einsetzbarkeit deutlich unterscheiden. Gemeinsam ist diesen Verfahren eine Distanzanalyse zwischen Modell und Messdaten und typischerweise eine interaktive Visualisierung, wie in Abbildung 1 dargestellt.

Der vorliegende Beitrag systematisiert diese Werkzeuge anhand einer Taxonomie in Form mehrerer Stufen, die sowohl den Grad der automatisierten Unterstützung als auch den Analysekontext berücksichtigt. Dabei werden typische Vertreter der einzelnen Klassen beschrieben und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten eingeordnet.

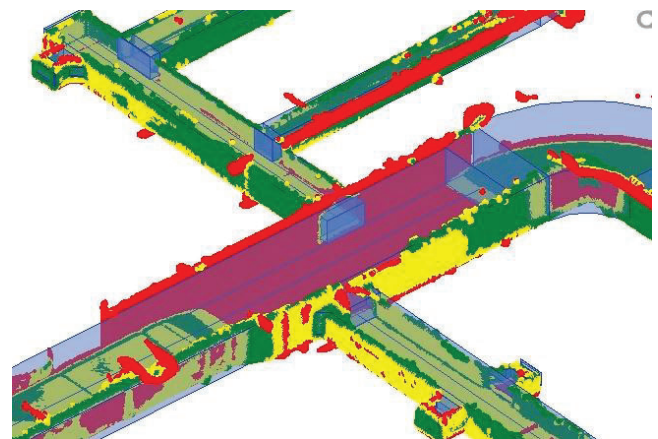


Abbildung 1 Eine mit einer nach Abstand eingefärbten Punktwolke mit einem überlagerten Modell in Autodesk Revit und der Erweiterung Qbitech for Revit.

Die Stufen werden nach Kriterien wie Geschwindigkeit, Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit bewertet.

Darüber hinaus wird die Rolle der Qualitätskontrolle im Gesamtprozess der Modellierung und Bauausführung analysiert. Insbesondere wird diskutiert, inwiefern die derzeit häufig nachgelagerte Prüfung zu iterativen und ineffizienten Workflows führt und welche Anforderungen sich daraus für eine stärkere Integration der Qualitätskontrolle in den Modellierungsprozess ergeben. Abschließend werden mögliche Entwicklungsperspektiven aufgezeigt, die in einer weitergehenden Automatisierung und Integration zukünftiger Werkzeuge liegen.

¹ Qbitech eGbR, Rosa-Luxemburg-Str. 2, 01796 Pirna, DE, joachim.bank@qbitech.com; marc.zschieschang@qbitech.com

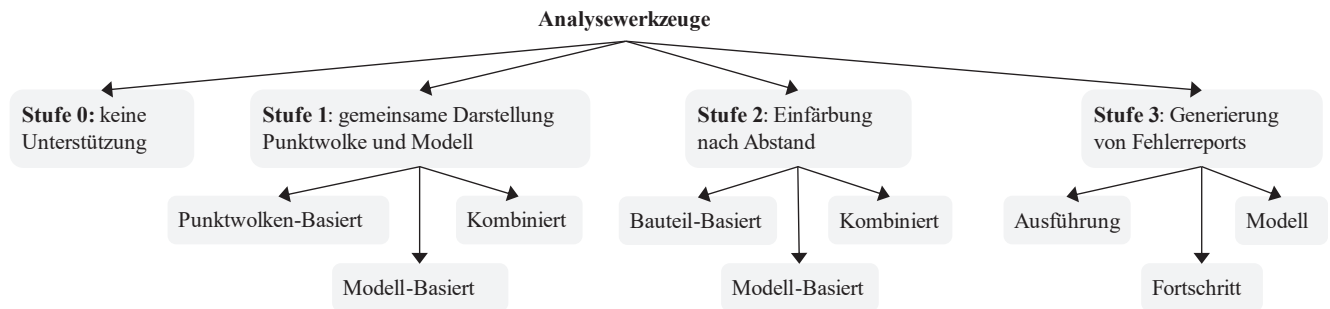


Abbildung 2 Vorgestellte Taxonomie der Analysewerkzeug nach Stufe und Anwendungskontext.

2 Taxonomie und Gütekriterien

Die im Folgenden beschriebenen Werkzeuge werden anhand des Grades der automatisierten Unterstützung während der Qualitätskontrolle in vier Stufen eingeteilt. Dabei beschreibt Stufe 0 die geringste und Stufe 3 die höchste Unterstützung. Darüber hinaus wird innerhalb der Gruppen nochmals nach Analysekontext unterteilt, wie Abbildung 2 entnommen werden kann. Die Betrachtung beschränkt sich auf tatsächlich am Markt verfügbare Lösungen.

Zur Einordnung der vorgestellten Stufen sind insbesondere die Kriterien Geschwindigkeit, Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit relevant. Sie entsprechen zentralen Anforderungen an Modellprüfung und Datenverarbeitung im BIM-Kontext, insbesondere im Hinblick auf Effizienz, den Umgang mit großen Datenmengen und die Aussagekraft von Analyseergebnissen.

Die **Geschwindigkeit** beschreibt den Zeitaufwand, der für die Analyse erforderlich ist. Dabei ist der gesamte Prozess zu berücksichtigen, einschließlich automatisierter Vorverarbeitungsschritte sowie manueller Auswertung. Die Bearbeitungsdauer beeinflusst unmittelbar die praktische Einsetzbarkeit eines Werkzeugs im Projektkontext.

Die **Skalierbarkeit** beschreibt, wie effizient ein Verfahren bei unterschiedlichen Projektgrößen eingesetzt werden kann. Sie ist insbesondere im Umgang mit großen Punktwolken relevant, die aus zahlreichen Einzelaufnahmen bestehen und mehrere Milliarden Punkte umfassen können (Tang et al., 2010). Werkzeuge unterscheiden sich deutlich darin, ob sie solche Daten vollständig verarbeiten oder nur mit reduzierten Datensätzen arbeiten können.

Die **Zuverlässigkeit** beschreibt die Aussagekraft und Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse. Sie bestimmt, inwieweit die gewonnenen Ergebnisse als belastbare Grundlage für Entscheidungen dienen können, und hängt unter anderem von der verwendeten Methodik sowie vom Grad der Automatisierung ab.

Die gezeigten Werkzeuge sind lediglich ein Ausschnitt aus der komplexen Softwarelandschaft. Insbesondere Vertreter aus anderen Bereichen, wie AVEVA Everything 3D für den Anlagenbau, VESTRA InfraVision für den Infrastrukturbau oder HiCAD für den Stahlbau werden in dieser Auflistung nicht erwähnt.

3 Erläuterung der Stufen und Vertreter

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Stufen, deren Unterkategorien und Vertreter genauer erläutert.

3.1 Stufe 0 – keine Unterstützung

Die Stufe 0 beschreibt Systeme, die keine gemeinsame Visualisierung von Punktwolken und digitalen Bauwerksmodellen im selben Arbeitskontext ermöglichen. Punktwolken können in diesen Systemen entweder nicht verarbeitet werden oder nur indirekt über externe Anwendungen.

Soll eine visuelle Qualitätskontrolle erfolgen, geschieht dies manuell über den Vergleich getrennter Darstellungen. Dabei wird die Punktwolkendarstellung und die Modelldarstellung durch Synchronisation der Kameraeinstellungen vergleichbar gemacht und mittels Messwerkzeugen an gezielten Stellen Maße überprüft.

Der Vergleich getrennter visueller Darstellungen ist kognitiv anspruchsvoll und fehleranfällig, da keine direkte räumliche Zuordnung zwischen den Daten möglich ist (Ware, 2013). Solche Verfahren sind auf kleine Anwendungsfälle beschränkt und liefern keine reproduzierbaren Ergebnisse. Eine objektive Qualitätsbewertung ist unter diesen Bedingungen nicht möglich.

3.2 Stufe 1 – gemeinsame Darstellung

Die Stufe 1 beschreibt Systeme, die eine gemeinsame Visualisierung von Punktwolken und digitalen Bauwerksmodellen innerhalb derselben Ansicht ermöglichen. Durch die Überlagerung beider Datensätze im selben Raum wird das Wahrnehmungsproblem getrennter Darstellungen reduziert,

da eine direkte visuelle Zuordnung zwischen Modell und Messdaten möglich ist (Ware, 2013).

Innerhalb dieser Stufe lassen sich drei Kategorien unterscheiden, abhängig davon, welcher Datentyp den primären Arbeitskontext bildet.

In **punktwolken-basierten Systemen** stellt die Punktwolke den zentralen Datentyp dar. Das Modell wird als ergänzende Referenz, beispielsweise in Form eines Meshes, hinzugefügt. Vertreter sind z.B. Cloud-Plattformen wie NavVis IVION und FARO Sphere XG. Diese Systeme sind auf die Visualisierung und Navigation großer Punktwolken ausgelegt und ermöglichen die Integration zusätzlicher Geometrien zur Kontextualisierung (NavVis, 2025; FARO, 2026b).

In **modell-basierten Systemen** bildet das BIM- oder CAD-Modell den zentralen Datentyp, während die Punktwolke als Referenz eingebunden wird. Beispiele hierfür sind Autodesk Revit (wie in Abbildung 3 gezeigt), AutoCAD, Bricsys BricsCAD, Nemetschek Allplan oder Graphisoft ArchiCAD. In diesen Systemen werden Punktwolken typischerweise als Referenzdaten zur Modellierung und visuellen Prüfung genutzt (Autodesk, 2026a, 2026b; Bricsys, 2026; Nemetschek, 2020; Graphisoft, 2026).

Kombinierte Systeme behandeln Punktwolken und Modelle als gleichwertige Datentypen, die gemeinsam verarbeitet werden. Beispiele hierfür sind OpenScanTools und FARO As-Built Modeler. Diese Systeme ermöglichen den Import beider Datentypen und unterstützen deren parallele Nutzung, etwa zur Vorbereitung weiterführender Analysen (FARO, 2026c; OpenScanTools, 2026).

Unabhängig von dieser Einteilung hängt die Qualität der gemeinsamen Darstellung stark von der Visualisierungsleistung der Systeme ab. Ein wesentlicher Faktor ist die korrekte Tiefenverdeckung, da nur so räumliche Beziehungen eindeutig erkennbar sind. Ebenso entscheidend ist die Vollständigkeit der dargestellten Daten. Punktwolken großer Projekte bestehen häufig aus Milliarden von Punkten und zahlreichen Einzelaufnahmen. Viele Systeme können diese Datenmengen nicht vollständig verarbeiten, sodass reduzierte Darstellungen oder Teilbereiche verwendet werden müssen.

Trotz der gemeinsamen Visualisierung bestehen weiterhin Einschränkungen. Insbesondere kann gegenseitige Verdeckung zwischen Modell und Punktwolke die Analyse erschweren, wenn relevante Bereiche vollständig überlagert werden. In der Praxis führt dies dazu, dass einzelne Datensätze temporär ein- und ausgeblendet werden müssen, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Insgesamt verbessert die gemeinsame Visualisierung die visuelle Vergleichbarkeit von Modell und Realität, da räumliche Zusammenhänge unmittelbar erkennbar werden und

ein direkter Abgleich ohne Medienbruch möglich ist. Sie stellt damit eine wesentliche Voraussetzung für Analysen dar und unterstützt insbesondere die explorative Identifikation von Abweichungen.

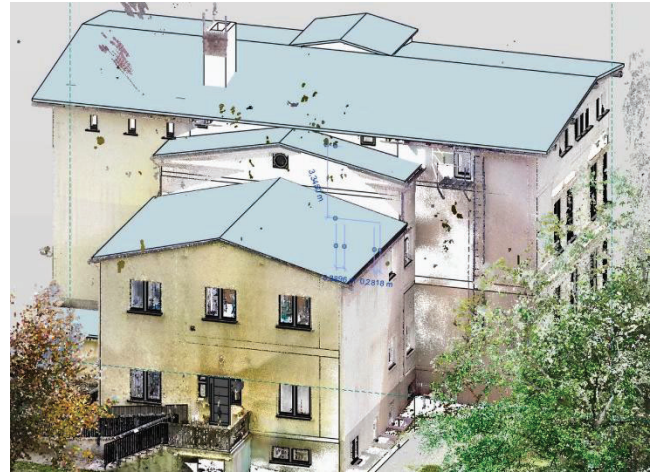


Abbildung 3 Gemeinsame Visualisierung eines Modells und einer Punktwolke mit korrekter Tiefenverdeckung innerhalb von Autodesk Revit.

Gleichzeitig bleibt die Aussagekraft dieser Darstellungen begrenzt. Die Bewertung erfolgt weiterhin subjektiv und erfahrungsabhängig, da keine quantitativen Metriken zugrunde liegen. Zudem können Darstellungsartefakte wie Verdeckung, reduzierte Punktdichte oder unvollständige Datensätze die Interpretation erschweren.

Die gemeinsame Visualisierung dient daher primär der Orientierung und ermöglicht kaum eine systematische oder quantitative Qualitätsanalyse.

3.3 Stufe 2 – Einfärben nach Abstand

Die Stufe 2 umfasst Werkzeuge, die aus der gemeinsamen Darstellung von Punktwolke und Modell eine quantitative Distanzinformation ableiten und visuell aufbereiten. In der Praxis wird hierfür typischerweise der Abstand zwischen Punktwolke und Modelloberfläche berechnet, meist als nächster euklidischer Abstand zwischen Punkten und Modellgeometrie. Die Distanzen sind die Grundlage farbkodierter Abweichungsdarstellungen und ermöglichen eine reproduzierbare, objektive Bewertung der Modellgüte (CloudCompare, 2021; Besl & McKay, 1992).

Innerhalb dieser Stufe lassen sich drei Typen unterscheiden. **Bauteil-basierte Systeme** ordnen Abweichungen gezielt einzelnen Modellobjekten zu. Dazu zählen etwa FARO As-Built für Autodesk AutoCAD oder Autodesk Revit mit Erweiterungen wie Qbitech for Revit oder Autodesk Point - Layout (Autodesk, 2026b; FARO, 2026a, Qbitech 2026).

Modell-basierte Systeme betrachten die Geometrie primär als zusammenhängendes Gesamtmodell. Beispiele hierfür sind CloudCompare, Leica Cyclone 3DR sowie Trimble RealWorks. Diese Werkzeuge sind auf die Verarbeitung großer Punktwolken und globaler geometrischer Analysen ausgelegt und ermöglichen eine Bewertung der Gesamtgüte eines Modells (CloudCompare, 2021; Leica Geosystems, 2026; Trimble, 2026).

Kombinierte Systeme behandeln Punktwolken und Modelle als gleichwertige Datentypen und unterstützen deren gemeinsame Nutzung, insbesondere im Kontext von Kollaboration und Kommunikation. Ein Beispiel ist Cintoo, das Vergleichswerkzeuge für Punktwolken und Modelle sowie visuelle Differenzdarstellungen bereitstellt (Cintoo, 2026).

Durch die geeignete Wahl einer Farbabbildung auf die Distanzen sowie eine Filterung von Punkten ergeben sich die im Folgenden genannten Anwendungsszenarien.

