

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

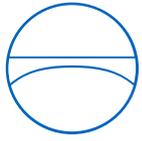
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Rahmenbedingungen und Methoden der As-Built Dokumentation

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor:	Felix Tietze
Matrikelnummer:	██████████
1. Betreuer:	M.Sc. Florian Noichl
2. Betreuer:	M.Sc. Alex Braun
Ausgabedatum:	28. Mai 2020
Abgabedatum:	28. Oktober 2020



Abstract

Building Information Modeling makes a significant contribution to digitalisation in the construction industry. A digital model forms the core of the planning. Often, however, the built state deviates from the planning and must be updated to ensure that the model can be used in the operating phase of the building. A model can also be created retrospectively for existing buildings. This is known as as-built documentation.

This work is intended to provide a general overview of the status of as-built documentation in research and practice. For this purpose, the technological fundamentals of point cloud acquisition and processing are presented and the various algorithms for segmentation are explained. For use in practice, various programs are presented that enable modelling and comparison with one another. Then the process is explained in practice, from the definition of the required information to the creation of the model and the legal framework. The conclusion is a presentation of different use cases.

Zusammenfassung

Building Information Modeling leistet einen bedeutenden Beitrag zur Digitalisierung im Bauwesen. Hierbei bildet ein digitales Modell das Kernstück der Planung. Oft weicht der gebaute Zustand aber von der Planung ab und muss nachgeführt werden, um eine Nutzung des Modells in der Betriebsphase des Gebäudes sicherzustellen. Für Bestandsgebäude kann nachträglich ebenso ein Modell erstellt werden. Dies wird als As-Built Dokumentation bezeichnet.

Diese Arbeit soll einen generellen Überblick über den Stand der As-Built Dokumentation in Forschung und Praxis liefern. Dafür werden die technologischen Grundlagen der Punktwolkenerfassung und -bearbeitung dargestellt und die verschiedenen Algorithmen zur Segmentierung erklärt. Für die Anwendung in der Praxis werden verschiedene Programme vorgestellt, die eine Modellierung ermöglichen und miteinander verglichen. Anschließend wird der Ablauf in der Praxis, von der Festlegung der benötigten Informationen bis zur Erstellung des Modells und die rechtlichen Rahmenbedingungen, erläutert. Den Abschluss bildet eine Vorstellung von verschiedenen Anwendungsfällen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII	
Abkürzungsverzeichnis	VIII	
1	Einführung und Motivation	1
1.1	Einführung	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2	Methoden der digitalen Gebäudeerfassung	3
2.1	Erfassung.....	3
2.1.1	Photogrammetrie	3
2.1.2	Laserscanning.....	9
2.2	Auswertung von Punktwolken	15
2.2.1	Segmentierung.....	15
2.2.2	Vermaschung/Modellierung	18
2.3	Visualisierung	19
2.4	Vergleich von Photogrammetrie und Laserscanning.....	20
3	Vergleich aktueller Produkte auf dem Markt	22
3.1	Leica Cyclone & Cloudworx	22
3.2	FARO As-Built.....	23
3.3	Trimble RealWorks & SketchUp.....	24
3.4	ClearEdge3D EdgeWise	24
3.5	PointCab	26
3.6	Vergleich.....	27
4	As-Built Dokumentation in der Praxis	28
4.1	Ablauf.....	28
4.1.1	Erforderlicher Informationsgrad.....	28
4.1.2	Scanqualität	31
4.1.3	Erfassung.....	32
4.1.4	As-Built Rekonstruktion.....	32

