

Genauigkeitsbetrachtung voxelbasierter Änderungsdetektion im Gebäudeinnenbereich zur automatisierten Baufortschrittsüberwachung

THERESA MEYER^{1,2}, ANSGAR BRUNN² & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag handelt von einer Methode zur Änderungsdetektion im Gebäudeinneren, die auf der Diskretisierung des Objektraums durch Voxel basiert. Die Belegung des Voxelaums wird anhand von Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning zu verschiedenen Bauphasen ermittelt. Durch die Aufdeckung von Belegungskonflikten zwischen zwei Messepochen wird ermittelt, ob Änderungen an einer bestimmten Stelle aufgetreten sind. Es wird gezeigt, wie sich der Diskretisierungsfehler als Resultat der Voxelisierung auf die noch erreichbare räumliche Auflösung einer Änderungsaussage auswirkt. Am Beispiel von Abbrucharbeiten bei einem Innenumbauprojekt werden die wechselseitigen Auswirkungen von Aufnahmegeometrie, Scanauflösung und Voxelgröße diskutiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auflösung von 3D-Punktwolken unter Beachtung einiger Anforderungen an die Aufnahmegeometrie bei Innenraum-Messungen ausreicht, um bei gängigen Genauigkeitsanforderungen auf Voxel Ebene automatisiert strukturelle Änderungen zu beschreiben.

1 Einleitung

In der Baubranche besteht schon lange ein großer Bedarf nach Methoden zur effizienten Fortschrittsüberwachung von Bau- und Umbauprojekten. Um von Seiten des Baumanagements auf eventuelle Ausführungsfehler frühzeitig reagieren zu können, muss ein regelmäßiger Abgleich von SOLL und IST-Zustand auf der Baustelle erfolgen. Deshalb ist die sog. „as-built“ Dokumentation von Bauprojekten ein anspruchsvolles und rasant wachsendes Aufgabenfeld für Geodäten. Änderungsdetektion im Kontext von Baufortschrittsdokumentation ist derzeit von großem Interesse für die gesamte AEC (Architecture, Engineering und Construction) -Branche und BIM (Building Information Modeling). Nicht nur viele positive Erfahrungen in der Baupraxis weisen auf eine starke Korrelation zwischen kontinuierlicher Bauüberwachung und der Einhaltung des Projektzeitplans hin, sondern auch eigens angelegte Untersuchungen und Fallstudien, wie sie beispielsweise in ALIZADEHSALEHI & YITMEN (2019) vorgestellt werden, bestätigen diese positiven Effekte auch aus wissenschaftlicher Sicht. Dennoch stehen bei vielen Bauprojekten nach wie vor kaum Ressourcen für aufwendige metrische Qualitätskontrollen während der Bauphase zur Verfügung, um die Übereinstimmung von Ausführung und Planung zu bestätigen.

Dieser Beitrag handelt von einer Methode zur Änderungsdetektion, die auf 3D-Punktwolken und der Diskretisierung des Objektraums durch Voxel basiert und hier speziell auf die Anwendung im Gebäudeinnenbereich abgestimmt ist. voxelbasierte Änderungsdetektion ist in der Literatur schon

¹ Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, E-Mail: [stilla, theresa.meyer@tum.de]

² Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Studienbereich Geo, Labor für Photogrammetrie & Fernerkundung, Röntgenring 8, D-97070 Würzburg, E-Mail: [ansgar.brunn, theresa.meyer]@fhws.de

vielfach thematisiert. HEBEL et al. (2013), detektieren Veränderungen in Airborne Laserscanning Punktwolken. Sie verwenden dabei einen relativ groben Voxelraum für den Vergleich von Punktwolken aus verschiedenen Epochen und verfeinern das Ergebnis der Änderungsdetektion, indem sie einzelne Punkte in vorselektierten Bereichen unter Anwendung der Evidenztheorie eingehender bewerten. Analog analysieren GEHRUNG et al. (2020) Mobile Laserscanning Punktwolken. Andere Autoren wie HUANG et al. (2021) und TUTTAS et al. (2017) demonstrieren voxelbasierte Änderung im Kontext von Baufortschrittsdokumentation mit photogrammetrischen Punktwolken und MEYER et al. (2021) bewerten in diesem Zusammenhang die Genauigkeit von BIM-konformen Gebäudemodellen für die Orientierung von Bildsensoren.

2 Problemstellung

Bislang erfolgt Baufortschrittsdokumentation meist durch Sichtkontrollen und einfache Kontrollmessungen, die von Mitarbeitern durchgeführt werden oder durch sehr zeit- und kostenintensive professionelle Vermessungen mit Totalstationen und Nivelliergeräten. Seit einigen Jahren schon ist das terrestrische 3D Laserscanning (TLS) eine beliebte Alternative für schnelle und hochauflösende Bestandsaufnahmen von Baustellen, jedoch fehlt es dieser Technik noch an gezielten Analyseverfahren, computergestützter Interpretation und Strategien für die automatisierte Evaluation von metrischen Toleranzen in der Ingenieurpraxis. Demnach liegt die Herausforderung beim TLS weniger in der hochauflösenden Bestandserfassung, als vielmehr in der Interpretation dieser Datensätze, mit dem Ziel automatisiert Aussagen über detektierte Änderungen treffen zu können. Insbesondere im Innenausbau gibt es viele detailreiche Zustandsänderungen von Bauteilen. Deshalb sind die Genauigkeitsanforderungen dort besonders hoch. Gleichzeitig herrschen aber im Gebäudeinneren erschwerte Aufnahmebedingungen aufgrund von beengten Bewegungsräumen, eingeschränkten Sichten, GNSS-Abschattung und mehrdeutigen Objektstrukturen, die häufig zu schlechten Aufnahmegeometrien, Verdeckungen, schwacher Georeferenzierung und einer mangelhaften Beobachtungsredundanz führen.

3 Voxelbasierte Änderungsdetektion

Ein Voxel entspricht einer Zelle in einem regelmäßigen 3D-Gitter und mit jedem voxelbasierten Ansatz geht daher von Natur aus die Entscheidung zur Diskretisierung von eigentlich kontinuierlichen Daten einher. Andernfalls wird eine "Voxelisierung" in der Phase der Vorverarbeitung angewandt, um räumliche Abfragen zu beschleunigen und die Datenmenge für anspruchsvolle Analysen in vorselektierten Bereichen zu reduzieren. In diesem Fall dient der Voxelraum dann als 3D-Index (z.B. vom Typ Octree). In den folgenden Abschnitten nutzen wir eine Farbskala (Abb. 1), um klassifizierte Voxel zu kennzeichnen: Aus einer Messepoche werden die Klassen *leer* (Magenta), *unbekannt* (blau) und *belegt* (Cyan) gebildet. Liegen mindestens zwei Messepochen vor, lassen sich Voxel in *verschwunden* (rot), *neu* (gelb) oder *bestätigt* (grün) unterscheiden.