3.3.1 Anwendungsszenarien

Ein zentrales Einsatzfeld ist die **Verformungs- bzw. Ebenheitsanalyse**. Hier werden kontinuierliche Farbskalen eingesetzt, um Abweichungen differenziert darzustellen und quantitativ zu bewerten. Für die fachliche Einordnung solcher Abweichungen werden je nach Anwendungsfall Normen und Richtlinien herangezogen, etwa die DIN 18202 für Toleranzen im Hochbau oder ASTM E1155 zur Bewertung von Ebenheit und Niveau von Böden (DIN Media, 2019a; ASTM International, 2020).

Davon zu unterscheiden ist die **Toleranzanalyse**, bei der Distanzwerte in diskrete Intervalle überführt und mit Farbkodierungen visualisiert werden, um Bereiche innerhalb oder außerhalb definierter Grenzwerte zu identifizieren. Als Referenz kann hierbei auch das Level of Accuracy (LOA) des U.S. Institute of Building Documentation herangezogen werden, das Anforderungen an die Genauigkeit von As-Built-Daten beschreibt (U.S. Institute of Building Documentation, 2026).

Aus den Distanzwerten lassen sich zudem **Nähe- bzw. Clearance-Analysen** sowie **Vollständigkeitsanalysen** ableiten. Bei der Näheanalyse werden Punkte hervorgehoben, deren Abstand zum Modell einen unteren Grenzwert unterschreitet, wodurch potenzielle Konfliktbereiche identifiziert werden können. Die Vollständigkeitsanalyse betrachtet hingegen Punkte mit großem Abstand zum Modell, um mögliche nicht modellierte Bereiche sichtbar zu machen (siehe Abbildung 4). Solche Interpretationen müssen jedoch im Kontext der Datenerfassung erfolgen, da große Abstände auch durch Abschattungen, Registrierungsfehler oder Messrauschen entstehen können.

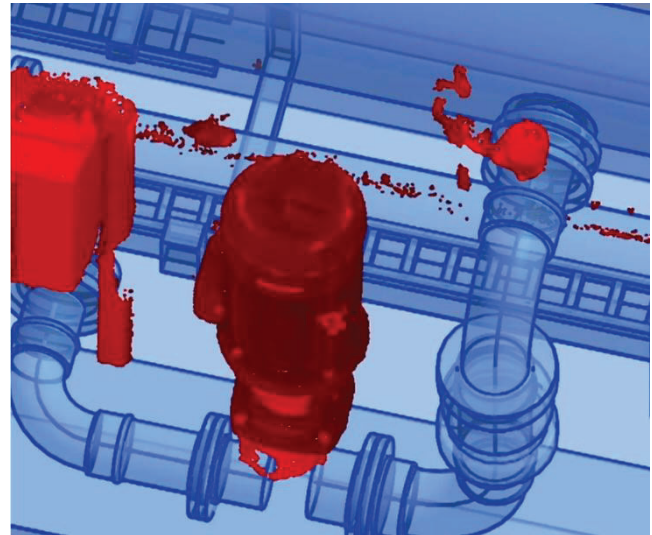


Abbildung 4 Nach Mindestabstand gefilterte Punkte innerhalb von Autodesk Revit und der Erweiterung Qbitec for Revit (Qbitec, 2026).

Insgesamt markiert Stufe 2 den Übergang von der reinen Visualisierung zu einer quantitativen und objektivierbaren Qualitätsanalyse. Die automatisierte Berechnung von Abständen erhöht die Geschwindigkeit und ermöglicht eine grundsätzlich bessere Skalierbarkeit, bleibt jedoch bei großen Datensätzen und komplexen Szenarien begrenzt. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist gegenüber rein visuellen Ansätzen deutlich erhöht, da sie auf geometrisch definierten Metriken basiert. Ihre Aussagekraft hängt dabei wesentlich von der Qualität der Registrierung, der Vollständigkeit der Punktwolke sowie der gewählten Distanzmetrik ab.

3.4 Stufe 3 – Automatische Reporterzeugung

Die bisher vorgestellten Verfahren erfordern eine manuelle Interpretation der Analyseergebnisse und adressieren die Weitergabe der identifizierten Abweichungen nur unzureichend. In vielen Anwendungsfällen ist jedoch eine strukturierte und standardisierte Übergabe von Qualitätsinformationen erforderlich.

Dies zeigt sich insbesondere in zwei typischen Szenarien. Bei der Erstellung von As-Built-Modellen im Rahmen der **Digitalisierung von Bestandsgebäuden** werden Abweichungen zwischen Modell und Messdaten identifiziert und an eine separate Qualitätssicherungs- oder Modellierungsinstanz zurückgespielt, entweder als separater Report oder als Parameter an den Bauteilen.

In der **Baufortschrittsüberwachung** werden Abweichungen zwischen aktuellem Bauzustand (Punktwolke) und geplantem Zielzustand (BIM-Modell) dokumentiert und in Form von Berichten kommuniziert.

Die Identifikation relevanter Abweichungen ist insbesondere bei großen Projekten mit umfangreichen Punktwolken zeitaufwendig. Liegen jedoch klare Toleranzdefinitionen oder Schwellwerte vor, kann der Prozess weitgehend automatisiert werden. Werkzeuge der Stufe 3 können anhand dieser Daten Distanzanalysen automatisiert auswerten und strukturierte Qualitätsberichte (Reports) generieren.

Ein solcher Report enthält typischerweise eine Übersicht aller relevanten Abweichungen in tabellarischer Form, sowie eine detaillierte Darstellung der betroffenen Bereiche oder Bauteile. Für jedes analysierte Element werden dabei Kennwerte wie etwa der Überdeckungsgrad zwischen Modell und Punktwolke, die minimale, maximale, mittlere oder mediane Abweichung, eine Bewertung der Toleranzeinhaltung und ein Maß für die Zuverlässigkeit bzw. Konfidenz der Auswertung angegeben.

Die Werkzeuge lassen sich in drei Kategorien einteilen, die sich an ihrem primären Anwendungsfokus orientieren

Anwendungen zur **Modellkontrolle** fokussieren sich auf die Identifikation von Modellierungsfehlern und geometrischen Inkonsistenzen auf Bauteilebene. Sie bieten detaillierte Analysefunktionen und sind häufig direkt in bestehende CAD- oder BIM-Workflows integriert.

Ein Vertreter ist ClearEdge3D Verity, ein Desktop-basiertes Analysewerkzeug, das Abweichungen zwischen Punktwolken und Bauteilen in BIM-Modellen automatisiert erkennt und auswertet. Das System lässt sich mit Anwendungen wie Autodesk Revit und Navisworks verknüpfen, so dass Ergebnisse in diese Systeme zurückgespielt werden können (ClearEdge3D, 2026).

Werkzeuge zur **Ausführungskontrolle** konzentrieren sich auf die Qualitätssicherung während der Bauausführung. Im Mittelpunkt steht die Überprüfung, ob Bauleistungen den definierten Spezifikationen und Toleranzen entsprechen.

Ein Beispiel hierfür ist CheckToBuild. Das System kombiniert Messdaten mit projektspezifischen Anforderungen und nutzt automatisierte Auswertungen, um Abweichungen zu identifizieren und in strukturierten Berichten darzustellen (CheckToBuild, 2026).

Werkzeuge zur **Fortschrittskontrolle** dienen primär der kontinuierlichen Überwachung und Einschätzung des Baufortschritts. Hier werden regelmäßig erfasste Messdaten mit dem geplanten Zielzustand verglichen, um den aktuellen Projektstatus zu bestimmen. Ein Beispiel ist Imerso, bei dem ein BIM-Modell fortlaufend mit aktuellen Scans abgeglichen wird. Auf dieser Basis werden Abweichungen sowie Fortschrittskennzahlen abgeleitet und visualisiert (Imerso, 2026).

Werkzeuge dieser Stufe zeichnen sich durch einen hohen Grad an Automatisierung aus. Da sie gezielt nur solche Bereiche hervorheben, die definierte Schwellenwerte überschreiten, reduzieren sie den manuellen Analyseaufwand erheblich. Gleichzeitig ermöglichen sie eine bessere Skalierbarkeit für große Projekte und liefern objektive, reproduzierbare Ergebnisse. Die Aussagekraft der Ergebnisse hängt jedoch weiterhin von der Qualität der Eingangsdaten sowie der Wahl geeigneter Toleranzdefinitionen ab.

4 Einordnung in den Modellierungsprozess

Neben der Detektion von Abweichungen und Fehlern ist die zeitliche Rückkopplung der Ergebnisse ein entscheidender Faktor für die Wirksamkeit der Qualitätskontrolle. Werkzeuge, die erst spät im Prozess eingesetzt werden oder nur eine verzögerte Rückmeldung ermöglichen, reduzieren den potenziellen Nutzen erheblich, da erkannte Abweichungen erst mit zeitlichem Abstand korrigiert werden können.

Die meisten der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Anwendungen sind als spezialisierte Analysewerkzeuge konzipiert und werden typischerweise als eigenständiger Prozessschritt eingesetzt. Insbesondere bei der Modellierung von Bestandsgebäuden ergibt sich daraus häufig ein sequenzieller Workflow: Nach der Modellierung wird das Ergebnis an eine separate Instanz zur Qualitätsprüfung übergeben, dort analysiert und dann mit Korrekturhinweisen, beispielsweise über die BCF-Schnittstelle, an die Modellierung zurückgespielt. Dieser iterative Prozess führt zu zusätzlichen Abstimmungsaufwänden und Verzögerungen.

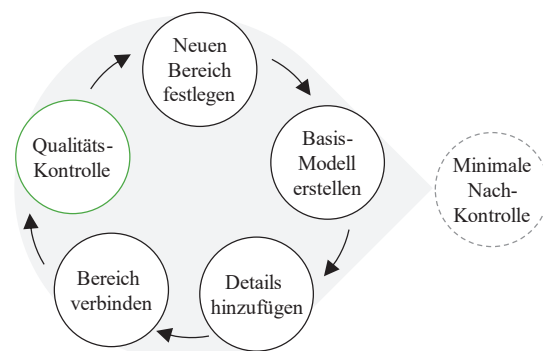


Abbildung 5 Integration der Qualitätskontrolle in den Modellierungskreislauf

Demgegenüber erscheint eine stärker integrierte Einbettung der Qualitätskontrolle in den Modellierungsprozess naheliegend. In einem solchen Ansatz erfolgt die Prüfung unmittelbar während der Modellierung, sodass Abweichungen direkt erkannt und korrigiert werden können. Dies reduziert

den Bedarf an nachgelagerten Prüf- und Abstimmungsprozessen und ermöglicht eine kontinuierliche Qualitätssicherung. Abbildung 5 illustriert diese Integration.

Um solch einen Arbeitsmodus zu ermöglichen, müssen die Werkzeuge mehrere Anforderungen erfüllen. Erstens ist eine tiefe Einbettung in bestehende Autorensysteme erforderlich, um Medienbrüche zu vermeiden. Zweitens muss die Analyse mit geringer Latenz durchführbar sein, um eine unmittelbare Rückmeldung zu ermöglichen. Drittens sollte die Anwendung ohne umfangreiche Spezialkenntnisse möglich sein, damit die Qualitätsprüfung direkt durch Modellierende durchgeführt werden kann.

Ansätze finden sich bereits in Systemen wie AutoCAD mit FAROs As-Built-Plugins oder Autodesk Revit gemeinsam mit Qbitech for Revit, die eine modellnahe Auswertung von Punktwolken ermöglichen. Eine vollständige Integration in den Modellierungsprozess ist jedoch nur eingeschränkt realisiert.

5 Zukünftige Stufen

Zukünftige Entwicklungen lassen sich im Wesentlichen in zwei Richtungen einordnen: zum einen die besprochene stärkere Integration der Qualitätskontrolle in bestehende Modellierungsprozesse und zum anderen eine weitergehende Automatisierung.

Hier ist insbesondere die automatisierte Detektion von Abweichungen bereits heute weit fortgeschritten (Gourguechon et al. 2022). Darüber hinaus erscheinen auch teilautomatisierte Korrekturvorschläge für digitale Modelle möglich, insbesondere im Kontext von Scan-to-BIM-Workflows. Vollständig automatisierte Modellanpassungen sind jedoch bislang nur für klar strukturierte Szenarien realisierbar und erfordern stark vereinfachte Randbedingungen.

Für weitergehende Automatisierung werden zunehmend KI-gestützte Verfahren diskutiert, insbesondere aus der 3D-Datenverarbeitung und Mustererkennung (Queruel et al. 2024). Voraussetzung für eine umfassende Automatisierung wäre jedoch eine weitgehend vollständige Formalisierung der Qualitätskriterien, etwa in Form eindeutig definierter Toleranzen, vollständiger Messdaten sowie konsistenter semantischer Modellinformationen (Mahmoud et al. 2026).

Unter solchen Bedingungen könnten Qualitätsbewertungen und teilweise auch Korrekturvorschläge algorithmisch abgeleitet werden.

Die praktische Anwendung weicht jedoch deutlich von diesen idealisierten Voraussetzungen ab. Punktwolken sind oft unvollständig oder verrauscht, Toleranzen sind nicht für alle Bauteilgruppen eindeutig definiert, und projekt-spezifische Randbedingungen implizit dokumentiert. In solchen Si-

tuationen bleibt die Interpretation der Ergebnisse und die Ableitung geeigneter Maßnahmen eine Aufgabe menschlicher Expertise, insbesondere wenn Entscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden müssen.

Hinzu kommen organisatorische und rechtliche Rahmenbedingungen. In der Baupraxis liegt die Verantwortung für Planung und Ausführung weiterhin bei den beteiligten Fachplanern und ausführenden Unternehmen. Dies führt dazu, dass automatisierte Prüfergebnisse in der Regel durch Fachpersonal validiert werden müssen, bevor sie als Entscheidungsgrundlage dienen können. Die Verifikation automatisierter Prüfsysteme sowie die Nachvollziehbarkeit ihrer Ergebnisse stellen daher zentrale Anforderungen an zukünftige Entwicklungen dar.

Dennoch zeigen die vorgestellten Werkzeuge, dass bereits mit heutigen Technologien ein erheblicher Teil vermeidbarer Fehler frühzeitig erkannt werden kann. Dies trägt sowohl zur Verbesserung der Projektqualität als auch zur Steigerung der Effizienz bei und unterstreicht das Potenzial weiterführender Automatisierungsansätze.