4.2	Zeitpunkt der Aufnahme.....	33
4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen	34
4.4	Anwendungsfälle.....	35
4.4.1	Dokumentation.....	35
4.4.2	Baufortschrittskontrolle	35
4.4.3	Facility Management.....	36
4.4.4	Bauen im Bestand.....	39
4.4.5	Digitale Fabrik.....	39
4.4.6	Öffentlichkeitsarbeit und Visualisierung	40
4.4.7	Mitarbeitertraining	40
5	Fazit	41
	Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bildverband für die Mehrbildauswertung.....	5
Abbildung 2: Multikopter mit Kamera.....	6
Abbildung 3: Signalisierte (a) und nicht signalisierte (b) Bilder.....	7
Abbildung 4: Allgemeiner Ablauf von Structure from Motion.....	8
Abbildung 5: Prinzip eines Laserscanners.....	11
Abbildung 6: Intensitätsbild.....	12
Abbildung 7: Überlagerung mit Farbinfos aus einer Digitalkamera.....	12
Abbildung 8: Iterative Closest Point – Algorithmus.....	13
Abbildung 9: Umgebungstracking für die automatische Vorregistrierung.....	14
Abbildung 10: Manuelle 3D-Modellierung in PointCab.....	15
Abbildung 11: Segmentierung von 3D-Punktwolken durch model fitting von geometrischen Grundformen.....	16
Abbildung 12: Region growing – Algorithmus.....	17
Abbildung 13: Delaunay Triangulation.....	19
Abbildung 14: Oberfläche von Leica TruView.....	20
Abbildung 15: Vergleich der Auswerteverfahren.....	21
Abbildung 16: Automatisch extrahierte und verbundene Rohre.....	25
Abbildung 17: Panorama-Ansicht in PointCab für Revit.....	26
Abbildung 18: Darstellung der verschiedenen LOD-Grade anhand einer Stahlstütze und ihres Anschlusses.....	29
Abbildung 19: Beispiel für die Festlegung des erforderlichen Informationsgrades..	31
Abbildung 20: Lebenszyklus eines Gebäudes.....	37

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laserscanning
BIM	Building Information Modeling
FM	Facility Management
HOAI	Honorarordnung für Architekten- und Ingenieursleistungen
ICP	Iterative Closest Point
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LPH	Leistungsphase
LOD	Level of Development
RANSAC	random sample consensus
SIFT	scale invariant feature transform
SfM	Structure from Motion
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1 Einführung und Motivation

1.1 Einführung

Die Digitalisierung in Deutschland schreitet immer weiter voran, ist aber nicht in allen Bereichen gleich entwickelt. Die Bauwirtschaft ist im Vergleich mit anderen Branchen, wie der Automobilbranche, schwächer digitalisiert. Eine Studie von Accenture hat die Digitalisierung in verschiedenen Branchen untersucht und dabei Noten von 1 (schlecht) bis 4 (gut) vergeben. Dabei sind sie zu dem Schluss gekommen, dass die Bauindustrie mit der Note 1,5 schlechter als die meisten anderen Branchen abschneidet (Accenture 2016). Daher wird intensiv nach Lösungen gesucht, mit der die Baubranche von den Produktivitätsgewinnen, welche die Digitalisierung ermöglicht, profitieren kann. Einen wichtigen Beitrag dazu leistet die kollaborative Planungsmethode Building Information Modelling (BIM) und die sich daraus ergebenden Vorteile, wie höhere Termin-, Planungs- und Kostensicherheit. Grundlage dafür bildet ein digitales Modell des Gebäudes, das von allen Beteiligten für die Planung, Ausführung und spätere Bewirtschaftung verwendet wird. Es ermöglicht einen durchgängigen Informationsfluss und vereint die Planungen der einzelnen Fachgebiete, um Planungsfehler zu minimieren und die Kommunikation zu verbessern.