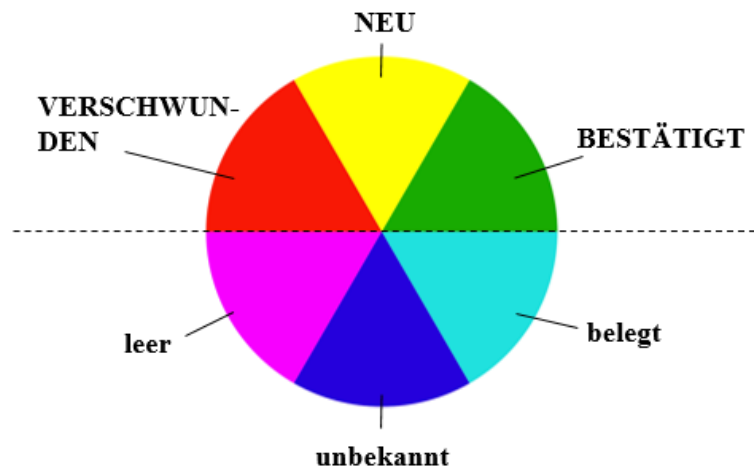


Abb. 1: Farbskala zur Kennzeichnung unterschiedlich klassifizierter Voxel

3.1 Modellierung der Raumbelegung aus einer Messepoche

Eine 3D-Punktwolke wird zu Zwecken der Änderungsdetektion in ein strukturiertes Voxelgitter transformiert, um daraus Erkenntnisse über die Belegung des Raumes abzuleiten. Zu Beginn wird der Voxelraum V initiiert d.h. der gesamte 3D-Raum des Untersuchungsgebietes wird „voxelisiert“ bzw. gekachelt und entsprechend der vorgegebenen Voxelgröße diskretisiert. Jeder 3D-Punkt wird seiner entsprechenden Gitterzelle, also seinem Voxel zugeordnet. Die tatsächliche Verteilung und Häufung von 3D-Punkten wird in diesem ersten Schritt nicht berücksichtigt.

Wenn die Anwendung ausschließlich auf Voxel Ebene arbeiten soll, ist die gewählte Voxelgröße entscheidend für die Genauigkeit und den Detaillierungsgrad. Jeder 3D-Punkt „stimmt“ für den Zustand „Belegung“ in seinem zugehörigen Voxel. Je mehr 3D-Punkte sich innerhalb eines Voxels befinden, desto größer ist die Annahme von tatsächlicher Belegung des Raumes an dieser Stelle. Für eine endgültige Entscheidung durch Binarisierung muss dann ein geeigneter Schwellenwert gefunden werden, der für jedes Voxel die Entscheidung *leer* (0) oder *belegt* (1) trifft. Dieser Schwellenwert hängt stark von der Punktdichte ab. Wenn ein Voxel nur eine begrenzte Anzahl von 3D-Punkten enthält, z. B. nur vereinzelte Punkte, die durch Rauschen entstanden sind, wird es durch den Schwellenwert besser als *leer* klassifiziert, anstatt fälschlicherweise als vollständig belegter Raum interpretiert zu werden.

TLS-Punktwolken bergen zusätzliches Wissen über die Belegung des Raums. Ein Laserstrahl traversiert von seinem Ursprung s über den Strahl r zu einem Punkt p , der entsteht, wenn der Laserstrahl an einer Objektoberfläche reflektiert wird. Voxel, die weder traversiert werden noch belegt sind verbleiben *unbekannt*. Auf diese Weise können die Zustände der nicht besetzten Voxel in *leer* und *unbekannt* unterschieden werden. Im Zuge der voxelbasierten Modellierung der Raumbelegung aus einer TLS-Punktwolke tritt ein unvermeidlicher Diskretisierungsfehler auf, denn alle Berechnungen und räumlichen Abfragen beziehen sich auf das Voxelzentrum und nicht mehr auf die original gemessenen 3D-Punkte. Das Modell der Raumbelegung ist nur eine Annäherung an die wirkliche Situation und variiert in Abhängigkeit von Voxelgröße, Ursprung und Ausrichtung des Voxelraums (Abb. 2a und 2b). Je nach Voxelgröße und individueller Dichte der Punktwolke fällt dieser Fehler mehr oder weniger ins Gewicht.

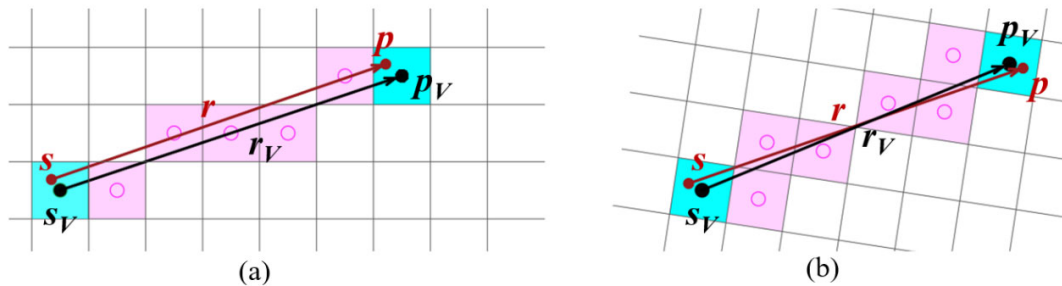


Abb. 2: Auswirkung unterschiedlich angelegter Voxelräume. r_v verbindet s_v und p_v im Voxelraum (schwarz) während r die tatsächliche Lasermessung von s nach p darstellt (rot): a) voxelbasierte Modellierung der Raumbelugung, b) voxelbasierte Modellierung der Raumbelugung unter Verwendung eines anders angelegten Voxelraumes

3.2 Aufdeckung von Belegungskonflikten aus zwei Messepochen

Aus einer einzigen Punktwolke lassen sich bereits viele wertvolle räumliche Informationen über eine Szene ableiten. Eine zweite Punktwolke, die den gleichen räumlichen Bereich abdeckt, ermöglicht eine noch genauere Analyse, da sie entweder die ursprünglichen Annahmen über die Raumbelugung bestätigt oder einen Widerspruch hervorruft. Es gibt zwei Arten von möglichen Konflikten:

- I. Ein neuer Strahl $\overrightarrow{s_{v2} p_{v2}}$ durchquert ein Voxel, das zuvor als belegt markiert wurde
- II. Ein neuer Punkt p_{v2} tritt in einem Voxel auf, das in der ersten Epoche als leer markiert wurde

Die Aufdeckung und Bewertung solcher Konflikte erfolgt durch die Erkennung von veränderten Belegungszuständen (Abb. 3). Verschwundene Punkte des Konflikttyps I deuten auf einen Abriss hin, während solche vom Typ II auf neue Bauelemente oder Störobjekte (z.B. Baustellenmaterial) hinweisen. Das Ergebnis dieses Ansatzes zur Erkennung von Veränderungen ist eine Voxel-Punktwolke, die aus den geometrischen Schwerpunkten der klassifizierten Voxel besteht.

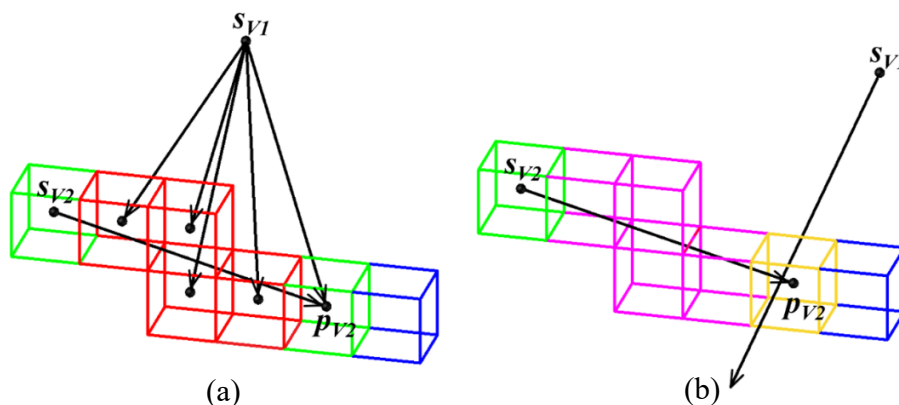


Abb. 3: Mögliche Belegungskonflikte aus zwei Messepochen: a) verschundene Voxel als Belegungskonflikttyp I, wie z.B. bei einem Abriss von Bauteilelementen b) neu als „belegt“ hinzugekommene Voxel als Belegungskonflikttyp II, wie z.B. beim Aufbau einer neuen Wand oder beim Auftreten von Baustellenmaterial und sonstigen Störobjekten

4 Genauigkeitsanforderungen im Kontext von BIM

Das U.S. Institute of Building Documentation (USIBD 2022) gibt mit der Level of Accuracy (LOA) Spezifikation einen Leitfaden zur Diskussion und Festlegung des geometrischen und räumlichen Genauigkeitsniveaus für professionelle Gebäudedokumentation. Mit der Spezifikation soll ein standardisierter Rahmen geschaffen werden, um konsistente Gebäudebestandserfassung zu ermöglichen. Die LOA des USIBD sind in fünf Zehnerschritten inkrementiert, beginnend mit LOA10 bis LOA50 (Abb. 4). Jede der fünf Stufen kann innerhalb desselben Projekts angewendet werden, denn Genauigkeitsangaben können zwar für einzelne Gebäudeelemente angemessen sein, jedoch nicht unbedingt für das ganze Bauprojekt. Beispielsweise wird gem. USIBD für innenliegende Türen, Wände und Fußböden LOD30 oder LOA40 empfohlen. Die in der LOA-Spezifikation definierten Konfidenzbereiche beziehen sich auf eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% (2 Sigma).

Die Angabe eines LOA kann sich entweder auf die Messung (z. B. Laserscanning) oder auf die Modellgenauigkeit beziehen. Letzteres ist besonders wichtig für die Erkennung und Bewertung von Änderungen, wenn es um den Vergleich von Modell (repräsentierte Oberfläche im Referenz-BIM) und erfassten Bestandsdaten (z. B. 3D-Punktwolke) geht.

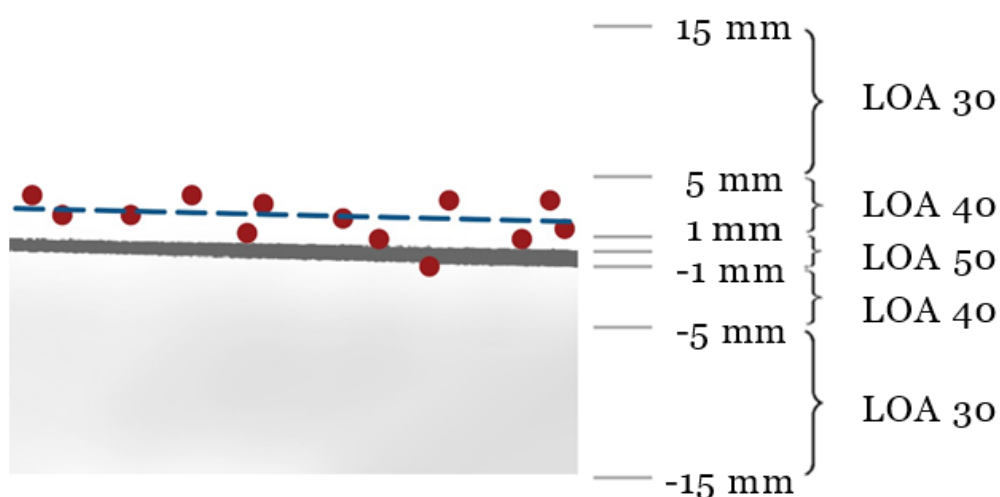


Abb. 4: Darstellung der Level of Accuracy (LOA) gem. USIBD: es gibt eine Diskrepanz zwischen der Bestandsmessung (rote Punkte) der tatsächlichen Objektoberfläche (graue Linie) und der im BIM repräsentierten Oberfläche (blau gestrichelte Linie)

5 Baufortschrittsdokumentation im Gebäudeinnenbereich

Die folgenden Experimente und Ergebnisse beziehen sich auf einen real durchgeführten Umbau im Gebäudeinneren. Das Projekt umfasste im Wesentlichen den Abbruch von nicht tragenden Wandelementen entlang eines langen Flurs, um mehr Platz für einen offenen Seminarraum zu schaffen. Abb. 5 zeigt das entsprechende BIM mit den SOLL-Zuständen vor und nach der Umbauphase.