Literaturverzeichnis

- ASTM International. (2020). ASTM E1155-20: Standard test method for determining FF floor flatness and FL floor levelness numbers.
- Autodesk. (2026a). AutoCAD 2026 Help | To Attach a Point Cloud to a Drawing. <https://help.autodesk.com/view/ACD/2026/ENU/?guid=GUID-6AA028D2-9F58-490B-B58E-B40F98BE245E>
- Autodesk. (2026b). Insert and work with ReCap point clouds in Revit |Autodesk. <https://www.autodesk.com/learn/ondemand/tutorial/insert-and-work-with-recap-point-clouds-in-revit>
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Bonduel, M., Bassier, M., Vergauwen, M., & De Meyer, R. (2017). Scan-to-BIM output validation: Towards a standardized geometric quality assessment of building information models based on point clouds. *ISPRS Archives, XLII-2/W8*, 45–52. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-45-2017>
- Bosché, F. (2010). Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. *Advanced Engineering Informatics*, 24(1), 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2009.08.006>

- Bricsys. (2026). Working with Point Clouds – BricsCAD Lite & Pro | BricsCAD Help Center. <https://help.bricsys.com/en-us/document/bricscad/point-cloud/working-with-point-clouds>
- CheckToBuild. (2026). CheckToBuild | AI-Powered Construction Quality Control Platform. <https://www.checktobuild.com>
- Chen, Y., & Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3), 145–155. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(92\)90066-C](https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C)
- Cintoo. (2026a). Cintoo – Digital Twin Platform & Reality Capture Software. <https://www.cintoo.com>
- Cintoo. (2026b). Comparison tools – Scans and Models. <https://help.cintoo.com/en/support/solutions/articles/101000462028-comparison-tools-scans-and-models>
- ClearEdge3D. (2026). Verity | Construction Quality Control Software | ClearEdge3D <https://www.clearedge3d.com/products/verity/>
- CloudCompare. (2021). Distances computation. https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Distances_Computation
- DIN Media. (2019a). DIN 18202:2019-07, Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. <https://doi.org/10.31030/3061349>
- DIN Media. (2019b). DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze (ISO 19650-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 19650-1:2018. <https://doi.org/10.31030/3030494>
- FARO. (2026a). Getting Started with As-Built for AutoCAD Software. https://knowledge.faro.com/Software/As-Built/As-Built_for_AutoCAD_Software/Getting_Started_with_As-Built_for_AutoCAD_Software
- FARO. (2026b). Sphere XG Platform Overview. <https://www.holobuilder.com/platform/>
- FARO. (2026c). As-Built Modeler – FARO Knowledge Base. https://knowledge.faro.com/Software/As-Built/As-Built_Modeler
- Gourguechon, C., Macher, H., & Landes, T. (2022). Automation of as-built Bim creation from point cloud: An overview of research works focused on indoor environment. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2022, 193–200. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xliii-b2-2022-193-202>
- Graphisoft. (2026). BIMmTool | Point Cloud & Renovation Workflows for Archicad. <https://www.graphisoft.com/en-im/partner-solutions/bimmtool/>
- Imerso. (2026). Product | Imerso construction software. <https://www.imerso.com/product>
- Leica Geosystems. (2026). Cyclone 3DR | Leica Geosystems. <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr>
- Mahmoud, M., Li, Y., Adham, M., Mansour, A., & Chen, W. (2026). Indoor 3D point cloud reconstruction for scan-to-BIM automation. *Automation in Construction*, 184(106853), 106853. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106853>
- NavVis. (2025). Overview of NavVis IVION Documentation. <https://knowledge.navvis.com/docs/overview-of-documentation>
- Nemetschek Group. (2020). Accurate Design with Point Clouds. <https://www.allplan.com/blog/point-clouds/>
- OpenScanTools. (2026). Free and open source point cloud software - OpenScanTools. <https://openscantools.com>
- Qbitech (2026). Qbitech for Revit – Reality Capture Data way more efficient in Autodesk Revit. <https://qbitech.com>
- Queruel, M., Bornhofen, S., Histace, A., & Ducoulombier, L. (2024, June 3). Scan-to-BIM: Unlocking current limitations through Artificial Intelligence. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. Presented at the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Lille, France. <https://doi.org/10.22260/isarc2024/0135>
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., & Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7), 829–843. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
- Trimble. (2026). 3D Scanning Software for Construction – Trimble RealWorks. <https://www.trimble.com/en/products/building-construction-field-systems/trimble-realworks>
- U.S. Institute of Building Documentation. (2026). Level of Accuracy (LOA) version 3.1 specification. <https://usibd.org/level-of-accuracy/>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building information modeling for existing buildings— Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109–127. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Ware, C. (2013). *Information visualization: Perception for Design*. Elsevier.

Digitale Kartierung – Ein Entwicklungsprozess von Methoden für 2D/3D Objektdokumentation, Auswertung, Analyse und Abrechnung

Gunnar Siedler¹, Sebastian Vetter¹, & Jens Kaminsky²

Zusammenfassung

Wenn man die Hintergründe und die Motivation für die Weiterentwicklung der Kartierungssoftware erklären will, muss man sowohl auf die Entwicklung der Dokumentationsverfahren als auch auf Digitalisierung der Datenauswertung für Zustandsanalyse, Schadenskartierung, Ausführungspläne und Abrechnungsdokumentation verweisen.

In den letzten zwei Jahrzehnten erlebten wir einen Entwicklungsprozess von Mess- und Kameratechnik sowie der dazugehörigen Softwarelösungen für die geometrischen Erfassungsmethoden, der eine stetige Weiterentwicklung von Datenschnittstellen, Datenhandling und Auswertewerkzeugen erfordert. Um die Jahrtausendwende waren 2D Kartierungen auf der Grundlage von digitalen Bildplänen, CAD-Auswertungen oder digitalisierte analoge Vorlagen Stand der Technik. In den letzten 10 Jahren haben sich 3D-Verfahren wie Laserscanning und Structure from Motion (SfM) etabliert, mit dem Ziel der vollständigen dreidimensionalen Erfassung der Objektoberfläche, verbunden mit der Entwicklung von 3D-Kartierungsfunktionalität. Aktuell werden Methoden zur Integration von dreidimensionalen zerstörungsfreien Messverfahren (THz., Bauradar) zur Erweiterung der Analysemöglichkeiten entwickelt.

Unter diesen zwei Gesichtspunkten, dem dynamisch fortschreitenden Prozess der Digitalisierung und der Veränderung der Anforderungen der Anwender an den Auswertungsprozess gibt der Beitrag einen Überblick über die Entwicklung der Kartierungssoftware, von ihrem Anfang 1999 bis zum jetzigen Zeitpunkt 2025.

Anhand aktueller Forschungs- und Entwicklungsprojekte (FuE) im Bereich der Photogrammetrie und der Scandatenauswertung wird ein Ausblick auf die Integration von zukünftig möglichen digitalen Dokumentationsmethoden und Auswerteverfahren gegeben.

Schlagwörter 3D-Kartierung · Objektdokumentation · Mengenermittlung · GAEB-Schnittstelle · IFC-Schnittstelle · Structure from Motion

1 Dokumentation in den Neunzigern – Digital oder Analog?

Zu Beginn der 1990er Jahre erlebten wir zunächst einen schrittweisen Übergang zur Digitalisierung bisheriger Dokumentationsmethoden (Zeichnung/Fotografie). Das analoge Zeichnen wurde ersetzt durch die CAD-Zeichnung, die zum Teil durch tachymetrisch eingemessene Koordinaten unterstützt wurde. Die klassische SW-Foto-dokumentation wurde abgelöst von digital entzerrten und montierten Bildplänen, basierend auf digitalisierten Negativen.

Der ungeplante Ausgangspunkt für die Entwicklung der ersten Version des Kartierungsprogrammes war ein kostenfreier Viewer, der Mitte der 90er für die Auslieferung der maßstabsgerechten Bildpläne an Dienstleistungskunden der fokus GmbH Leipzig mit auf die Daten-CD kopiert wurde.

Er erlaubte das Messen von Strecken, Flächen und Höhen auf der Maßstabsebene des Bildplanes. Auf gezielte Kundennachfrage von verschiedenen Anwendern wurden die Grundanforderungen für ein Kartierungsprojekt konzipiert, in dem die bisherigen Einzelmessungen als Vektorobjekte thematisch sortiert und abgespeichert werden sollten. (Godding, 1992; Hemmleb, 2000; Hemmleb 2001)

1.1 Digitale Kartierung mit metigo® MAP 2.X (1999-2006)

Über die Klassenverwaltung konnten Kartierungsthemen getrennt nach Mengenermittlungstyp Fläche, Länge (Linie) und Stückzahl (Bildsignatur) angelegt und mit Signaturen (Farben, Schraffuren, Linien) versehen werden. Mit den Einstellungen der Klassenverwaltung wurde automatisiert eine Legende eingeblendet (Abb. 1).

¹ fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig, E-Mail: home@fokus-gmbh-leipzig.de

² Restauratorische Bauplanung Jens Kaminsky, Wartburgstr. 11, 08525 Plauen, E-Mail: mail@jenskaminsky.de

Als Kartierungsgrundlage diente eine maßstabsgerecht entzerrte Bildebene (Hemmler 2000), welche über ein Rechteck entzerrt werden konnte oder als bereits entzerrtes Messbild importiert werden konnte. Als Export standen der maßstabsgerechte Bildexport mit vorher wählbaren Kartierungsklassen und der Export in eine Textdatei mit der Massenstatistik der Kartierungsklassen zur Verfügung.

Einfach ausgedrückt, ersetzte die Version 2.X die klassische Handkartierung auf dem Bild mit den Vorteilen, dass Stifffarbe und Signatur in der Klassenverwaltung nachträglich digital beliebig ausgetauscht/angepasst werden konnten und dass das Ergebnis der Mengenermittlung (Stückzahl, Fläche und Länge) automatisiert berechnet wurde und über CSV-Datei exportierbar war.

Die ersten Anwender waren „digital affine“ Restauratoren aus den Bereichen Voruntersuchung und Restaurierungsplanung für Naturstein- und Wandrestaurierung, für die die Effizienz der Mengenermittlung von Anfang an ein wichtiges Ergebnis der Kartierung ist.

Die für viele Restauratoren entscheidenden Nachteile waren der Kostenaufwand für die Anschaffung von PC, Digitalkamera und Software sowie die Umstellung der bisher gewohnten analogen Arbeitsweise.

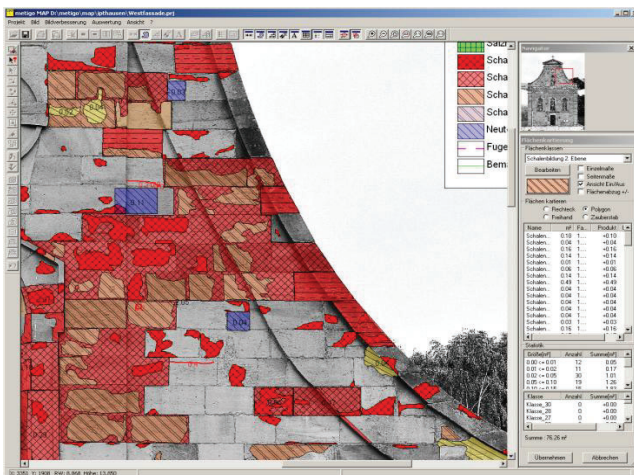


Abbildung 1 Digitale Kartierung mit metigo® MAP 2.X; Ipthausen Wallfahrtskirche, Westfassade; Kartierung: Dipl.-Rest. H. Romstedt, Kirchheim/Thür. (2002)

2 Dokumentation in den 2000ern - CAD oder Bildplan?

Aus technologischer Sicht kann in dieser Zeitspanne auf mehrere, grundlegende Entwicklungen verwiesen werden: erste Laserscanner im Bauwesen, Etablierung reflektorlos

messender Tachymeter in der Bauaufnahme, bezahlbare Negativ-Scanner mit bis zu 2500 dpi Auflösung, erste Digital-kameras (beginnend von 4MP bis 12MP), Übergang von 32BIT auf 64BIT im Bereich Betriebssystem und PC-Hardware, Tintenstrahlplotter für die Druckausgabe von Bilddateien sowie die Weiterentwicklung von Leistungsparametern der notwendigen Datenträgern für den Datenaustausch.

2.1 Digitale Kartierung mit metigo® MAP 3.0 (2007-2012)

Im Vergleich zur Version 2.X konnten wir über die ersten 200 Softwarekunden Projekterfahrungen einsammeln und mit diesen die Anforderungen für die Weiterentwicklung definieren. Parallel dazu hatten sich die Hard- und Softwarevoraussetzungen für die Dokumentation erheblich verbessert.

Im Bereich der Kartierungsgrundlage konnten jetzt mehrere Bildebenen entzerrt und montiert werden, was nun auch das deckungsgleiche und transparente Überlagern verschiedener Bildinhalte oder Aufnahmeverfahren zulässt (Abb. 2).

Bildmontagen konnten bei genügend Arbeitsspeicher in beliebiger Dateigröße erstellt werden, wobei lange Zeit die Limitierung von 30.000 Pixeln Kantenlänge (Adobe Photoshop) für Bilddateien maßgebend war.

Alternativ dazu konnten mit der DWG/DXF-Schnittstelle CAD-Zeichnungen als Kartierungsgrundlage importiert und bei Bedarf mit Bildebenen kombiniert werden. Gleichzeitig konnte die Kartierung nach Fertigstellung über diese Schnittstelle als DWG/DXF-Datei exportiert werden.

In der Klassenverwaltung konnten die ersten zusätzlichen Datenfelder für die Mengenermittlung (z.Bsp. Massenermittlung nach Handaufmaß) zugewiesen werden.

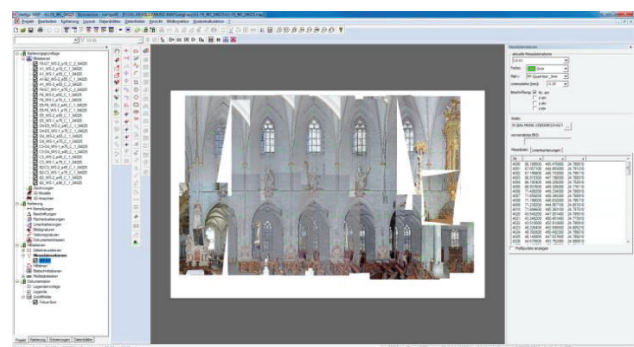


Abbildung 2 Digitale Bildentzerrung und Montage; Bildentzerrungsprojekt mit tachymetrisch gemessenen Koordinaten; Salem, Münster, Dokumentation Raumfassung und Ausstattung (2013, fokus GmbH Leipzig)

Eine wesentliche Erweiterung war die Projekthierarchie, welche die Organisation, Anpassung und Auswertung einer Vielzahl von Kartierungsprojekten in einer Struktur erlaubt. Über ein zentrales Musterprojekt (Kartierungsvorlage) konnten die Einstellungen der Projekte automatisiert angepasst und erweitert werden (Abb. 3). Die ersten Impulse hierzu kamen von Projektmitarbeitern der FH Köln (FB Stein, Prof. Leisen), welche metigo® MAP bei größeren Dokumentationsprojekten mit mehreren Studenten einsetzten.

Der Massensexport konnte nun sowohl für die einzelne Kartierung als auch für mehrere Kartierungsprojekte in einer Projekthierarchie Klassen- und Gruppenweise ausgeführt werden. Mit Hilfe integrierter VBA-Funktionalität kann die Massenauswertung direkt in MS-Excel/OpenOffice als eine Datei mit mehreren Karteikarten (je Klasse, Gruppe) geschrieben werden.