In der Ausführung treten aber häufig Abweichungen von der Planung auf, die in den Plänen nicht nachgeführt werden. Dadurch entsteht eine Diskrepanz zwischen dem geplanten (As-Planned) und dem gebauten (As-Built) Zustand. Aus diesem „fehlerhaften“ Modell abgeleitete Pläne können in den späteren Phasen eines Gebäudes nur bedingt verwendet werden. Daher ist es von größter Wichtigkeit dieses Modell zu aktualisieren. Das Gleiche gilt für Bauwerke, die aufgrund ihres Alters über kein digitales Modell oder keine aktuellen Pläne verfügen. Die Generierung der dafür notwendigen Geometriedaten kann mithilfe von digitalen Methoden zur Gebäudeerfassung, wie Laserscanning oder Photogrammetrie, erfolgen. Die technischen Entwicklungen, die es in der Gerätetechnik in den letzten Jahren gab, führen dazu, dass die Kosten für diese Methoden sinken und so für immer mehr Auftraggeber attraktiv werden. Die Nachfrage nach digitalen Gebäudemodellen wird in Zukunft zunehmen, da mit ihnen große Vorteile verbunden sind.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit soll einen Überblick darüber vermitteln, welche technischen Möglichkeiten es gibt, um eine As-Built Dokumentation zu erstellen, wie dies konkret in der Praxis umgesetzt werden kann und welche Anwendungen und Vorteile sich daraus ergeben.

In Kapitel 2 wird auf die beiden Verfahren zur Gebäudeerfassung, Photogrammetrie und Laserscanning, eingegangen und die technologischen Grundlagen erklärt. Zusätzlich werden die verschiedenen Algorithmen zur Registrierung und Segmentierung von Punktwolken vorgestellt und das weitere Vorgehen bei der Erstellung eines digitalen Modells erläutert. Am Ende des Kapitels werden die beiden Verfahren verglichen und mögliche Synergien aufgezeigt.

Im Anschluss daran bietet Kapitel 3 einen Überblick über eine Auswahl von Software für die 3D-Modellierung mithilfe von Punktwolken. Dabei wird auch auf den Grad der Automatisierung eingegangen und die einzelnen Produkte abschließend miteinander verglichen.

Das Kapitel 4 bildet den Abschluss der Arbeit und zeigt auf, wie eine As-Built Dokumentation in der Praxis umgesetzt werden kann. Hierfür wird ein beispielhafter Workflow vorgestellt, der die theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 in die praktische Ausführung umsetzt. Neben der Umsetzung wird auch auf die rechtlichen Rahmenbedingungen eingegangen und eine Vielzahl von Anwendungsfällen für eine As-Built Dokumentation dargelegt.

2 Methoden der digitalen Gebäudeerfassung

2.1 Erfassung

In der digitalen Gebäudeerfassung werden heutzutage verschiedene Verfahren zur Aufnahme eingesetzt (Borrmann et al. 2015).

1. Elektronisches Handaufmaß
2. Tachymetrie
3. Photogrammetrie
4. Laserscanning

Auf das elektronische Handaufmaß und die Tachymetrie wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Diese Verfahren sind zur Erfassung einfacher, linearer Geometrien gut geeignet, kommen aber bei komplexeren Körpern mit nicht linearen Flächen schnell an ihre Grenze. Zudem ist das elektronische Handaufmaß aufgrund seiner geringen Genauigkeit zum übergeordneten Referenzsystem für eine As-Built-Dokumentation ungeeignet. (Blankenbach 2016, S. 11)

2.1.1 Photogrammetrie

2.1.1.1 Definition

Die International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) definiert Photogrammetrie wie folgt:

„Photogrammetry is the science and technology of extracting reliable three-dimensional geometric and thematic information, often over time, of objects and scenes from image and range data.“ (ISPRS 2016)

Auch Thomas Luhmann kommt in seinem Standardwerk zu einer ähnlichen Definition:

„Unter Photogrammetrie versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objekts indirekt dessen Form und Lage durch Bildmessungen sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch Bildinterpretation.“ (Luhmann 2018, S. 24)

Photogrammetrie lässt sich anhand der Anzahl der auszuwertenden Bilder in drei Verfahren einteilen: *Einbildphotogrammetrie*, *Stereophotogrammetrie*, *Mehrbildphotogrammetrie* (Luhmann 2018), die im Folgenden zusammenfassend dargestellt werden sollen.