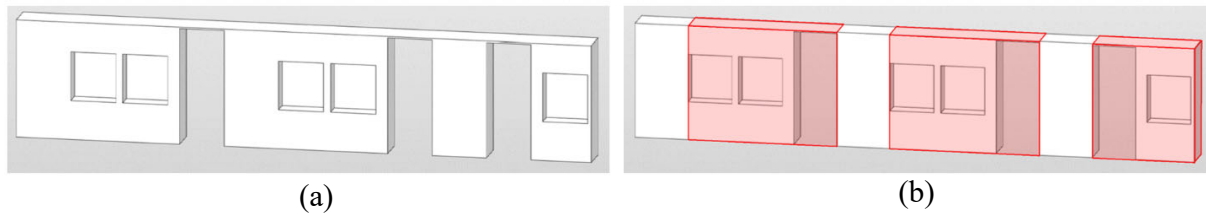


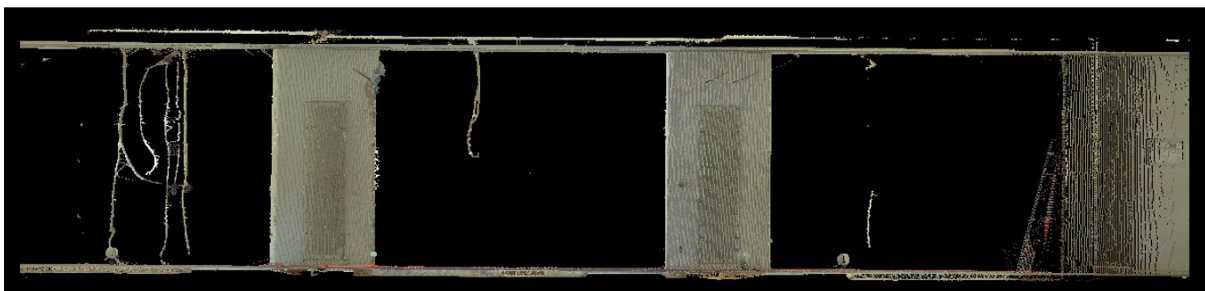
Abb. 5: BIM zum Umbauprojekt: a) Modell, das den alten SOLL-Zustand zeigt, b) Modell, das den neu geplanten Zustand zeigt, bei dem nicht-tragende Wandelemente als „abzubrechen“ markiert sind (rot)



(a)



(b)



(c)

Abb. 6: Originale TLS Punktwolken mit RGB-Farben zu den drei Messepochen: a) Epoche 1 (vor Umbau), b) Epoche 2 (während fortschreitender Abbrucharbeiten), c) Epoche 3 (nach Abschluss der Abbrucharbeiten)

5.1 Datenerfassung

Die Abbrucharbeiten erstreckten sich über einen Zeitraum von ca. 3 Wochen im Gebäudeinneren und ein FARO® Focus 3D Laserscanner wurde zur Dokumentation des Projektfortschritts eingesetzt. Diese Dokumentation umfasste 3 Scanepochen: 1) zu Beginn des Projekts, d.h. der alte Zustand, 2) während der laufenden Abbrucharbeiten und 3) nach Abschluss der Abbrucharbeiten,

d.h. der neue Zustand. Jede Messepoche setzt sich aus drei sich überlappenden Punktwolken zusammen. Die relativen Ausrichtungen der Punktwolken innerhalb jeder Epoche wurden mit einem "Plane-to-Plane"-Ansatz realisiert, wobei durchweg gute Registrierungsergebnisse im Submillimeterbereich erzielt wurden. Um die Scandaten mit dem BIM-Referenzsystem abzugleichen, wurden tachymetrisch beobachtete, Schachbrett-Targets verwendet. Die absolute Orientierung jeder Epoche ergab $\approx 1 - 2$ mm (die Messungen wurden mit einer Trimble® S6 Totalstation durchgeführt). Die verfügbaren Punktwolken aus den Epochen 1-3 umfassen jeweils mehrere Millionen Punkte und liefern somit sehr hoch aufgelöste räumliche Informationen über die Baustelle. Epoche 1 enthält ≈ 33 Mio. zu verarbeitende Punkte, Epoche 2 ≈ 28 Mio. und Epoche 3 ≈ 35 Mio. Punkte. Jeder Datensatz weist eine recht heterogene Punktdichte auf, was auf die stark variierenden Abstände zwischen Scanner und Objekt in der begrenzten Innenraumumgebung zurückzuführen ist. Im Zielbereich beträgt der durchschnittliche Punkt-zu-Punkt-Abstand ≈ 2 mm.

5.2 Baufortschrittsdokumentation

Die Transformation der Punktwolken in den Voxelraum wurde mit Hilfe der Bibliotheken PCL (Point Cloud Library) und OpenCV in einer C++ Programmierung nach HEBEL et al. (2013) umgesetzt. Die Umrechnung der Weltkoordinaten anhand von Koordinatenoffset und Umrechnungsfaktor ($=100$ für Weltkoordinaten [m] und 1cm Voxelgröße) in den Voxelraum erfolgte durch Iteration über jedes einzelne Punktwolkenelement. Dabei wurde für jede „Höhenschicht“ ein eigenes zweidimensionales Belegungsgitter ausgegeben. Für das gesamte Untersuchungsgebiet ($11,46 \times 15,25 \times 3,38$ m) wurden 338 Belegungsgitter mit je 1146×1525 Voxel-Zellen erstellt. Insgesamt entstanden 590.705.700 Voxel bei 1 cm Voxelgröße. Zur Berechnung des Weges des Laserstrahls r_v durch den Voxelraum V wurde eine in OpenCV implementierte Variante des Algorithmus von Bresenham (BRESENHAM 1965) verwendet. Der sog. *LineIterator* iteriert über alle Zellen eines Rasterliniensegments, das zwei gegebene Positionen, in dem Fall s_v und p_v , miteinander verbindet. Schließlich trägt jede Zelle alle Informationen über ihre Belegung bzw. nicht-Belegung und darüber, ob sie von Messstrahlen traversiert wird. Das Erzeugen des Voxelraums auf einem Intel Core i7 (2.9 GHz CPU) Notebook mit 16 GB RAM hat für jede Messepoche ca. 5-6 Minuten in Anspruch genommen.