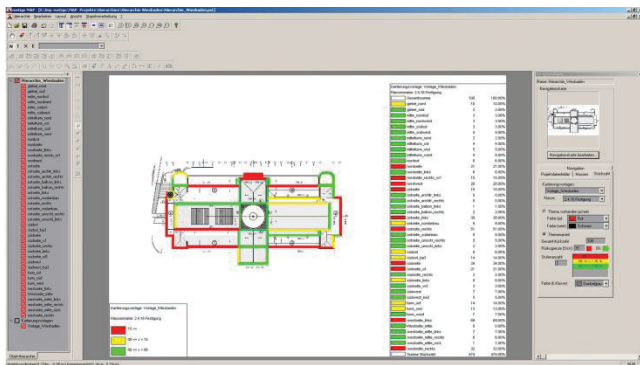


Abbildung 3 Digitale Kartierung mit Projekthierarchie in metigo® MAP 3.0; Navigationskarte Projekthierarchie mit Legende Stückzahl für eine ausgewählte Abrechnungsposition; Wiesbaden, Kurhaus, Digitale Maßnahmenkartierung; Jens Kaminsky, Plauen (2009)

3 Dokumentation seit den 2010ern - 3D und Digital

3D-Laserscanning und Structure from Motion als 3D-Dokumentationsverfahren konnte sich dank zunehmender Leistungsfähigkeit der Hardware (Mehrkernprozessoren, Grafikkarten) immer stärker in der Bauaufnahme und der Zustandsdokumentation etablieren.

Die Bereitstellung/Auslieferung der Daten über Daten-server mit einem vereinfachten/kostenfreien Zugriff für alle Projektbeteiligten führte auch zu einer zunehmenden Digitalisierung in den beteiligten Büros.

3.1 Digitale Kartierung mit metigo® MAP 4.0 (2013-2021)

Basierend auf den Möglichkeiten durch SfM für die 3D-Objektdokumentationen, wurde als neue Kartierungsgrundlage der Import von texturierten 3D-Modellen (VRML, OBJ, STL ohne Textur) und damit verbunden ein 3D-Anzeigefenster in die Oberfläche integriert. Über die Modellansichtsfenster besteht die Möglichkeit der maßstabsgerechten Orthogonalprojektion für die 2D-Druckausgabe mit oder ohne Kartierungsinformation. Die Modellansichten prüfen automatisch, welche Kartierungselemente in Abhängigkeit der Ansichtsperspektive angezeigt werden müssen. Über die Jahre erfolgte die schrittweise Erweiterung und Verbesserung von Auswerte- und Signaturanzeigefunktionalität für 3D-Kartierung auf texturierten Oberflächenmodellen (Abb. 4).

Die Erweiterung der Kartierungsfunktionalität erfolgte im Sinne des Aufmaßes für die Abrechnung von Restaurierungs- und Sanierungsprojekten. Die Abläufe für die Eingabe und Auswertung von Handmaßen wurden erheblich verbessert. Für die in Leistungsverzeichnissen geforderten Abrechnungsmodalitäten, wie Mindestabrechnungsgröße, Fläche des kleinsten umschließenden Rechteckes und Größenklassen, wurden Funktionalitäten entwickelt und integriert. Für die Kostenschätzung und Nachkalkulation von Restaurierungsprojekten wurde ein Modul für die Kostenkalkulation basierend auf den Ergebnissen der Kartierung unter Berücksichtigung von Teilpositionen für Arbeitszeit, Material- und Gerätekosten und möglichen Zuschlägen integriert. (Siedler, 2018; Siedler, 2020; Siedler 2022)

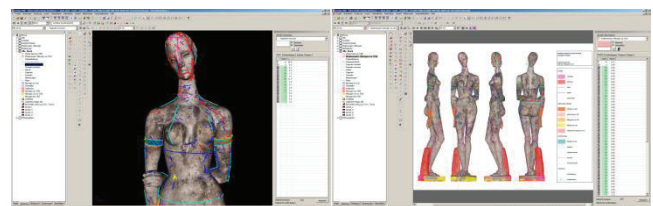


Abbildung 4 3D-Kartierung auf texturiertem Oberflächenmodell; Links: 3D-Anzeige im Kartierungsprogramm; Rechts: Abwicklung der Modellansichten mit Einblendung der Kartierungsdaten Große Sinnende, Wilhelm Lehmbruck, Staatsgalerie Stuttgart; 3D-Objektdokumentation (SfM): fokus GmbH Leipzig; 3D-Kartierung Restaurator Peter Bux, Leipzig (2018)

Zusätzlich wurde für den Import von Leistungsverzeichnissen und den Export von Aufmaßergebnissen eine kommerzielle GAEB-Schnittstelle integriert (Dangl-IT), (GAEB = „Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen“ fördert Rationalisierung im Bauwesen mittels Datenverarbeitung). Dabei wird je LV-Position eine Kartierungsklasse angelegt und entsprechende Abrechnungsdatenfelder zugewiesen. So können jederzeit erfasste Kartierungs-/Aufmaßbeiträge positionsgerecht für Rechnungslegung exportiert werden.

Speziell durch die Vervollständigung der Abrechnungsfunktionalitäten konnten in zunehmende Maße Handwerksbetriebe in der Denkmalsanierung als neue Kundengruppe hinzugewonnen werden, welche die Kartierungssoftware für ein effizientes digitales Aufmaß für die Abrechnung verwenden.

Die Einführung von Nutzerverwaltung und automatisierten Datenfeldern für die Kartierungshistorie erlaubt den Abgleich und die Aktualisierung von Kartierungsprojekten im Rahmen eines Mosaikprojektes. Des Weiteren wurde eine flächenbasierte Analyse von Kartierungsdaten zur besseren Auswertung von Schadens- und Mengenverteilungen im Untersuchungsbereich integriert (Abb. 5).

Für die bessere Organisation von Hierarchieprojekten wurde ein Analysedialog zum Abgleich von Kartierungsprojekten umgesetzt. Über die Navigationskarte wurde die visuelle Analyse von Schadensintensitäten, Mengen und Projektdatenfeldern wesentlich erweitert. (Siedler, 2018)



Abbildung 5 Digitale Kartierung mit Projekthierarchie in metigo® MAP 4.0; Links: Navigationskarte Projekthierarchie mit Einfärbung der Projekte nach Projektdatenfeldern; Potsdam, Neues Palais, SPSG; Kartierung/Maßnahmenplanung: Dipl.-Rest. Michael Wirth, Potsdam (2014, SPSG)

4 FuE-Projekte zur Erweiterung der technologischen Basis

Im Gegensatz zu den klassischen Kartierungs- und Auswertefunktionen ist der finanzielle Entwicklungsaufwand für die Integration von neuen Dokumentationsmethoden und damit verbundenen Kartierungsgrundlagen wesentlich höher und lässt sich nur schwer über den vorhandenen Softwareumsatz finanzieren. In diesem Sinne wurden mit verschiedenen Projektpartnern nachfolgend aufgelistete FuE-Projekte realisiert bzw. sind aktuell noch in Bearbeitung. Sie geben einen Überblick über die Bemühungen der langfristigen strategischen Weiterentwicklung von metigo® MAP um aktuelle Entwicklungen von Dokumentationsmethoden als Kartierungsgrundlagen integrieren zu können.

4.1 FuE-Projekt „OPDETRISS“ (2019-2022)

Zielstellung für das FuE-Projekt „OPDETRISS“ war die Entwicklung von Softwarefunktionalität zur optischen Erfassung von Oberflächenveränderungen und die Entwicklung von Algorithmik zur Parametrisierung von Rissen und zur Analyse von Verformungen an Mauerwerkskonstruktionen basierend auf SfM-/TLS-Daten (Projektpartner: MFPA Weimar, Büro Trabert & Partner Weimar, fokus GmbH Leipzig;).

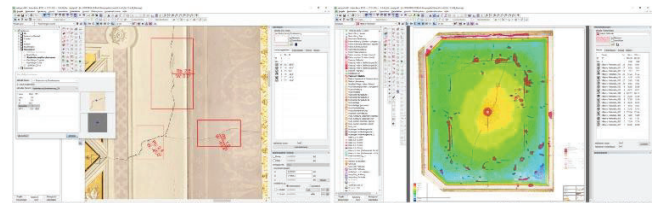


Abbildung 6 Riss- und Deformationsanalyse: Links: Einzelmessung Rissdedektion mit Anzeige Bewegungsrichtung; Rechts: Überlagerung Bildplan mit Deformationseinfärbung der Scandaten und Zustandskartierung Schloss Weimar, Roter Saal, Digitale Kartierung: Dipl.-Rest. Uwe Rähler, Großröhrsdorf (2021)

Teilaufgabe der fokus GmbH Leipzig war dabei die Ausführung von Deformationsmessungen an Architekturobjekten und Demonstratoren. Dies erfolgte parallel mit 3D-Laserscanning und bildbasiert über SfM. Auf Grundlage der erfassten Daten erfolgte die Entwicklung von Algorithmik für die Scandatenauflbereitung (verschmolzene PW) und die

Deformationsanalyse nach verschiedenen Geometrieansätzen. Hierfür kann für jede Analyse ein extra Punktfarbenlayer angelegt werden, für welchen die Einfärbung der Punkte entsprechend der ausgewählten Deformationsanalyse berechnet und bei Bedarf kombiniert angezeigt wird.

Für eine bildbasierte parametrisierte Risserkennung erfolgt die Integration der Algorithmenentwicklung des beteiligten Projektpartner TRABERT + PARTNER (Friedrich Romstedt, Erfurt), welche die Parameterbestimmung von Rissbreite und Öffnungswinkel im entzerrten Bildausschnitt erlaubt. Auf dieser Grundlage erfolgte die Entwicklung von Automatismen, mit denen die Bestimmung des Konturverlaufs von Rissen im entzerrten Bild möglich ist. Die Genauigkeit der Rissanalyse ist dabei natürlich abhängig von der zugrunde liegenden Bildqualität der Kartierungsgrundlage. (Abb. 6)

Sowohl Deformations- als auch Rissanalyse werden im 3D-Modul ab der Version metigo® MAP 5.0 zur Verfügung gestellt.

4.2 Digitale Kartierung mit metigo® MAP 5.0 (ab 2022)

Im Bereich der Kartierungsgrundlage wurde in dem speziellen 3D-Modul für Laserscandatenauswertung eine umfangreiche Funktionalität für die Auswertung von 3D-Laserscandaten integriert (FuE-Projekt OPDETRISS). Der Funktionsumfang wurde so konzipiert, dass die registrierten 3D-Laserscandaten vom zuständigen Amt, dem Architekten oder aber vom Dokumentationsdienstleister (Vermessungsbüro) direkt zur Verfügung gestellt werden. Die Anschaffung eines 3D-Laserscanners ist somit nicht Voraussetzung.

Am Anfang stehen Funktionen für die Punktwolkenaufbereitung (Import, Filterung, Verschmelzung) bereits

bestehender Scandaten zur Verfügung. Auf diese Weisen können die ursprünglich doch sehr umfangreichen Scandaten auf ca. 5-10% der Ausgangsdaten reduziert und auf wenige bereichsabhängige Teilpunktwolken (Fassade, EG, IOG, Dach...) vereinfacht werden. Alle weiteren Funktionen sind für die Auswertung einer verschmolzenen PW mit einem vom Nutzer für die Aufgabenstellung definierten Punktabstand konzipiert (Abb. 7, 8).

Eine wesentliche Bedingung für erfolgreiche Datenreduktion beim Verschmelzen von Laserscandaten ist das Verfahren der automatisierten Registrierung von Scanstandpunkten über die Detektion von Ebenen (Wujanz, 2018). Schlechte Scannereigenschaften bzw. ungenaue Scandatenregistrierung führen zu verrauschten Daten bzw. doppelten Wandschichten, welche sich nur schwer automatisiert bereinigen lassen.

Neben den bereits bekannten 2D-Orthoprojektionen von eingefärbten Punktwolken (Intensität, Farbe, Deformation) über die Modellansichten besteht die Möglichkeit, horizontale und vertikale Schnittprofile aus der Punktwolke zu generieren und diese auf die entsprechende Planebene zu projizieren. Für die CAD-Auswertung basierend auf der 3D-Punktwolke stehen verschiedene 3D-Messfunktionen für relative und absolute Höhenbemaßungen, Umklappungen von Gewölben, Brüstungshöhen und 3D-Polygonwerkzeuge für Konstruktionshilfslinien zur Verfügung.

Parallel dazu können in der 3D-Punktwolke auch Referenzkoordinaten für die 2D-Bildentzerrung gemessen werden. Dies erspart Restauratoren und Handwerkern das Messen von Referenzstrecken am Objekt und führt zu einer erheblichen Verbesserung der Genauigkeit von Bildentzerrung und Montage (Abb. 9).

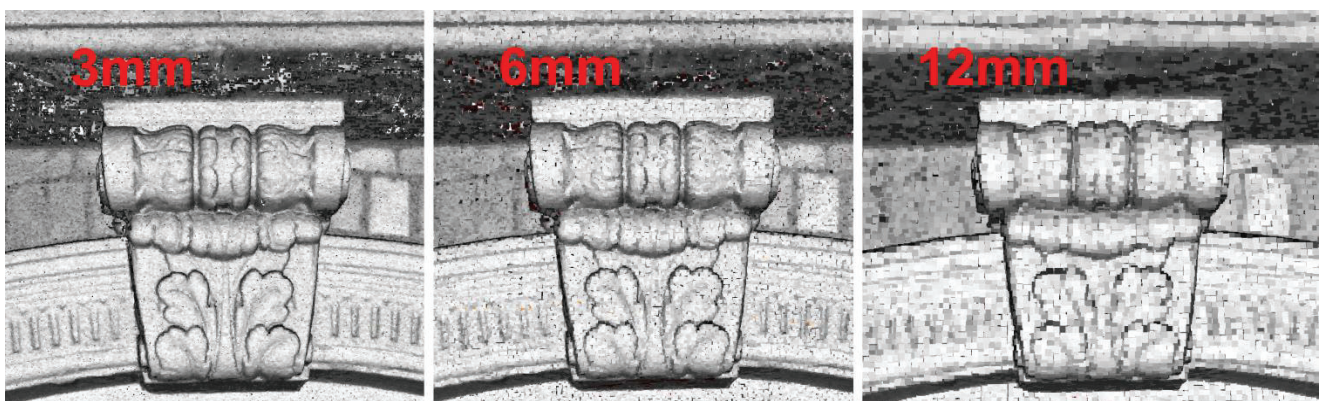


Abbildung 7 Qualitätsparameter Punktabstand bei verschmolzener Punktwolke (z.Bsp.: 3mm, 6mm und 12mm) Hamburg, Hulbe-Haus, Digitale Bildpläne 1:10, 3D Laserscanning als Referenz (2019, Scan3D GmbH Berlin / fokus GmbH Leipzig)