Einbildphotogrammetrie

Die Einbildphotogrammetrie nutzt ein einziges (digitales) Bild, um ein Objekt darzustellen und zu vermessen. Für die Auswertung muss das Bild bearbeitet werden, da es aufnahmebedingt eine projektive Verzerrung aufweist. Diese Bildumrechnung findet mithilfe von mindestens 4, geodätisch bestimmten, Passpunkten statt. Hierbei wird die Parallelität der Objektkanten wiederhergestellt. (Borrmann et al. 2015)

Die Vermessung anhand eines einzigen Bildes eignet sich prinzipiell nur für 2D-Objekte, deren Geometrie vorher bekannt ist, wie z.B. eine ebene Hausfassade. Eine Ausnahme bilden abwickelbare Regelflächen (Zylinder, o.ä.) deren Größe und Lage vorher geodätisch bestimmt wurde. (Wiedemann 2004)

Stereophotogrammetrie

Hierbei wird mittels zweier Aufnahmen in Normalfallanordnung bei der Auswertung ein räumliches Bild erzeugt. Normalfallanordnung bedeutet, dass die Aufnahmerichtungen parallel und senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Projektionszentren (Kamera) sind. Dies simuliert das menschliche Sehen und befähigt den Auswerter das Objekt räumlich zu betrachten und mithilfe einer Messmarke zu vermessen. (Wiedemann 2004)

Die Auswertung erfolgt heutzutage mithilfe von Shutter-Brillen, die – ähnlich wie bei der 3D-Technik für Fernseher – die Bilder mit einer Frequenz von etwa 100Hz abwechselnd auf dem Bildschirm anzeigen und jeweils das rechte oder linke Brillenglas durchlässig machen. Durch diese Art der Auswertung ist es möglich selbst konturlose Objekte zu vermessen.

Jedoch sind die Kosten bei dieser Methode sehr hoch, da qualifiziertes Personal und teure Ausrüstung benötigt werden. Daher spielt diese Methode in der modernen Bauwerksvermessung kaum eine Rolle. (Borrmann et al. 2015)

Mehrbildphotogrammetrie

In der Mehrbildphotogrammetrie werden mehrere Bilder aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Jeder, zu messende, Punkt muss dabei in 2 oder mehr Bildern erfasst werden, um eine exakte 3D – Koordinatenbestimmung durchzuführen. Dies wird durch eine Überlappung der Bilder um 30 – 90 % erreicht (s. Abbildung 1). Die Objektkoordinaten werden über Verfahren der Mehrbildtriangulation bestimmt. Diese Koordinaten werden anschließend verwendet, um ein Drahtmodell zu erstellen. (Blankenbach 2016)