Während das Aufbauen der Voxelräume für jede Messepoche autark ablief, wurden zur Änderungsdetektion jeweils zwei Messepochen kombiniert analysiert und verarbeitet. Jedes Voxel einer Epoche wurde mit den entsprechenden Voxeln (und einem kleinen Nachbarschaftsbereich von 2 Voxeln) der anderen Epochen verglichen, um dabei entweder Bestätigung zu finden oder Widersprüche betreffend der vorliegenden Belegungsinformation aufzudecken und zu bewerten. *Bestätigt* belegte Voxel wurden grün gelabelt. Voxel, die in Epoche 1 leer waren, aber in Epoche 2 belegt sind, erscheinen gelb, d.h. etwas ist *neu*. Rote Voxel kennzeichnen solche, die noch in Epoche 1 vorhanden waren aber in Epoche 2 von Messstrahlen traversiert werden und somit offensichtlich leer sein müssen. Diese Voxel zeigen das Verschwinden bzw. den Abbruch von Elementen an. Voxel für die es nur in einer Messepoche, nicht aber in der zu vergleichenden Epoche Informationen gibt, verbleiben im Status *unbekannt* und erscheinen blau. Als Ergebnis der Änderungsdetektion wird eine klassifizierte Voxelpunktwolke ausgegeben (Abb. 7). Die Klassenzugehörigkeit kann entweder als zusätzliches Attribut (Label) oder im RGB-Wert hinterlegt werden.

Der Vergleich im Voxelraum und das Schreiben der Ergebnis-Voxelwolken haben für jede Mess-epoche ca. 50 Sekunden gedauert.

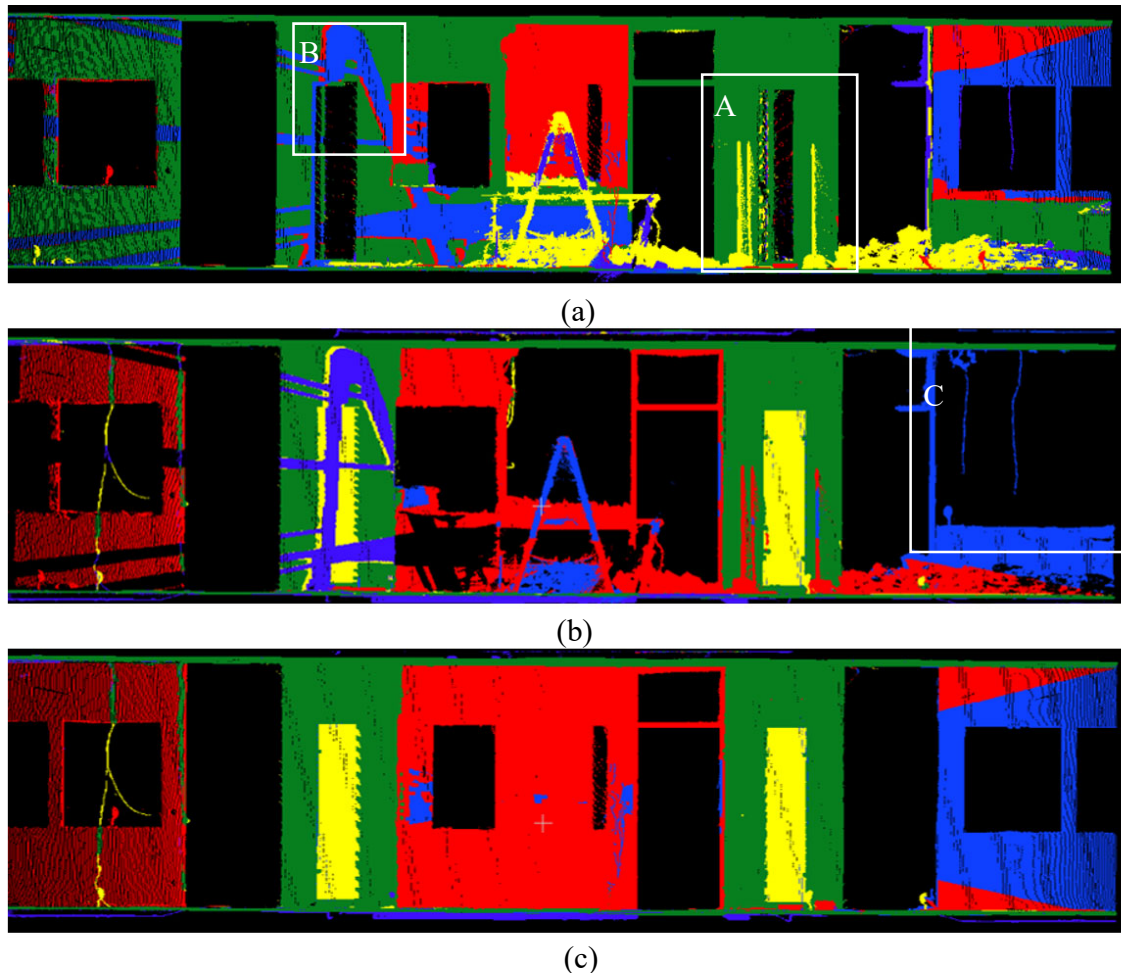


Abb. 7: Ergebnisse der Änderungsdetektion: a) Epoche 2 vs. Epoche 1, b) Epoche 3 vs. Epoche 2, c) Epoche 3 vs. Epoche 1

5.3 Einfluss von Schwellwert und Voxelgröße

Der Schwellwert (th) zur Binarisierung regelt die Relevanz von belegten und traversierten Voxeln im Hinblick auf die Gesamtbewertung von Änderungskonflikten. Um die Auswirkungen von Voxelgröße, Punktdichte und Punktrauschen innerhalb der Scans zu erfahren, d. h. Voxel mit unterschiedlich vielen zugehörigen Punkten, haben wir mehrere Durchläufe mit jeweils unterschiedlichem Schwellwert berechnet. Je niedriger th ist, desto mehr Voxel werden als relevant angesehen und desto mehr Informationen liefert das Ergebnis. Allerdings nehmen die Auswirkungen von Rauschen und Ausreißern mit abnehmendem th zu. Der Schwellwert wirkt sich besonders stark auf die Bereiche aus, die weit von den Scannerstandpunkten entfernt sind und daher nur eine geringe Punktdichte, aber gleichzeitig viel Rauschen aufweisen. Mit $th = 20$ haben wir einen guten Kompromiss und zufriedenstellende Ergebnisse für hohe Qualitätsansprüche erzielt (Abb. 8). Die numerischen Ergebnisse sind in Tab. 1 dargestellt.