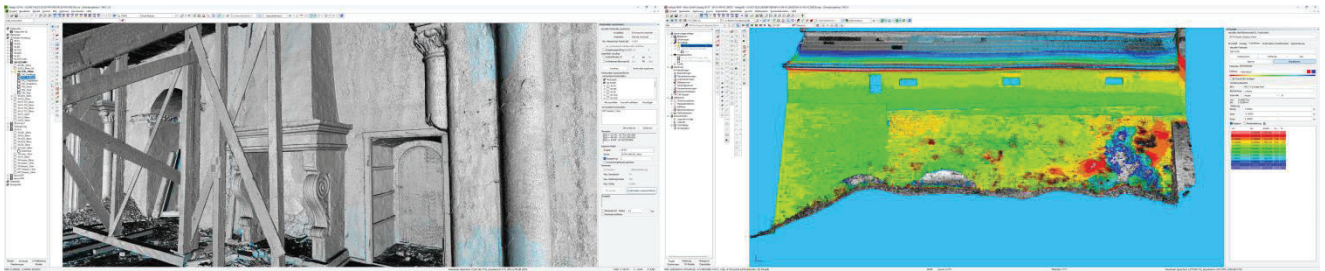


Abbildung 8 3D-Laserscanning, Aufbereitung Scandaten - verschmolzene Punktwolke mit 4mm Punktabstand; Links: Mildenfurth, Klosterkirche/Schloss, 3D-Anzeige verschmolzene Punktwolke, Detail aus 1.OG (2022, fokus GmbH Leipzig); Rechts: – Allstedt, Schloss, Vorburg abstandsbezogene Einfärbung zur Deformationsanalyse (2024, fokus GmbH Leipzig)

Im Bereich der 3D-Kartierung wurde der Befehlsumfang für die Zeichenwerkzeuge auf der 3D-Objektoberfläche erheblich erweitert. Im Architekturbereich gibt es mit der Dombauhütte des Kölner Domes seit 2020 eine enge Zusammenarbeit. Ziel ist die Weiterentwicklung der 3D-Kartierungsfunktionalität in metigo® MAP für die Einführung der 3D Schadens- und Maßnahmenkartierung basierend auf einem texturierten Oberflächenmodell (SfM) für die Architekturoberfläche am Kölner Dom. (Distelrath 2023)

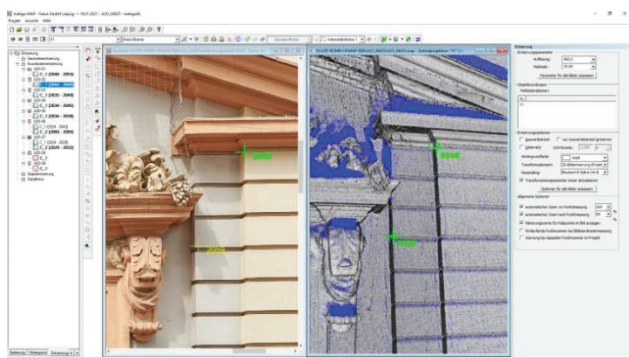


Abbildung 9 Bildentzerrung basierend auf 3D-Laserscandaten mit Zweifensteranzeige für Foto und Punktwolke; Detail bei Koordinatenmessung; Leipzig, Romanushaus, Digitale Bildpläne 1:25 (2019, fokus GmbH Leipzig)

Für die bessere Zusammenarbeit von internationalen Projektpartnern besteht die Möglichkeit in der Klassenverwaltung, mehrere Sprachebenen für Klassenname, Langtext, Maßeinheiten, und Datenfeldbezeichnungen einzurichten. Diese können dann an der Programmoberfläche ausgetauscht bzw. in der Legende kombiniert angezeigt werden.



Abbildung 10 Integration Teilrechnung, Filterung nicht abgerechneter Elemente, Dialog für Anzeige und Verwaltung von Teilrechnungen; Landsberg, Stadtresidenz, Digitale Maßnahmenkartierung, Jens Kaminsky, Plauen (2024)

Im Bereich Aufmaß für die Abrechnung von Restaurierungs- und Sanierungsprojekten werden aktuell Funktionen und Abläufe für die Elementbezogene Abrechnung von Teilleistungen entwickelt und integriert. Für bereits ausgeführte Teilleistung einer Position können anteilige Abrechnungsfaktoren zugewiesen werden. Für nachfolgende Rechnungen werden dabei bereits abgerechnete (Teil-) Positionen berücksichtigt (Abb. 10).

4.3 FuE-Projekt „freeform4BIM“ (2021-2024)

Zielstellung für das FuE-Projekt „freeform4BIM“ war die Entwicklung und Implementation von Methoden zur Modellierung von Freiformflächen basierend auf Punktwolken zur formgetreuen Erzeugung von BIM-Modellen von Bestandsobjekten (Projektpartner: TU Dresden, HTW Dresden, Scan 3D GmbH Berlin, fokus GmbH Leipzig).

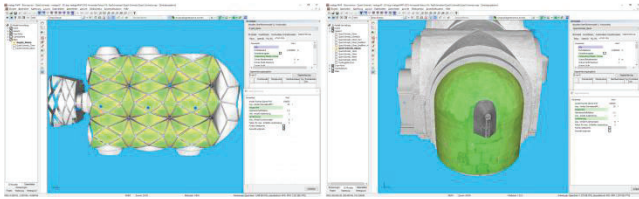


Abbildung 11 automatisierte Segmentierung von Punktwolkensegmenten zur Modellierung; Links: Segmentierung Gewölbesegmente, Rechts: Segmentierung Apsis; Verschmolzene Punktwolke Krypta, fokus GmbH Leipzig, 2021/23

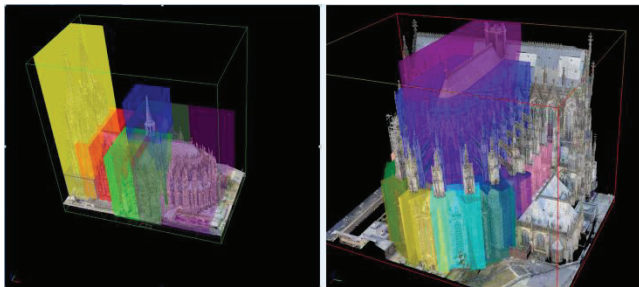


Abbildung 12 strukturierte Punktwolke für Hierarchie und Weitergabe über IFC-Schnittstelle; SfM-Punktwolke für Navigation: Northdocks GmbH, Monheim; Gliederungsstruktur: Dombauhütte Köln; 2021

Die Teilaufgabe der fokus GmbH Leipzig bestand in der Erarbeitung eines Workflows zur teilautomatisierten verformungsgetreuen Erstellung von IFC-konformen Bauteilen auf der Grundlage von Punktwolken. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Punktwolken gefiltert, segmentiert und hierarchisch gegliedert. Darauf aufbauend sollen Geometrielemente formgetreu über Freiformflächen modelliert werden. Dafür erfolgt die Integration von Algorithmenentwicklung der beteiligten Projektpartner (Dordina 2023) sowie einer COM-Schnittstelle für die direkte Übergabe von PW-Segmenten an das CAD-System (Rhino) zur Modellierung (Abb. 11).

Ein weiteres wichtiges Arbeitspaket war die Integration einer IFC-Schnittstelle, welche den Datenaustausch von Bauteilen, strukturierten Punktwolken und 3D-Kartierungsdaten abbilden soll (Abb. 12).

4.4 FuE-Projekt „Pano3D“ (2024-2026)

Zielstellung für das FuE-Projekt „Pano3D“ ist die Entwicklung eines hochpräzisen 3D-Panorama-messsystems, welches für die automatisierte Einfärbung von Laserscandaten/3D Modellen in hoher fotografischer Qualität sowie die Verwendung der Aufnahmen für klassische Aufgabenstellungen wie Bildentzerrungen und Abwicklungen eingesetzt werden kann. (Projektpartner: HTW Dresden Professur für

Photogrammetrie, Dr. Clauß Bild- und Datentechnik GmbH Zwönitz, fokus GmbH Leipzig)

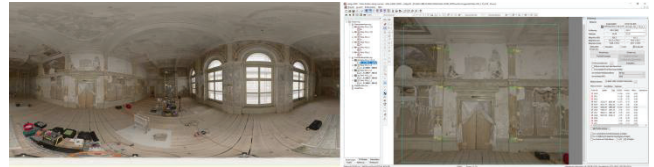


Abbildung 13 Photogrammetrische Auswertung von Panoramaaufnahmen; Links: HDR-Panoramaaufnahme mit integrierter Farbanpassung; Rechts: 2D-Bildentzerrung (Ausschnitt mit Zentralperspektive); Baden (CH), Verenhof: fokus GmbH Leipzig, 2024

Die Teilaufgabe der fokus GmbH Leipzig ist die Integration von photogrammetrischer Algorithmik (Bündelausgleichung), welche vom Projektpartner HTW Dresden entwickelt wird. Auf dieser Grundlage werden verschiedene Anwendungsszenarien zur Ausnutzung der geometrischen und fotografischen Qualität des Panoramakamerasystems (HDR-Aufnahme, Farbanpassung, 32.000x16.000 Pixel) entwickelt. Ein Ziel des geplanten Vorhabens ist es, eine aus mehreren Standpunkten verschmolzene Punktwolke/ Modelloberfläche nachträglich auf Basis mehrerer Panoramaaufnahmen automatisiert in hoher Qualität kolorieren zu können (Abb. 13).

4.5 FuE-Projekt „3DSaxStone“ (2025-2027)

Zielstellung für das FuE-Projekt „3DSaxStone“ ist die Entwicklung einer umfassenden Prozesstechnologie-entwicklung vom digitalen Modell zu additiv gefertigten Natursteinobjekten (Projektpartner: BECKMANN-INSTITUT für Technologieentwicklung e. V. (Chemnitz), Gebr. Preiß Betonsteinwerk (Chemnitz) und Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., fokus GmbH Leipzig).

Die Teilaufgabe der fokus GmbH Leipzig besteht in der Entwicklung von Funktionalität für verbesserte Aufbereitung von Scandaten sowie die Detektion von Verlust- und Fehlstellen basierend auf Laserscandaten (Terrestrisches Laserscanning, 2–3 mm Objektauflösung). Zudem sind Modellierungswerkzeuge für Oberflächenmodelle zu entwickeln, welche die Integration von typisierten Oberflächenstrukturen erlaubt. Dafür soll durch die Projektpartner über industrielle Nahbereichsscanner eine Musterdatenbank für digitale Steinoberflächen (Bearbeitungsspuren auf verschiedenen Steinoberflächen, 0,1 mm Objektauflösung) entstehen (Abb. 14).

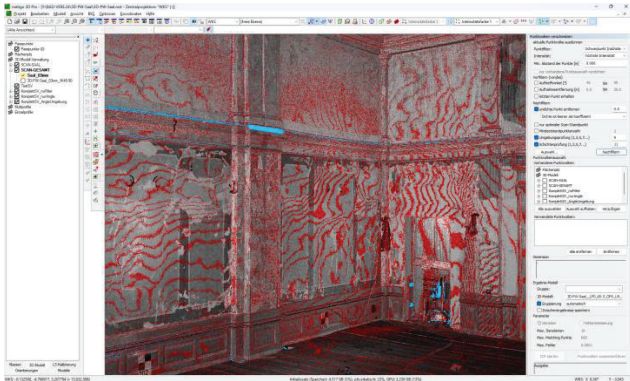


Abbildung 14 Aufbereitung/Filterung verschmolzene Punktwolke; Filterung verrauschter Schichten; Baden (CH), Verenahof: fokus GmbH Leipzig, 2024

In Abhängigkeit der Messeigenschaften des Laserscanners, der erzielten Registriergenauigkeit und der gewählten Punktauflösung können verrauschte Punktwolken den Prozess der automatisierten Modellierung von Oberflächen erschweren.

5 Zusammenfassung / Ausblick

Aus Sicht der Softwareentwicklung für metigo® MAP ist es stets eine zweigeteilte Aufgabenstellung. Einerseits betrifft diese die sinnvolle Verwendung von sich stetig weiter entwickelnden Dokumentationsverfahren und -ergebnissen in unserem Aufgabengebiet, welche als Kartierungsgrundlage in das Projekt integriert werden können. Andererseits erfolgt die praxisnahe Erweiterung von Auswerte- und Analysewerkzeugen anhand realer Aufgabenstellungen für die beteiligten Firmen bei Restaurierungsvorhaben. Hierbei gibt es auch nach über 30 Jahren Entwicklung digitaler Dokumentationsverfahren in der Denkmalpflege eine extreme Spannweite von Anwenderqualifizierung und Ansprüchen an die Projektergebnisse zu verzeichnen.

Danksagung

Die dem Beitrag zugrundeliegende Forschungsprojekte „Pano3D“ und „3DSaxStone“ werden kofinanziert aus Mitteln der Europäischen Union und mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



Kofinanziert von der Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

Die dem Beitrag zugrundeliegende Forschungsprojekte „Opdetriess“ und „freeForm4BIM“ wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Literaturverzeichnis

- Distelrath, A., Pinkale, T. (2023). Zum Erhalt von Drachenfels-Trachy, Befunderhebung, Zielsetzung und Konzeptentwicklung an ältesten Außenwänden des Kölner Domes, In *Naturstein 2023*, edited by Gabriele Patitz, Karin Schinken, 7-28 Karlsruhe
- Dordina, D., Milkau, C., ToSic, Z., Lordick, D. and Schneider, D. (2023). "Point Cloud to True-to Deformation Free-Form NURBS" In *Advances in Architectural Geometry 2023* edited by Kathrin Dörfler, Jan Knippers, Achim Menges, Stefana Parascho, Helmut Pottmann and Thomas Wortmann, 125-136. Berlin, Boston: De Gruyter, 2023. <https://doi.org/10.1515/9783111162683-010>
- Hemmler, M., Siedler, G., Sacher, G. (2000). Digitale Bildverzerrungen und -abwicklungen für die Anwendung in Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung (963 KB) Von Handaufmaß bis High Tech, Interdisziplinäres Kolloquium, TU Cottbus, 23.-26. Februar 2000 (S. 74-82).
- Hemmler M., Siedler G., Sacher G. (2001). Documentation of the basilica of maxentius in rome – methods for providing foundations for monument research, CIPA International Symposium, Potsdam.
- Henze, F., Siedler, G., Vetter, S. (2006). Integration automatisierter Verfahren der digitalen Bildverarbeitung in einem Stereoauswertesystem, 26. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Berlin, Band 15, S.239 – 246
- R. Godding, G. Sacher, G. Siedler (1992). Einsatz von digitalen Aufnahmesystemen zur Gewinnung von Multispektralaufnahmen für die Erkundung von Bauwerksschäden ISPRS Commission V, S.794-798, New York.
- Siedler, G., Vetter, S. (2013). Moderne Methoden der Dokumentation für die Restaurierung Digitale Kartierung und automatisierte 3D-Objektdokumentation mit der Software metigo®, *Natursteinsanierung Stuttgart 2013*, Stuttgart, S.77-87.