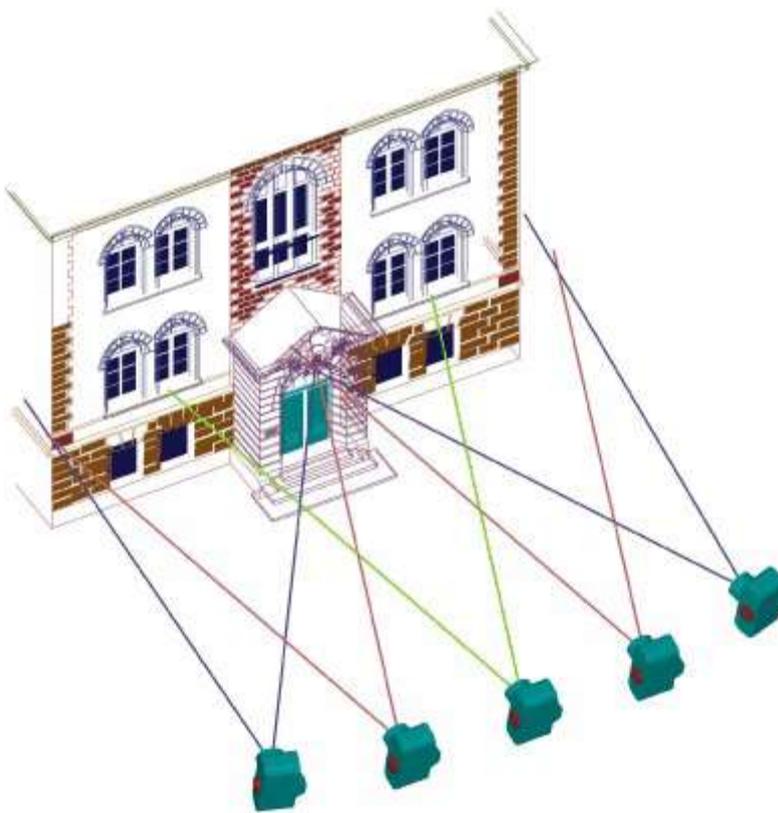


Abbildung 1: Bildverband für die Mehrbildauswertung (Bormann et al. 2015, S. 353)

In den nachfolgenden Kapiteln wird genauer auf die Mehrbildphotogrammetrie eingegangen, da diese Methode, durch die unbegrenzte Anzahl verarbeitbarer Fotos, für die As – Built Dokumentation mittels Photogrammetrie am besten geeignet ist.

2.1.1.2 Aufnahme

Die Aufnahme photogrammetrischer Bilder erfordert heutzutage kein spezialisiertes Equipment mehr. Durch eine Verbesserung der Verfahren zur Bildanalyse ist es mög-

lich Bilder jeder Art von Kamera (z.B. Kompakt-, System-, Handykamera) zu verwenden. Die Qualität des daraus resultierenden Modells hängt aber stark von der Auflösung der Fotos ab, weshalb sich eine Systemkamera mit Vollformatsensor empfiehlt. (Hofstadler et al. 2019, S. 816)

Neben der klassischen Aufnahme vom Boden aus, ist es auch möglich mittels UAV-Photogrammetrie Bilder zu gewinnen. Dabei umfliegt ein UAV, meist eine Drohne mit installierter Kamera (s. Abbildung 2), das Objekt bzw. Gebäude und macht von allen Seiten Fotos. Daraus wird ein Bildverband gewonnen, der dann ausgewertet werden kann. Der Vorteil hierbei ist, dass große Objekte kostengünstig und vollständig erfasst werden können (Blankenbach 2016).



Abbildung 2: Multikopter mit Kamera (Blankenbach 2016)

Die Mehrbildphotogrammetrie hat, verglichen mit den anderen Verfahren, die geringsten Anforderungen an Aufnahmestandort und -richtung. Diese sind völlig beliebig wählbar. Durch Verdeckungen oder gleichzeitige Innen- und Außenaufnahmen wird es nötig eine Vielzahl von Aufnahmen zu erstellen, um alles korrekt abzubilden. Daher ist die Mehrbildanordnung der Standardfall in der Nahbereichsphotogrammetrie, da diese Technik mit einer theoretisch unbegrenzten Anzahl von Bildern arbeiten kann. (Luhmann 2018)