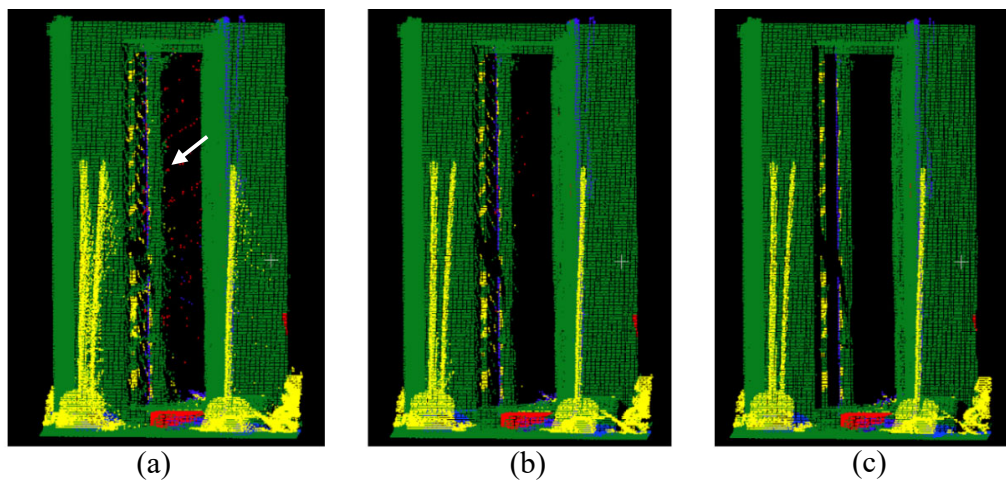


Abb. 8: Veränderung des Schwellwertes th zur Reduktion von Punktrauschen für einen Detailausschnitt (vgl. Abb. 7a): a) $th=3$, b) $th=10$, c) $th=20$

Tab. 1: Ergebnisse der voxelbasierten Änderungsdetektion mit 1 cm Voxelgröße und verschiedenen Schwellwerten zur Anpassung der Relevanz von Einzelmessungen

Epoche	bestätigt [%]		neu [%]		verschwunden [%]		unbekannt [%]		gesamt [# Punkte]	
	th = 3	th = 10	th = 3	th = 10	th = 3	th = 10	th = 3	th = 10	th=3	th=10
2 vs. 1	53,2	52,2	7,9	12,6	4,3	7,8	34,7	27,3	1.712.632	706.100
3 vs. 2	49,73	42,9	1,47	2,3	8,4	15,62	40,39	39,18	2.327.731	809.194
3 vs. 1	43,64	45,1	1,12	2,3	7,9	16,65	47,37	35,94	2.266.865	803.064

5.4 Auswirkungen der Scan-Geometrie

Die Aufnahmegeometrie beim TLS hat großen Einfluss auf die Qualität einer nachfolgenden voxelbasierten Änderungsdetektion. Bei der Aufnahme vor Ort muss darauf geachtet werden, dass alle Bereiche in beiden Epochen ausreichend vom Scanner erfasst werden. Auch solche, in denen vermeintlich keine neue Information zu finden ist, wie z.B. im Bereich einer bereits abgebrochenen Wand. Es ist wichtig, dass auch leere Bereiche in einer nachfolgenden Messung trotzdem von Messstrahlen durchdrungen werden, damit der Voxelraum an diesen Stellen traversiert und damit auch tatsächlich als *leer* angenommen wird. Nur so können klare Aussagen über Bestätigung oder Widerspruch getroffen werden. Sonst kann es passieren, dass relativ große Anteile des Untersuchungsgebiets im Status *unbekannt* verbleiben (Abb. 7c). Vor diesem Hintergrund unterscheidet sich die Aufnahmeplanung für eine Änderungsdetektion von einer solchen zur reinen Neu-Bestandsmodellierung. Das Scanning vor Ort sollte in dem Bewusstsein durchgeführt werden, dass belegter und nicht-belegter Objektraum gleichwertig wichtig für nachfolgende Analysen sind.

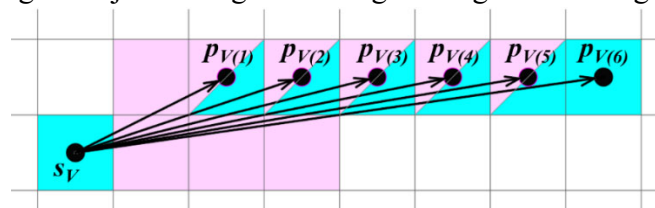


Abb. 9: Auswirkung von schleifenden Schnitten auf die Modellierung der Raumbelegung mit Voxel

Die architektonische Beschaffenheit im Gebäudeinneren, insbesondere im (Um-) Baubetrieb, ist grundsätzlich eine herausfordernde Umgebung für terrestrisches Laserscanning. Eingeschränkte Bewegungsräume, stark variierende Objektabstände und i.d.R. viele Störobjekte wie Möbel und ggf. Baustellenmaterial verursachen geringe Überlappung von benachbarten Punktwolken, Lücken, Verdeckungen, heterogene Punktdichten und schleifende Schnitte, d.h. kleine Auftreffwinkel zwischen Messstrahl und Objektoberflächennormale. Letzteres tritt auf, wenn der Abstand zwischen Scanner und Objekt zu gering ist (z.B. in einem schmalen, langen Flur) und resultiert nicht nur in einer verminderten Messgenauigkeit, sondern auch fehlerhaft klassifizierten Voxeln zur Änderungsdetektion. Schleifende Schnitte haben zur Folge, dass belegte Voxel gleichzeitig auch traversiert werden und je nach Schwellwert, Punktdichte und Voxelgröße fälschlicherweise als leer klassifiziert werden (siehe Abb. 7b und Abb. 9). Um diesen Effekt zu vermeiden sollte auf eine ausreichende Anzahl von Standpunkten bei der Aufnahme geachtet werden und darauf, die Punktwolken vor der Weiterverarbeitung z.B. mit einem Distanzfilter zu bereinigen. Dieser Mehraufwand zahlt sich zugunsten einer automatisierten voxelbasierten Interpretation wieder aus.