- Siedler, G., Vetter, S. (2018). Qualitätskriterien bei der Ausschreibung photogrammetrischer Leistungen, Natursteinsanierung Stuttgart 2018, Stuttgart, S.7-31.
- Siedler, G., Vetter, S. (2019). 3D- Documentation of mural paintings and 3D mapping. Monuments in Monuments, Conference proceedings, Stirling, 2019.
- Siedler, G., Vetter, S., Kaminsky J. (2020). Data Acquisition, Management and Evaluation for stone conservation projects with digital mapping, Siegesmund, S. & Middendorf, B. (ED.): Monument Future: Decay and Conservation of Stone – Proceedings of the 14th international congress on the deterioration and conservation of Stone, edited by S. Siegesmund, B. Middendorf (Eds.) – Volume I and Volume II. Mitteldeutscher Verlag 2020.
- Siedler, G., Vetter, S. (2020). Photogrammetrische Auswertung historischer Aufnahmen – vom 2D Bildplan zum texturierten 3D-Modell, Das Fragment im Digitalen Zeitalter, Tagungsband 2020, Hendrik Bäbeler Verlag, Berlin, 2020, S.163-179.
- Siedler, G., Vetter, S. (2022). Digitale Kartierung – Ein Entwicklungsprozess im Wandel von Dokumentations- und Auswertemethoden, Natursteinsanierung Karlsruhe 2022, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2022, S.7-19.
- Vetter, S. (2005). Generierung digitaler Oberflächenmodelle (DOM) im Bereich der Architekturphotogrammetrie, Diplomarbeit (unveröffentlicht), HTWK Leipzig.
- Wujanz, D., Schaller, S., Gielsdorf, F., and Gründig, L. (2018). Plane-based registration of several thousand laser scans on standard hardware, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2, 1207–1212, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1207-2018>.

Erhöhung der Präzision bei der Standortbestimmung mittels LiDAR Sensoren durch die Integration einer Grundkarte

Martin Hesse¹ & Andreas Nüchter²

Zusammenfassung

Lokalisierung bleibt ein entscheidender Aspekt beim Entwurf von Robotern, da sie die Grundlage für jegliche Art der autonomen Navigation bei Drohnen, Autos und anderen Spezialrobotern bildet. Diese wird in der Regel mithilfe eines SLAM-Algorithmus erreicht, der den Roboter innerhalb einer Karte lokalisiert, die gleichzeitig erstellt wird. Als Sensoren werden in der Regel entweder Kameras, die visuelle Daten liefern, oder LiDARs, die automatisch eine Punktwolke in Vermessungsqualität erzeugen, genutzt. In den letzten Jahren haben sich LiDAR Inertial Odometry (LIO) Algorithmen durchgesetzt, die Messungen eines LiDAR-Sensors mit Inertialmessungen einer IMU kombinieren. SLAM-Algorithmen verwenden keine zuvor aufgezeichnete Karte, sondern erstellen ihre eigene Karte während der Laufzeit. Dieser Beitrag strebt, durch die Integration einer prädefinierten globalen 3D-Punktwolkenkarte, eine Verbesserung der Genauigkeit bei der Lokalisierung an. Im Verlauf mehrerer Experimente in verschiedenen Testszenarien haben wir eine Reduzierung des Abstandsfehlers der Lokalisierung um 71 % erreicht, während sich der Orientierungsfehler nicht signifikant verändert hat. Dies macht das vorgestellte System zu einer geeigneten Lokalisierungsoption für den Robotereinsatz auf Baustellen.

Schlagwörter Laser Scanning · Lokalisierung · Simultaneous Localisation and Mapping · LiDAR Inertial Odometry

1 Einführung

Robotik wird in immer mehr Bereichen eingesetzt, und die Lokalisierung bleibt ein wichtiges Problem, das gelöst werden muss, um jegliche Art von autonomem Betrieb zu ermöglichen. Die Bauindustrie ist jedoch ein Bereich, in dem die Einführung robotergestützter Automatisierung nur langsam voranschreitet (Yarovoï & Cho, 2024). Hier ist die Lokalisierung ein besonders schwieriges Problem, da viele herkömmliche Lokalisierungsansätze versagen. In den meisten Szenarien werden Global Navigation Satellite Systems (GNSS) eingesetzt, doch es bestehen weiterhin Herausforderungen, wenn diese entweder nicht präzise genug oder nicht verfügbar sind, wie beispielsweise in vielen Innenräumen. Dies macht den Einsatz in der Bauindustrie unrealistisch, wo Robotersysteme in Innenräumen arbeiten müssen. Andere gängige Optionen, die z.B. in Lagerhallen Anwendung finden, sind Systeme, die eine feste Installation erfordern, wie beispielsweise Motion-Capture, die in der dynamischen Umgebung einer Baustelle aber ebenfalls nicht realisierbar sind. In diesen Situationen wird häufig ein SLAM-Algorithmus als Ersatz

verwendet, der ausschließlich auf Sensoren beruht, die am Roboter selbst angebracht sind. Diese ermöglichen ein Lokalisierungssystem, das unabhängig arbeitet und keine zusätzliche Einrichtung am Einsatzort erfordert. Typischerweise sind die in SLAM verwendeten Sensoren entweder Kameras, die RGB-Bilder oder im Falle von Stereokameras potenziell Tiefenbilder erzeugen, oder LiDAR-Sensoren, die direkt eine Punktwolke erzeugen, die räumliche Informationen kodiert. Die Veränderungen in aufeinanderfolgenden Bildern oder Scans dieser Sensoren werden erfasst, woraus die Bewegung des Roboters abgeleitet wird. Die einzelnen Bilder oder Scans werden dann auf der Grundlage der relativen Position des Roboters zusammengeführt, um zur Laufzeit eine Karte des durchfahrenen Bereichs zu erstellen. In letzter Zeit haben sich Visual Inertial Odometry (VIO) und LiDAR Inertial Odometry (LIO) Algorithmen zunehmend verbreitet. Diese zielen darauf ab, eine genauere und frequenzstärkere Positionsschätzung zu liefern, indem sie visuelle oder LiDAR-Daten mit niedrigerer Frequenz mit hochfrequenten Inertialmessungen einer IMU kombinieren. Ein entscheidender Vorteil all dieser Algorithmen ist, dass sie

¹ Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Informatik XVII – Robotik, Am Hubland 1, 97074 Würzburg, Deutschland, E-Mail: martin.hesse@uni.wuerzburg.de

² Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Informatik XVII – Robotik, Am Hubland 1, 97074 Würzburg, Deutschland, E-Mail: andreas.nuechter@uni.wuerzburg.de

ohne Vorkenntnisse über den durchfahrenen Bereich arbeiten; das Fehlen einer zuvor definierten globalen Referenz führt jedoch über längere Zeiträume zu zunehmenden Ungenauigkeiten, insbesondere für Teile der Trajektorie, die weiter vom Startpunkt entfernt sind. Während dies in vielen Situationen akzeptabel ist, da sie lokal immer noch kohärent sind, zielen wir darauf ab, reale Roboteroperationen auf Baustellen zu unterstützen, wo eine höhere globale Genauigkeit erforderlich ist.

In diesem Beitrag wird eine Erweiterung des FAST-LIO 2 Algorithmus (Xu et al., 2022) vorgestellt, bei der eine zuvor erstellte Punktwolkenkarte der Arbeitsumgebung des Roboters miteinbezogen wird. Diese dient dazu, die Posen-Schätzung kontinuierlich anzupassen, um sie mit der globalen Karte abzustimmen. Da Baustellen zunehmend dazu übergehen, BIM-Systeme in den Arbeitsablauf zu integrieren, sind Karten der Umgebung, die für unsere Erweiterung verwendet werden, oft bereits vorhanden. In Fällen, in denen dies nicht der Fall ist, werden 3D-Punktwolken mithilfe eines terrestrischen Laserscanners mit den üblichen Genauigkeiten schnell erstellt. Wir streben Lokalisierungsgenauigkeiten in einem ähnlichen Bereich an, sodass der Einsatz von Robotern auf Baustellen in der Praxis realisierbar wird.

2 Hintergrund

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurde viel Forschung im Bereich der SLAM-Algorithmen für Lokalisierungszwecke betrieben. Im Allgemeinen lag der Schwerpunkt eher auf LiDAR-basierten SLAM-Methoden, da diese im Vergleich zu visuellen SLAM-Methoden tendenziell bessere Ergebnisse erzielen, unter anderem aufgrund ihrer Fähigkeit, sofort Tiefeninformationen zu liefern. (Garigipati et al., 2022, Cadena et al., 2016, Yarovoi & Cho, 2024, Broggi et al., 2013). In den letzten Jahren verwenden die meisten SLAM-Algorithmen, sowohl visuelle als auch LiDAR-basierte, einen mehrstufigen SLAM-Kern, der zunächst eine Art Odometrie-Daten erstellt, basierend auf Scan-to-Scan Matching mit dem vorherigen Scan, bevor eine Karte zusammengestellt wird, meist mit einer geringeren Frequenz. Die Algorithmen LOAM (Zhang et al., 2014) und V-LOAM (Zhang & Singh, 2015) gehörten zu den ersten, die dies taten, jeweils für LiDAR- und visuelle Daten. Seitdem wurden viele Adaptionen von LOAM und anderen ähnlichen Algorithmen vorgeschlagen, meist mit Blick auf einen bestimmten Anwendungsfall oder unter Nutzung einer bestimmten Art von Daten. Dazu gehören u.a. Loam Livox

(Lin & Zhang, 2020), das auf Solid-State-LiDAR-Sensoren spezialisiert ist, die aufgrund ihrer geringeren Kosten an Beliebtheit gewonnen haben, sowie LeGO-LOAM (Shan & Englot, 2018) und ART SLAM (Frosi & Matteucci, 2022), die beide ein Bodensegmentierungsmodul zur SLAM-Pipeline hinzufügen.

Zwar benötigen diese Systeme keine zusätzlichen Eingaben außer denen von der Kamera oder dem LiDAR-Sensor, jedoch wird dies von einigen von ihnen unterstützt, u.a. mit GNSS, einer IMU oder anderweitig gewonnene Odometriedaten als zusätzliche Datenquelle. In jüngster Zeit wurden jedoch viele Systeme eingeführt, die Inertialmessungen einer IMU mit höherer Frequenz als zusätzliche Eingabe erfordern, um die Bewegung zu glätten und besser vorherzusagen. Dazu gehören unter anderem LIO-SAM (Shan et al., 2020), Wildcat (Ramezani et al., 2022), DLIO (Chen et al., 2023) und FAST-LIO 2 (Xu et al., 2022).

Ein häufiges Problem, das wir bei vielen SLAM-Algorithmen beobachten, ist der Drift. Da sie keine global stabile Referenz verwenden, neigt die Positionsschätzung dazu, von einer korrekten Darstellung des Raums abzuweichen. Dies ist weniger wichtig, wenn man nur lokal kohärente Daten benötigt, wird jedoch zu einem größeren Problem, wenn das System global stabile Abläufe unterstützen muss. Es gibt einige Forschungsarbeiten, die versuchen, dem entgegenzuwirken, indem entweder der Drift durch Nachbearbeitung korrigiert wird (Keitaanniemi et al., 2023) oder zusätzliche Informationen wie optische Marker in die Szene eingebracht werden (Schischmanow et al., 2022). Eine weitere Option ist die Einbindung einer vordefinierten Karte in den SLAM-Prozess. Eine beliebte Datenquelle hierfür ist Open-Street-Map, wie in Floros et al. (2013) oder Frosi et al (2023), die das Straßennetz bzw. die 2D-Umriss von Gebäuden als zusätzliche Informationen nutzen. Parsley & Julier (2010) erörtern wie Daten, die schon zu Beginn existieren und von einem anderen Typ sind als die Sensordaten des Roboters, wie beispielsweise Satellitenbilder, in den Algorithmus integriert werden. Während sich die meisten dieser Ansätze auf den Außenbereich konzentrieren, verwendet Wang et al. (2019) schematische Etagenpläne von Gebäuden, aus denen Merkmale extrahiert werden, die sowohl im Plan als auch in den LiDAR-Daten konsistent sind. In unserer Arbeit verwenden wir eine 3D-Punktwolkenkarte als zuvor generierte Grundlage, um die Genauigkeit des Lokalisierungssystems zu erhöhen.

3 Methode

In dieser Arbeit stellen wir ein System vor, das eine vordefinierte globale Karte in Verbindung mit dem FAST-LIO 2 Algorithmus (Xu et al., 2022) nutzt, um die Gesamtgenauigkeit des Lokalisierungssystems eines mobilen Roboters zu verbessern. Bei diesem System werden sowohl LiDAR- als auch Inertialdaten im FAST-LIO 2 Algorithmus verwendet, während die globale Karte in Form einer Punktwolke bereitgestellt wird. Die Pose des Roboters wird durch die Pose des montierten LiDAR-Sensors definiert, und die beiden Begriffe werden im gesamten Text synonym verwendet. Das System wurde in ROS 2 (Macenski et al., 2022) implementiert, und die in Abb. 1 dargestellten TF-Frames repräsentieren die verschiedenen Posen-Schätzungen. Es gibt drei verschiedene Zweige, die alle eine Schätzung der Pose des Roboters darstellen: erstens eine Ground-Truth, die nicht tatsächlich vom Roboter berechnet wird, sondern separat und nur zur Verifizierung dient; zweitens die Schätzung des FAST-LIO 2 Algorithmus, dessen Posen-Schätzung als „without correction“ bezeichnet wird; und drittens unsere Schätzung, die eine globale Karte miteinbezieht und als „with correction“ bezeichnet wird. Beide werden zur Laufzeit des Roboters auf dem Onboard-PC berechnet. Die vom System verwendete globale Karte ist im `map` Frame angegeben, von wo aus sich die drei Zweige trennen. Der FAST-LIO 2 Algorithmus liefert die Transformation zwischen dem festen `camera_init` Frame und dem `body` Frame, was die beste Schätzung der Position des Roboters darstellt, die rein auf FAST-LIO 2 basiert. Um dies sowohl mit der Ground Truth als auch mit unserer Ergänzung zu vergleichen, wird dies auf Basis der Ausgangsposition des Roboters mit dem `map` Frame verbunden, da hier der `camera_init` Frame fixiert ist und die Ground Truth eine Transformation von dieser Pose in den globalen `map` Frame bereitstellt. Da diese Transformation von der Ground Truth abhängt, ist sie während der Laufzeit des Roboters nicht verfügbar, was bedeutet, dass sie nicht direkt mit der korrigierten Pose verglichen werden kann, da ihnen ein gemeinsamer globaler Referenzframe fehlt. Unsere Ergänzung zum System führt kontinuierlich einen Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus aus, in unserer aktuellen Implementierung den von `open3d` (Zhou et al., 2018), der die neuste Punktwolke, die vom LiDAR-Sensor empfangen wird, mit der globalen Karte abgleicht. Als Anfangstransformation für den ICP-Algorithmus wird die aktuelle Pose des Roboters verwendet. Dies bestimmt die Transformation von dem `map` zum `body_prev` Frame, der somit stets die Pose des zuletzt abgeglichenen LiDAR-Scans enthält. Da der ICP-

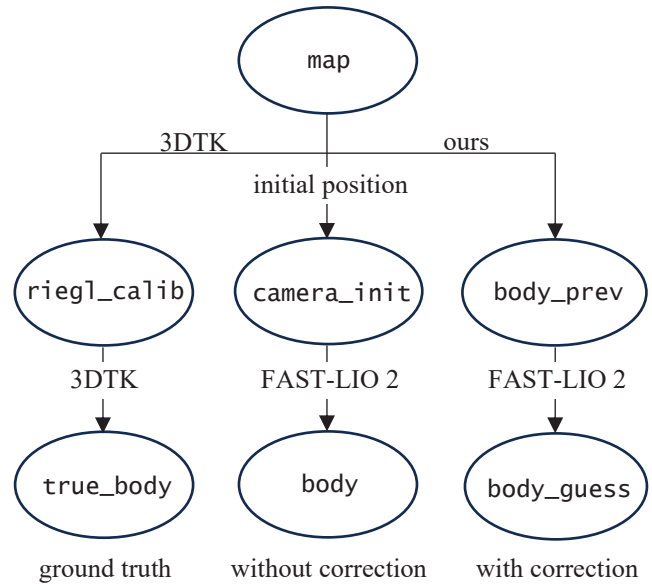


Abbildung 1 Ein Überblick über die in ROS verwendeten TF-Frames. Ein Vermerk an einem Pfeil gibt an, welcher Teil des Programms die entsprechende Transformation berechnet.