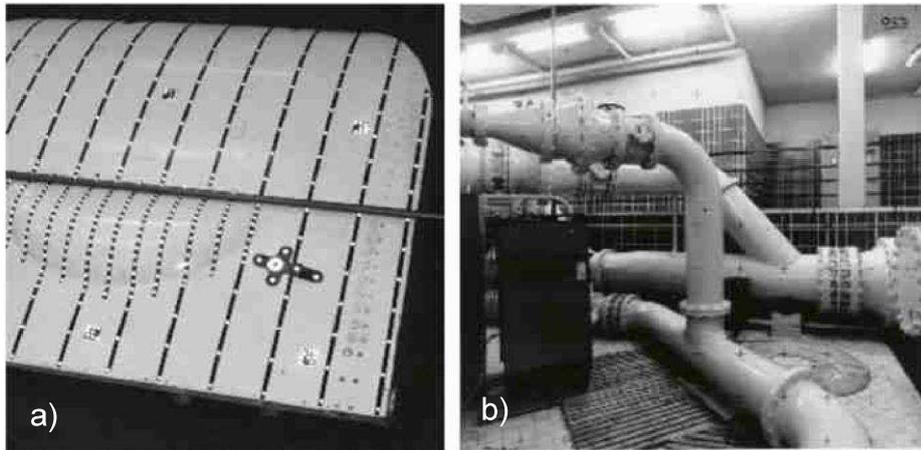


Abbildung 3: Signalisierte (a) und nicht signalisierte (b) Bilder (Luhmann et al. 2020)

Für die spätere Auswertung ist es wichtig vorher festzulegen, welches Verfahren verwendet werden soll. Dies geschieht hauptsächlich in Abhängigkeit der geforderten Genauigkeit und Größe des Objekts. Hierzu wird in signalisierte und nicht signalisierte Bildverbände unterschieden (s. Abbildung 3). In der Erstellung von As-Built Modellen werden hauptsächlich nicht signalisierte Bilder verwendet, die in Verbindung mit einer geeigneten Software zur Auswertung eine ausreichende Genauigkeit erreichen.

Während sich früher nur signalisierte Bildverbände automatisch auswerten ließen, ist es heute durch die Fortschritte im Bereich der Computer Vision möglich, auch nicht signalisierte Bildverbände automatisch auszuwerten. Hierbei ist vor allem das Structure-from-Motion – Verfahren von Bedeutung (Kap. 2.1.1.3). (Luhmann 2018)

2.1.1.3 Auswertung

Signalisierte Bildverbände nutzen für die äußere Orientierung und Bestimmung der 3D-Objektkoordinaten der Bilder die angebrachten Zielmarken (s. Abbildung 3) (Luhmann 2018).

Nicht signalisierte Bildverbände nutzen unter anderem das SfM-Verfahren (s. Abbildung 4), auf das im Folgenden genauer eingegangen wird.

Structure-from-Motion bedeutet, dass aus der Bewegung mit einer Kamera (Motion) ein Objekt dreidimensional rekonstruiert (Structure) wird (Luhmann 2018, S. 491). Dies geschieht durch eine Kombination von photogrammetrischen Algorithmen. Diese sind Merkmalspunktdetektion und -extraktion, Zuordnung homologer Punktpaare, relative Orientierung von Bildpaaren, robuste Schätzer zur Ausreißerdetektion und Bündelblockausgleichung (TU Dresden 2020).

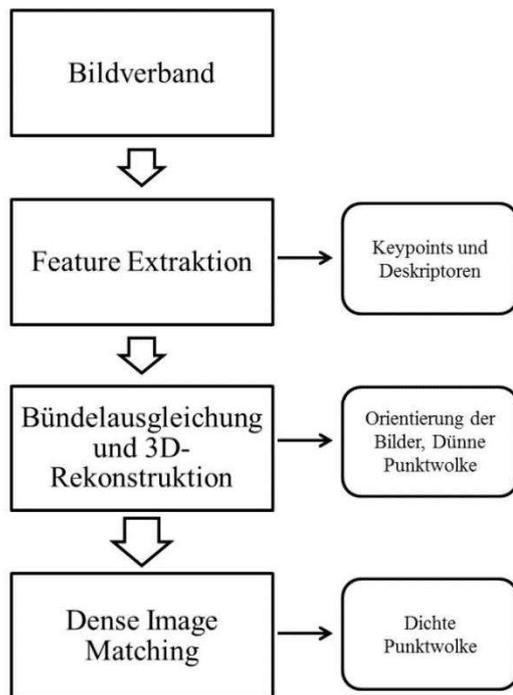


Abbildung 4: Allgemeiner Ablauf von Structure from Motion (Loges 2016)

Die **Merkmalspunktdetektion und -extraktion** erfolgt üblicherweise mit dem SIFT – Operator. Daneben gibt es noch verschiedene andere Operatoren, wie Förstner, SUSAN oder FAST. Für eine genauere Erläuterung wird auf die Fachliteratur verwiesen (Luhmann et al. 2020).