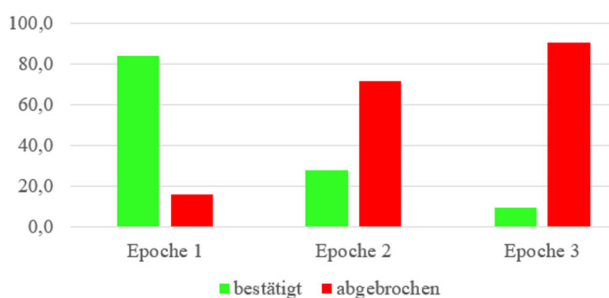


Abb. 10: Ergebnisdiagramm: Anzahl von Voxeln der Klassen *bestätigt* und *abgebrochen* [%]

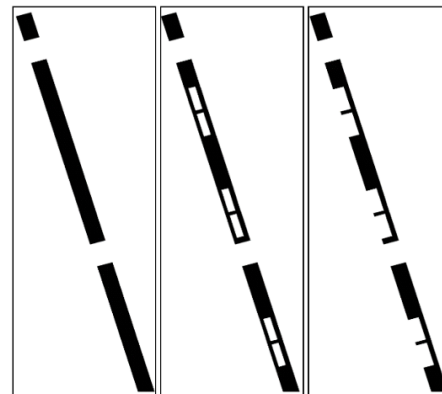


Abb. 11: Aus dem BIM abgeleitete Belegungsgitter für ein Wandstück. Schwarze Rasterzellen zeigen belegten Raum

5.5 Abgleich mit gegebenem BIM

Die Raumbelugung kann nicht nur aus Messdaten modelliert werden, sondern lässt sich auch aus einem gegebenen BIM ableiten. Sie entspricht dann der SOLL-Belegung und kann damit nicht nur zur Änderungsdetektion, sondern auch zur Verifizierung des Modells genutzt werden. Bei einer Voxelgröße von 1 cm wäre das bis einschließlich LOA 30 möglich. Das BIM wird dafür ebenfalls in den Voxelraum überführt und gemäß der Zielauflösung diskretisiert, sodass eine Reihe zweidimensionaler Belegungsgitter entsteht (Abb. 11). Ein BIM liegt üblicherweise im IFC-Format vor. Solche Geometrieobjekte können praktisch mit Autodesk Revit in ein CAD-Format konvertiert und weiterverarbeitet werden. Alternativ empfiehlt sich zur direkten Verarbeitung im Programmcode die open source Implementierung *IFC++* für C++.

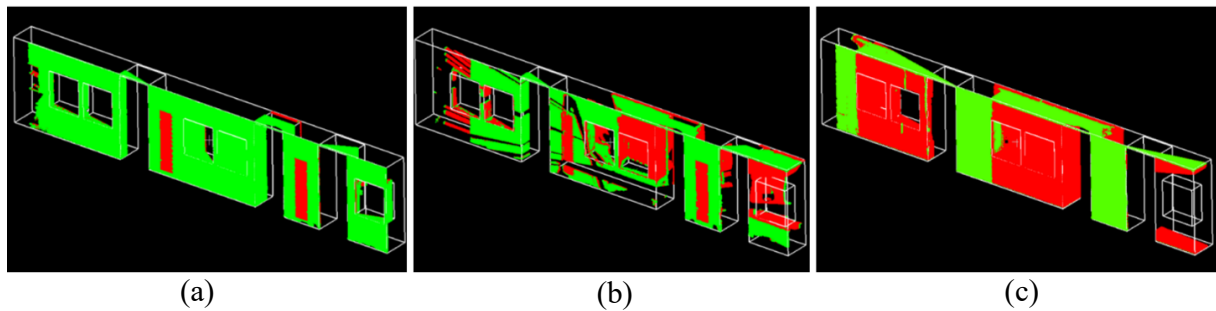


Abb. 12: Ergebnis der Änderungsdetektion BIM (alter Zustand) vs. Punktwolke: a) BIM vs. Epoche 1, b) BIM vs. Epoche 2, c) BIM vs. Epoche 3

Jede Messepoche wurde gegen das BIM (Zustand vor den Abbrucharbeiten) verglichen. Die Ergebnisse spiegeln die fortschreitenden Abbrucharbeiten optisch und numerisch wider (Abb. 10 und Abb. 12). Während Epoche 1 einen hohen Anteil von über 80% bestätigt *belegten* Voxeln hat, kehrt sich das Bild bis zu Epoche 3 mit ca. 90% als *abgebrochen* gekennzeichneten Voxeln um. Der Vergleich von *Punktwolke* vs. *BIM* hat gegenüber dem Vergleich *Punktwolke* vs. *Punktwolke* den Vorteil, dass die Raumbelegung aus dem BIM volumetrisch bzw. flächig vollständig beschrieben wird, während die Raumbelegung aus zwei Punktwolken nur in deren Überlappungsbereich und auch nur anhand der Abtastung auf der Objektoberfläche meist unvollständig und lückenhaft vorliegt. Bei einem vollständigen Belegungsmodell ist u. a. auch das Innere eines Objektkörpers, z.B. einer Wand, beschrieben, sodass Messstrahlen, die den Raum traversieren den volumetrisch vollständigen Abbruch anzeigen. Diese Vollständigkeit ist besonders wertvoll, wenn klassifizierte Voxel für räumliche Abfragen und Operationen in einer räumlichen Gebäudedatenbank oder einem 3D-/ Indoor-GIS herangezogen werden (Abb. 13). Bei entsprechender „3D-Fähigkeit“ eines solchen Systems ist es möglich die Modellgeometrie durch 3D-Funktionen wie *3D Difference*, *3D Intersection* und *3D Merge* zu aktualisieren. Um kombinierte Analysen von Modell, Punktwolke und Voxeln auch mit Level of Detail Strukturen zu ermöglichen, bedarf es jedoch der Implementierung von 3D-Indizes und der Möglichkeit zur Abbildung sämtlicher topologischer Beziehungen in 3D, wie sie z.B. in BORRMAN et al. (2006) vorgeschlagen und in MEYER et al. (2019) diskutiert werden.