Algorithmus etwas Zeit benötigt, um die Transformation zu berechnen, ist die resultierende Pose zum aktuellen Zeitpunkt *cur* nicht mehr genau, da sie die Pose zum Zeitpunkt *k* darstellt, an dem die entsprechende Punktwolke vom LiDAR-Sensor erfasst wurde. Um diesen Zeitversatz und die Zeit, in der die Berechnung stattfindet, zu überwinden – während der wir ebenfalls eine genaue Posen-Schätzung liefern wollen –, interpolieren wir vom letzten abgeglichenen LiDAR-Scan am Zeitpunkt *k* bis *cur* mit Daten von FAST-LIO 2. Dazu speichern wir vorübergehend die Transformation ${}_{body_k}^{camera_init}T$, das Ergebnis von FAST-LIO 2 zum Zeitpunkt *k*, ab und verwenden sie im Folgenden,

$${}_{body_guess}^{body_prev}T = {}_{body_cur}^{body_k}T = {}_{body_k}^{camera_init}T^{-1} {}_{body_cur}^{camera_init}T \quad (1)$$

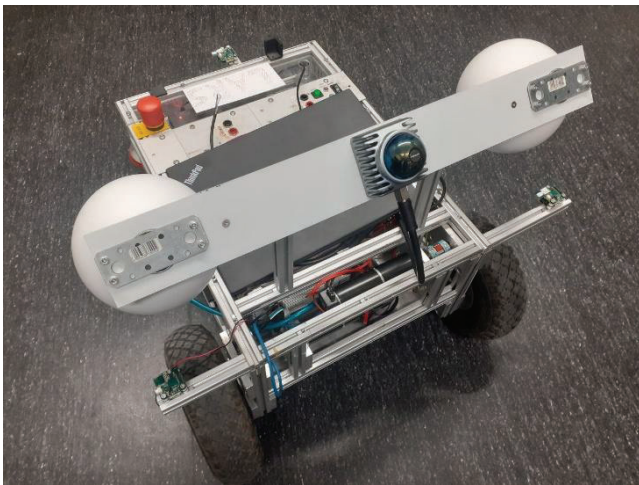
um die Transformation vom `body_guess` zum `body_prev` Frame zu berechnen. Der `body_guess` Frame enthält nun die Pose des Roboters basierend auf dem ICP-Ergebnis, interpoliert zu dem aktuellen Zeitpunkt unter Verwendung von FAST-LIO 2.

4 Experimente

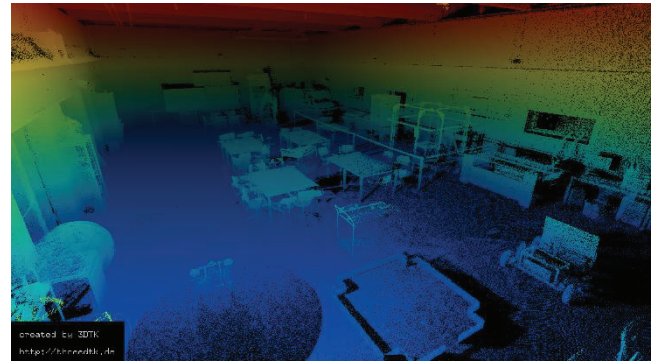
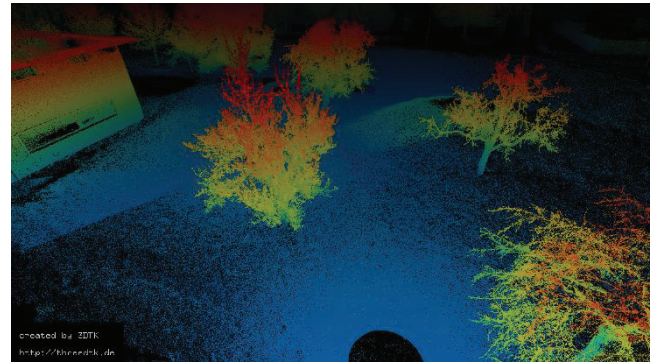
Um die Genauigkeit des Systems zu überprüfen, führen wir mehrere Experimente in verschiedenen Szenarien durch, die in Tab. 1 zusammengefasst sind. Die Testläufe finden entweder in einer Innen- oder Außenumgebung statt, von

Tabelle 1 Übersicht der Konfigurationen der verschiedenen Testläufe

Test-lauf #	Pfad-länge [m]	Anzahl GT-Scans n	Ort	LiDAR Orientierung
1	21,09	3	drinnen	eben
2	22,93	3	drinnen	schräg
3	49,85	5	drinnen	schräg
4	36,97	4	drinnen	schräg
5	85,89	5	draußen	schräg
6	82,20	5	draußen	schräg
7	68,80	5	drinnen	eben

**Abbildung 2** Der Roboter, der bei den Experimenten verwendet wurde, mit dem LiDAR-Sensor und den zwei Kalibrierungskugeln montiert

denen Abb. 3 eine Punktwolke zeigt. Beide bestehen aus einer Kombination mehrerer hochauflösender Laserscans. Eine der beiden der resultierenden Punktwolken wird je nach Ort des Testlaufs als globale Karte für den Korrekturschritt verwendet. Als LiDAR-Sensor verwenden wir einen Livox Mid-360, den wir an einem mobilen volksbot-Roboter (Nüchter et al., 2013) befestigen, wie in Abb. 2 dargestellt. In den meisten Testläufen ist der LiDAR-Sensor schräg montiert (vgl. Abb. 2), was darauf abzielt die Leistung zu verbessern, wie Yarovoi & Cho (2024) vorgeschlagen, während er in einigen Fällen waagrecht montiert ist, wobei die Kuppel des Sensors nach oben zeigt. Die Inertialmessungen werden von der in den Mid-360 integrierten IMU erfasst. Jeder Testlauf besteht aus einer freien Strecke unterschiedlicher Länge, die mit dem Roboter zurückgelegt wird. Der Endpunkt jeder zurückgelegten Strecke liegt zwar nicht exakt, aber an einer ähnlichen Position wie der Startpunkt.

**(a)** Drinnen**(b)** Draußen**Abbildung 3** Ein hochauflösender Laserscan der Testumgebung

Um die Genauigkeit des Systems zu bestimmen, verwenden wir pro Testlauf bis zu fünf hochauflösende Laserscans eines terrestrischen Riegl VZ-400-Laserscanners, die zu Beginn und am Ende jedes Testlaufs sowie an einigen Punkten dazwischen aufgenommen werden, wobei der Roboter an allen diesen Punkten ebenfalls stationär ist. Die Positionen des Roboters bei jedem der Scans (GT-Scan Position 1 bis n) dienen als Referenzdaten für das System. Diese Scans werden dann nach jedem Testlauf manuell ausgewertet und verglichen. Um dies zu ermöglichen, ist der Roboter mit zwei Kalibrierungskugeln mit bekanntem Durchmesser ausgestattet, deren Position relativ zum LiDAR-Sensor ebenfalls bekannt ist. Durch Markieren der Punkte auf den Kalibrierungskugeln und der Ebene, auf der der LiDAR-Sensor montiert ist, in jedem der hochauflösenden Laserscans unter Verwendung von 3DTK (Nüchter & Lingemann, 2011), wie in Abb. 4 dargestellt, bestimmen wir die exakte Pose des Roboters relativ zur Pose des Riegl-Laserscanners an jedem der GT-Scan Positionen, welches die Transformation vom `true_body` zum `riegl_calib` Frame darstellt. Mithilfe eines ICP-Algorithmus aus 3DTK verschieben und orientieren wir die Kalibrierungsscans so, dass sie zu der globalen Karte passen, und bestimmen so die

Tabelle 2 Der Fehler von dem FAST-LIO 2 Algorithmus verglichen mit unserer Erweiterung an verschiedenen GT-Scan Positionen für die einzelnen Testläufe. Der Fehler von FAST-LIO 2 an der GT-Scan Position 1 ist 0,00 cm bzw. ° per Definition, aufgrund unserer Evaluation. Ein Strich (-) gibt an, dass der entsprechende Testlauf keine vier bzw. fünf GT-Scans hat.

Test- lauf #	Abstandsfehler bei GT-Scan Position # [cm]									
	1		2		3		4		5	
	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours
1	0,00	0,53	15,05	0,41	3,89	1,15	-	-	-	-
2	0,00	0,95	11,97	0,49	2,28	0,59	-	-	-	-
3	0,00	0,69	11,63	1,50	7,80	0,72	10,57	1,86	4,09	1,42
4	0,00	0,92	8,54	0,85	10,03	4,75	5,05	0,81	-	-
5	0,00	5,15	18,47	2,21	8,95	1,96	23,56	2,55	4,66	23,48
6	0,00	4,87	13,74	2,89	18,21	3,09	25,42	4,88	4,68	4,98
7	0,00	1,41	19,13	8,15	11,93	3,02	11,19	8,56	3,33	1,76

Test- lauf #	Orientierungsfehler bei GT-Scan Position # [°]									
	1		2		3		4		5	
	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours	FL2	ours
1	0,00	1,07	2,29	1,40	0,91	2,11	-	-	-	-
2	0,00	0,21	0,51	0,41	0,29	0,26	-	-	-	-
3	0,00	0,25	0,38	0,75	0,28	0,24	0,67	0,97	0,38	0,40
4	0,00	0,33	1,11	0,45	0,68	0,47	0,56	0,52	-	-
5	0,00	0,70	0,54	0,38	0,95	0,52	1,03	0,37	0,44	3,50
6	0,00	0,47	0,83	0,40	0,60	0,37	0,87	0,47	0,37	0,48
7	0,00	1,54	4,13	4,07	1,76	5,82	2,35	4,25	1,64	0,80

Transformation vom `riegl_calib` zum `map` Frame. Die Pose des Roboters beim ersten dieser GT-Scans wird, wie in Abschnitt 3 erwähnt, auch zur Definition der Anfangspose des Roboters und damit des `camera_init` Frames verwendet. Wir vergleichen nun sowohl das Ergebnis des reinen FAST-LIO 2 Algorithmus als auch unsere Ergänzung zu dieser Ground Truth, um ihre jeweilige Genauigkeit an jeder GT-Scan Position zu bestimmen. Da wir die Ausgangsposition und damit auch den `camera_init` Frame anhand des ersten Kalibrierungsscans definieren, beträgt der Positions- und Orientierungsfehler des FAST-LIO 2 Algorithmus an der ersten GT-Scan Position per Definition 0,0 cm bzw. °; diese Datenpunkte werden bei allen weiteren Analysen nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse unserer Experimente sind in Tab. 2 aufgeführt, in der wir sowohl den Abstands- als auch den Orientierungsfehler von FAST-LIO 2 und unserer

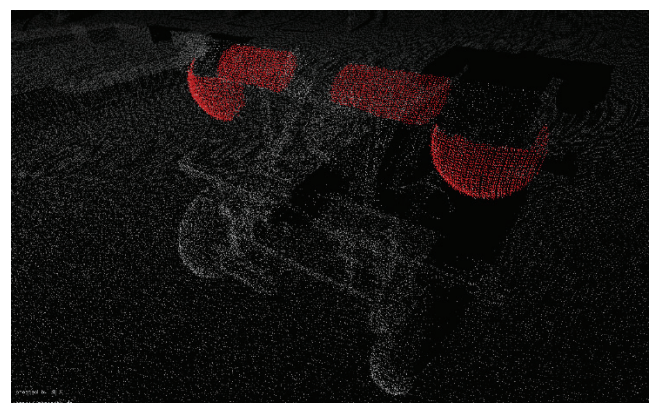
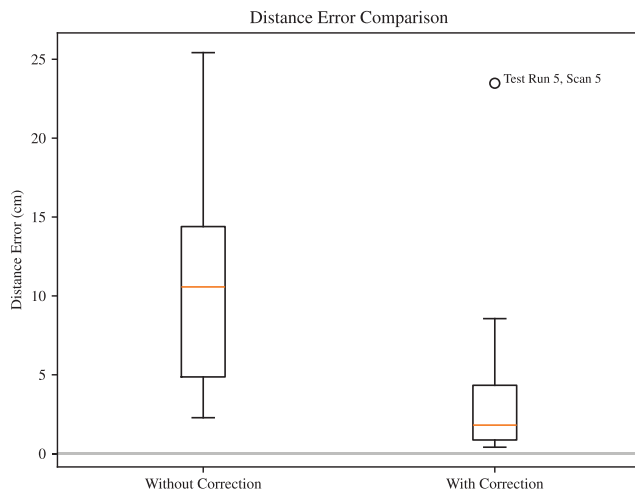
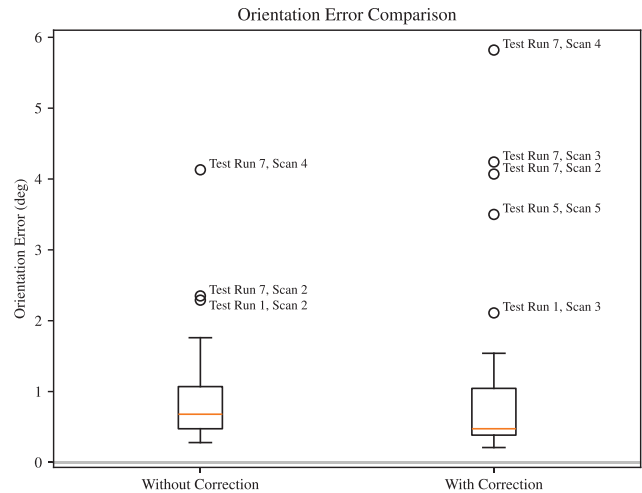


Abbildung 4 Ein Kalibrierungsscan von dem Roboter mit den Kalibrierungskugeln und der Platte, auf der der LiDAR-Sensor montiert ist, markiert.