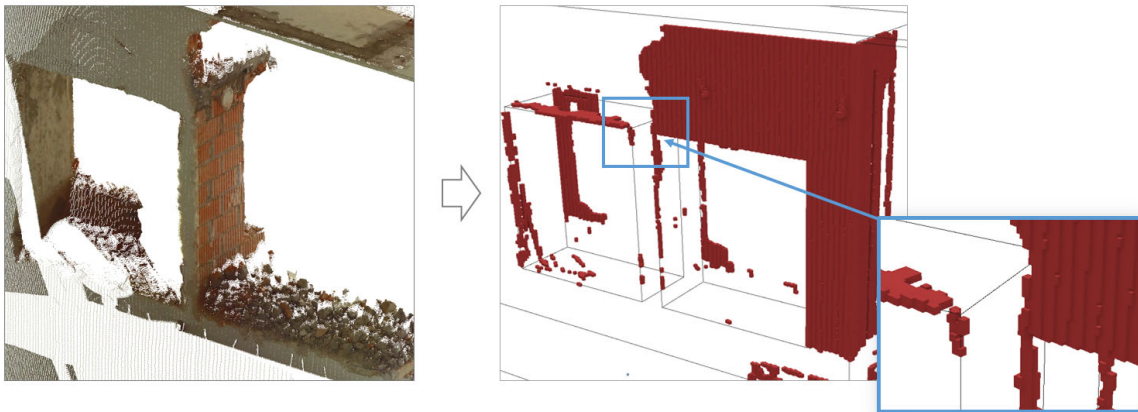


Abb. 13: Originale 3D-Punktwolke und 3D-Gebäudemodell mit "Abbruch-Voxeln", als Ergebnis der Änderungsdetektion

6 Fazit & Ausblick

3D-Punktwolken aus Laserscanning im Nahbereich bergen durch ihre hohe Auflösung ein immenses Informationspotenzial, das nur selten voll ausgeschöpft wird, weil es immer noch häufig an geeigneten anwendungsspezifischen und vor allem automatisierten Auswertestrategien mangelt. In diesem Beitrag haben wir eine Methode zur voxelbasierten Änderungsdetektion im Kontext von automatisierter Baufortschrittsdokumentation im Gebäudeinnenbereich vorgestellt und anhand eines realen Umbauprojekts demonstriert. Bei einer hohen Punktdichte, die einen hohen Schwellwert zur Evaluation der Voxel-Belegung und damit zur Gewährleistung ausreichender Qualität erlaubt, sind Voxelgrößen von nur einem Zentimeter möglich. Das entspricht einer sehr feinen Auflösung mit einem Diskretisierungsfehler, der unvermeidlich vorhanden, aber klein genug ist, um mittleren Genauigkeitsanforderungen gemäß LOA Spezifikation für BIM gerecht zu werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass multitemporale Innenraum-Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner zu Zwecken der Änderungsdetektion insgesamt jedoch deutlich höheren Ansprüchen vor allem an Qualität, Aufnahmegeometrie, Registrierung und Punktdichte genügen müssen, als es für Messprojekte zur reinen Bestandsmodellierung der Fall ist. Insbesondere bei beengten Aufnahmesituationen (z.B. in langen, schmalen Fluren) muss darauf geachtet werden, dass die Scanauflösung der räumlichen Ziel-Auflösung zur Änderungsdetektion noch gerecht wird und dass der Objektraum auch in nicht-belegten Bereichen möglichst lückenlos erfasst wird. Dabei kann es auch erforderlich sein, Fehlereffekte wie sog. Mixed Pixel, die im Innenbereich häufig entlang von Kanten auftreten zu berücksichtigen, indem für jede Messepoche auf gleiche Messanordnungen bis hin zu identischen Scanstandpunkten geachtet wird, was wiederum eine Vermarkung der Standpunkte notwendig machen würde.

Zur kombinierten Verarbeitung von BIM und 3D-Punktwolken erwarten wir Fortschritte auf dem Gebiet der BIM-GIS-Integration, um klassifizierte Voxel mit erweiterter Funktionalität von 3D- und insbesondere Indoor-GIS zu analysieren. Die voxelbasierte Änderungsdetektion werden wir noch in weiteren Umbauprojekten im Gebäudeinneren verifizieren und erproben. Dabei wollen wir auch größere Datenmengen durch Parallelisierung und Integration der GPU als zusätzlichen

Prozessor beschleunigt verarbeiten. Um höchsten ingenieurgeodätischen Genauigkeitsansprüchen gerecht zu werden, werden wir außerdem das 3D-Voxelrastrer zum Aufdecken von Belegungskonflikten nutzen, wobei dann ein präziser Direktvergleich nach dem Ansatz von HEBEL et al. (2013) auf Einzelpunkt-Ebene mit dem Modell stattfinden soll.

Danksagungen

Wir danken Herrn Dr. Marcus Hebel von Fraunhofer IOSB für die Unterstützung beim Aufbau der Verarbeitungsroutinen.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Leonhard Obermeyer Center (LOC) an der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt (<https://www.ed.tum.de/loc/home/>).

7 Literaturverzeichnis

- BORRMANN, A., VAN TREECK, C. & RANK, E., 2006: Towards a 3D Spatial Query Language. Proc. Joint Int. Conf. of Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering (ICCCBE-XI).
- BRESENHAM, J. E., 1965: Algorithm for computer control of a digital plotter. IBM Syst. J., **4** (1), 25-30. <https://10.1147/sj.41.0025>.
- GEHRUNG, J., HEBEL, M., ARENS, M. & STILLA, U., 2020: Change detection and deformation analysis based on mobile laser scanning data of urban areas. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. V-2-2020, 703-710. <https://10.5194/isprs-annals-V-2-2020-703-2020>.
- HEBEL, M., ARENS, M. & STILLA, U., 2013: Change detection in urban areas by object-based analysis and on-the-fly comparison of multi-view ALS data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **86**, 52-64. <https://10.1016/j.isprsjprs.2013.09.005>.
- HUANG, R., XU, Y., HOEGNER, L. & STILLA, U., 2021: Semantics-aided 3D change detection on construction sites using UAV-based photogrammetric point clouds. Automation in Construction, **134**, 104057, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104057>.
- MEYER, T. & BRUNN, A., 2019: 3D Point Clouds in PostgreSQL/PostGIS for Applications in GIS and Geodesy. Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, 154-163, <https://10.5220/0007840901540163>.
- MEYER, T., BRUNN, A. & STILLA, U., 2021: Accuracy Investigation on Image-based Change Detection from BIM compliant Indoor Models. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., V-4-2021, 105-112. <https://10.5194/isprs-annals-V-4-2021-105-2021>.
- TUTTAS, S., BRAUN, A., BORRMANN, A. & STILLA, U., 2017: Acquisition and consecutive registration of photogrammetric point clouds for construction progress monitoring using a 4D BIM. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, **85**(1), 3-15, <https://doi.org/10.1007/s41064-016-0002-z>.
- USIBD, 2022: U.S. Institute of Building Documentation. <https://usibd.org/>, letzter Zugriff am 08.01.2022.