Ergänzung an jeder GT-Scan Position tabellarisch darstellen. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse grafisch.



(a) Abstandsfehler



(b) Orientierungsfehler

Abbildung 5 Der Fehler von dem FAST-LIO 2 Algorithmus (without correction) im Vergleich mit unserer Erweiterung des Systems (with correction).

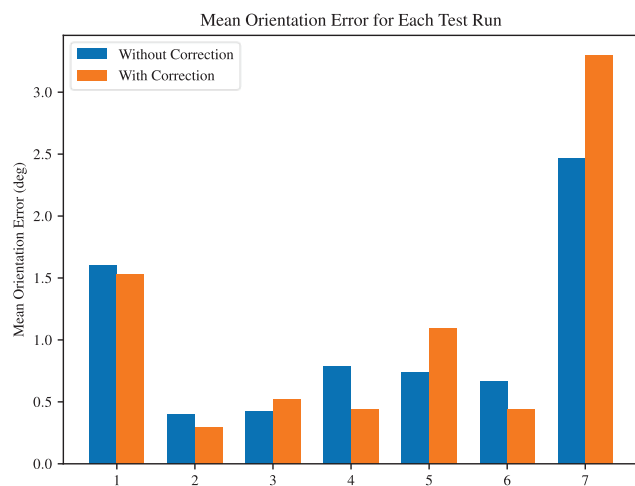


Abbildung 6 Durchschnittlicher Orientierungsfehler für die einzelnen Testläufe.

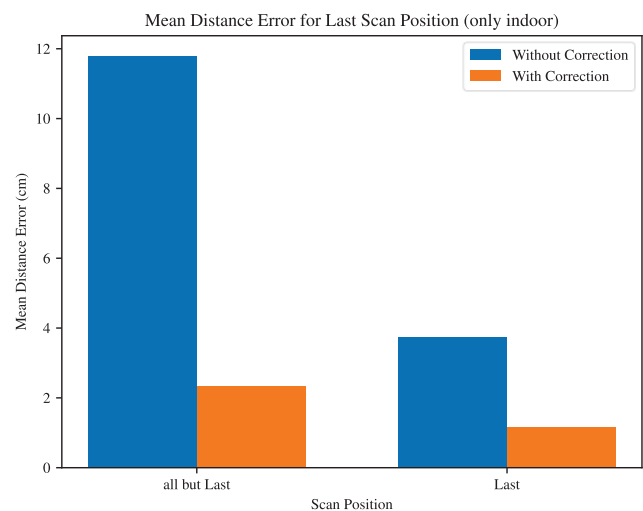


Abbildung 7 Durchschnittlicher Abstandsfehler an der letzten GT-Scan Position in Vergleich mit allen anderen gemittelt.

5 Diskussion

Insgesamt stellen wir eine deutliche Verbesserung fest, wenn wir unsere Ergänzung nutzen, um die FAST-LIO 2 Schätzung kontinuierlich zu adaptieren, indem wir sie mit einer globalen, vordefinierten Karte abgleichen. Hinsichtlich der Orientierung stellen wir keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Systemen fest, wobei sich der mittlere Fehler über alle Testläufe hinweg bei Hinzufügen der globalen Karte kaum von $1,02^\circ$ auf $1,13^\circ$ verschlechtert. Dieser Rückgang der Genauigkeit ist hauptsächlich auf die Testläufe 1 und 7 sowie einen besonders schlechten Datenpunkt bei GT-Scan 5 im Testlauf 5 zurückzuführen, der auch den schlechtesten Wert bei der Auswertung des Abstandsfehlers aufweist. Warum die

Ableichung mit der globalen Karte bei den Testläufen 1 und 7 deutlich schlechter ausfiel, wird im Folgenden erläutert; warum sie an dem übrigen Punkt deutlich schlechter ist, ist unklar, zumal es sich insbesondere im Hinblick auf den Abstandsfehler um einen singulären Ausreißer zu handeln scheint. Wir erklären das insgesamt ähnliche Leistungsniveau beim Orientierungsfehler hauptsächlich durch drei Faktoren: Erstens ist der Gesamtfehler ohnehin recht gering, sodass nur eine marginale Verbesserung erzielt werden konnte; zweitens rollte oder nickte der Roboter entlang der gefahrenen Trajektorie kaum; drittens gehen wir davon aus, dass die Orientierung wesentlich stabiler ist als Translationsänderungen, da bei den Testläufen drinnen mit dem Boden

und der Decke immer eine große, relativ flache Ebene im Sichtfeld des LiDAR-Scanners vorhanden ist, die leicht zu verfolgen ist. Bei der Analyse des Orientierungsfehlers für jeden einzelnen Durchlauf, wie in Abb. 6 dargestellt, fällt auf, dass die Genauigkeit in den Testdurchläufen 1 und 7 im Vergleich zu den anderen einen größeren Unterschied aufweist. In diesen Testläufen ist der LiDAR-Sensor eben auf dem Roboter und nicht in einem Winkel montiert (vgl. Tab. 1), was aufgrund des begrenzten vertikalen Sichtfelds des Sensors von 59° dazu führt, dass viel kleinere und weiter entfernte Teile der Decke und des Bodens erfasst werden. Dies untermauert die Annahme, dass der Boden ein wichtiger Faktor für stabile Orientierungsschätzungen ist.

Beim Abstandsfehler ist eine deutliche Verbesserung von einem mittleren Fehler von 11,05 cm bei ausschließlicher Verwendung des FAST-LIO 2 Algorithmus auf 3,22 cm mit der Korrektur zu verzeichnen. Beim Vergleich des Fehlers an der letzten GT-Scan Position mit dem an allen anderen (Abb. 7), stellen wir fest, dass insbesondere der FAST-LIO 2 Algorithmus an der letzten Position deutlich besser abschneidet. Wie in Abschnitt 3 erwähnt, wird der letzte GT-Scan immer mit dem Roboter an einer Position durchgeführt, die der Ausgangsposition ähnelt. Dies zeigt, dass das System ohne die Korrektur dazu neigt, umso stärker abzudriften, je weiter der Roboter von der Ausgangsposition entfernt ist, was die Notwendigkeit einer global stabilen Korrektur unterstreicht.

6 Fazit & Ausblick

Insgesamt stellt diese Arbeit eine Erweiterung des bestehenden FAST-LIO 2 LiDAR-Lokalisierungsalgorithmus dar, die das Ergebnis durch die Verwendung einer vordefinierten globalen Karte, in der die Laserscans kontinuierlich verortet werden, deutlich verbessert. Dies zeigt sich insbesondere beim Abstandsfehler, dessen Mittelwert von 11,05 cm bei ausschließlicher Verwendung des FAST-LIO 2 Algorithmus auf 3,22 cm sinkt. Somit ergänzen wir den FAST-LIO 2 Algorithmus um eine global stabile Lokalisierung. Die erzielte Genauigkeit für die Innenraum-Lokalisierung ist akzeptabel, um den Einsatz dieses Systems auf Baustellen zu ermöglichen. Zukünftig muss ein besseres Verständnis der Genauigkeit des Systems in verschiedenen realen Szenarien mit unterschiedlichen Komplikationen erreicht werden. Zu diesen Komplikationen können eingeschränkte Sichtwinkel, Staub oder andere sich bewegende Objekte gehören, die die Lokalisierung erschweren, aber in einer realen Baustellenumgebung

unvermeidbar sind. Außerdem muss die Langzeitstabilität des Systems besser verstanden werden, um fortgeschrittene autonome Operationen zu unterstützen. Schließlich gibt es in den Experimenten einzelne Datenpunkte, an denen das System deutlich schlechter abschneidet, was noch nicht vollständig geklärt ist.

Literaturverzeichnis

- Broggi, A., Grisleri, P., & Zani, P., (2013). Sensors technologies for intelligent vehicles perception systems: A comparison between vision and 3d-lidar. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), 887–892. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728344>
- Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., Reid, I., & Leonard, J. J., (2016). Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309–1332. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2624754>
- Chen, K., Nemiroff, R., & Lopez, B. T., (2023). Direct lidar-inertial odometry: Lightweight lio with continuous-time motion correction. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3983–3989. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160508>
- Floros, G., van der Zander, B., & Leibe, B., (2013). Openstreetslam: Global vehicle localization using openstreetmaps. 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1054–1059. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630703>
- Frosi, M., Gobbi, V., & Matteucci, M., (2023). OSM-SLAM: Aid ing SLAM with OpenStreetMaps priors. *Frontiers in Robotics and AI*, Volume 10- 2023. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1064934>
- Frosi, M., & Matteucci, M., (2022). ART-SLAM: Accurate Real Time 6DoF LiDAR SLAM. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 2692–2699. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3144795>
- Garigipati, B., Strokina, N., & Ghabcheloo, R., (2022). Evaluation and comparison of eight popular lidar and visual slam algorithms. 2022 25th International Conference on Information Fusion (FUSION), IEEE, 1–8. <https://doi.org/10.23919/FUSION49751.2022.9841323>
- Keitaanniemi, A., Rönholm, P., Kukko, A., & Vaaja, M. T., (2023). Drift analysis and sectional post-processing of indoor simultaneous localization and mapping (SLAM)-based laser scanning data. *Automation in Construction*, 147, 104700. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104700>

- Lin, J., & Zhang, F., (2020). Loam livox: A fast, robust, high precision lidar odometry and mapping package for lidars of small fov. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3126–3131.
<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197440>
- Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C., & Woodall, W., (2022). Robot Operating System 2: Design, architecture, and uses in the wild. *Science Robotics*, 7(66), eabm6074.
<https://doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074>
- Nüchter, A., Elseberg, J., & Borrmann, D., (2013). Irma3D– An Intelligent Robot for Mapping Applications. *Proceedings of the 3rd IFAC Symposium on Telematics Applications (TA '13)*, 119–124.
<https://doi.org/10.3182/20131111-3-KR-2043-00011>
- Nüchter, A., & Lingemann, K., (2011). 3DTK– The 3D Toolkit. <https://github.com/JMUWRobotics/3DTK>. Accessed: 12.11.2025.
- Parsley, M. P., & Julier, S. J., (2010). Towards the exploitation of prior information in SLAM. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2991–2996.
<https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5650662>
- Ramezani, M., Khosoussi, K., Catt, G., Moghadam, P., & Williams, J., Borges, P., Pauling, F., Kottege, N., (2022). Wildcat: Online continuous-time 3d lidar-inertial slam.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.12595>
- Schischmanow, A., Dahlke, D., Baumbach, D., Ernst, I., & Linkiewicz, M., (2022). Seamless Navigation, 3D Reconstruction, Thermographic and Semantic Mapping for Building Inspection. *Sensors*, 22(13).
<https://doi.org/10.3390/s22134745>
- Shan, T., & Englot, B., (2018). Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 4758–4765.
<https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594299>
- Shan, T., Englot, B., Meyers, D., Wang, W., Ratti, C., & Daniela, R., (2020). Lio-sam: Tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 5135–5142.
<https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341176>
- Wang, X., Marcotte, R. J., & Olson, E., (2019). Glfp: Global localization from a floor plan. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 1627–1632.
<https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8968061>
- Xu, W., Cai, Y., He, D., Lin, J., & Zhang, F., (2022). FAST-LIO2: Fast Direct LiDAR-Inertial Odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(4), 2053–2073.
<https://doi.org/10.1109/TRO.2022.3141876>
- Yarovoi, A., & Cho, Y. K., (2024). Review of simultaneous localization and mapping (SLAM) for construction robotics applications. *Automation in Construction*, 162, 105344.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105344>
- Zhang, J., & Singh, S., (2014). Loam: Lidar odometry and mapping in real-time. *Robotics: Science and systems Conference (RSS)*, 109–111
<https://doi.org/10.15607/RSS.2014.X.007>
- Zhang, J., & Singh, S., (2015). Visual-lidar odometry and mapping: low-drift, robust, and fast. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2174–2181.
<https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139486>
- Zhou, Q.-Y., Park, & J., Koltun, V., (2018). Open3D: A Modern Library for 3D Data Processing.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.09847>

AUTORENVERZEICHNIS

B	
BANK, JOACHIM	204
BIBOW, DENNIS	64
BINAPFL, STEFAN	50
BLASKOW, ROBERT	50
BONG, ALEXANDER	198
BRÄUER-BURCHARDT, CHRISTIAN	15, 169
BROSER, JOST-MICHAEL	37
C	
CARSTENSEN, DIRK	183
CLAUß, HARTMUT	122
CLEMEN, CHRISTIAN	198
COLSON, AMANDINE	32
D	
DISTEL, ANNE-KAROLINE	142
E	
ECKERT, KERSTIN	114
F	
FREITAG, CHRISTOPH	169
G	
GEBHART, INGO	15
GIELSDORF, FRANK	136
GÖRING, MARTINA	8, 64
GRANER, MARTIN	46
GRUNER, FELIX	136
GUEGUEN, LAURE-ANNE	130
H	
HASCHKE, THEO	190
HEINZE, MATTHIAS	15, 169
HEITKAM, SASCHA	114
HESSE, MARTIN	220
HINDORF, PAUL	80
HOFFMANN, DENNIS	32
J	
JUNGE, LUCA	32

K

KAMINSKY, JENS	211
KASTEN, MEGAN NICHOLE	142
KERSTEN, THOMAS P.	21, 94
KÖGEL, MICHAEL	183
KUHLMANN, JAN	73
KÜHMSTEDT, PETER	15, 169

L

LAPPAN, TOBIAS	114
LIEBOLD, FRANK	158

M

MAAS, HANS-GERD	105, 130, 158
MAIWALD, FERDINAND	50
MANDLBURGER, GOTTFRIED	130
MARQUARDT, TINE	114
MARSMANN, MALTE	21
MECHELKE, KLAUS	94
MILKAU, CYRILL	105
MULSOW, CHRISTIAN	130
MUNKELT, CHRISTOPH	15, 169

N

NOTNI, GUNTHER	15, 169
NÜCHTER, ANDREAS	220

P

PÖPPL, FLORIAN	58
PREUßEL, SEBASTIAN	105
PRZYBILLA, HEINZ-JÜRGEN	21

R

RAMM, ROLAND	169
REUTER, THOMAS	87
ROMANSCHKEK, ENRICO	198

S

SACKMANN, JONAS	64
SARDEMANN, HANNES	130
SCHMIDT, ANTJE	32
SCHNEIDER, DANILO	105, 175
SCHRÖDER, LEONIE	94
SCHÜTZ, EMANUEL	1
SCHWALBE, ELLEN	175
SIEDLER, GUNNAR	211
SÖRENSEN, LARS	190
STUDNICKA, NIKOLAUS	58

T	
THEIS, FREDERIC	32
THIERY, FLORIAN	142, 150
THIERY, PETER ALOIS	142
U	
ULLRICH, ROBIN	1
V	
VEHLKEN, SEBASTIAN	32
VETTER, SEBASTIAN	211
W	
WEGENER, VOLKER	194
WEIMER, TOBIAS	64
WIEMANN, THOMAS	73
WUJANZ, DANIEL	136
Z	
ZSCHIESCHANG, MARC	204