SIFT steht für *scale invariant feature transformation* und beschreibt die skalierungsunabhängige Bestimmung markanter Punkte. Die so bestimmten Punkte sind invariant gegenüber Koordinatentransformationen (Lowe 2000). Das Verfahren lässt sich in 4 Schritte einteilen (Luhmann 2018):

1. Bestimmung von Kanten in Bildpyramiden und deren Extrema
2. Lokalisierung von Merkmalspunkten
3. Bestimmung der Hauptrichtungen der Gradienten
4. Ableitung des Deskriptors

Die so berechneten Merkmalswerte werden dann mit den Merkmalswerten anderer Bilder verglichen (Matching) und bilden so **homologe Punktpaare**.

Im nächsten Schritt wird die relative **Orientierung der Bildpaare** vorgenommen. Dies beschreibt die räumliche Translation und Rotation eines Bildes zu seine Bildpartner. Im SfM-Verfahren geschieht dies z.B. mithilfe des RANSAC-Algorithmus, der Ausreißer bei den Punkten und grobe Fehler eliminiert. Je nach Datensatz können diese

Ausreißer etwa 80% der Daten betragen (Luhmann 2018) und so das Ergebnis verfälschen bzw. eine inkorrekte Punktwolke erzeugen.

Nach der Orientierung eines Bildpaares werden Schritt für Schritt alle anderen Bilder hinzuorientiert. Abschließend werden alle Bilder in einer gemeinsamen **Bündelausgleichung** orientiert. Zusätzlich zur Orientierung der Bilder wird auch die Kamerakalibrierung bestimmt (Luhmann et al. 2020). Diese beinhaltet die innere Orientierung (z.B. Brennweite, Lage des Bildhauptpunkts) und die äußere Orientierung (Lage der Kamera) (Heipke 2017).

Die so ermittelten Objektkoordinaten bilden bereits eine dünne Punktwolke, die durch Multi-View Stereo (Luhmann 2018) verdichtet und zu einem Oberflächenmodell fusioniert werden kann.

Die Genauigkeit des SfM-Verfahrens ist stark abhängig von der Oberflächentextur, der Bildüberdeckung und der verwendeten Kamera. Durch die verwendeten Algorithmen (SIFT) liegt die erreichbare Genauigkeit bei 0.5 – 2 Pixel. Für Architektur- und Ingenieur Anwendungen liegt die absolute Genauigkeit im Zentimeterbereich, bedingt durch die Größe der betrachteten Objekte (Luhmann 2018).

2.1.2 Laserscanning

Laserscanning ist, ebenso wie Photogrammetrie, ein berührungsloses Messverfahren zur Erfassung von Oberflächen. Dabei können, je nach verwendetem Verfahren zur Distanzmessung, eine sehr hohe Anzahl von Punkten pro Sekunde erfasst werden. Dies erlaubt eine schnelle und kostengünstige Erfassung komplexer Geometrien, wie sie z.B. im Anlagenbau zu finden sind. Für einfache Strukturen ist das Verfahren oft zu aufwendig, da sehr große Datenmengen anfallen, deren relevante geometrische Information nicht im Verhältnis steht (Blankenbach 2016).

Ursprünglich wurden Laserscanner für den Einsatz in Flugzeugen entwickelt, um digitale Geländemodelle zu erfassen. Durch die stetige Weiterentwicklung haben Laserscanner heute zahlreiche Anwendungsbereiche, wie z.B. die Erfassung von Innenräumen (Luhmann 2018). Aufgrund der geringen Relevanz für die digitale Gebäudeerfassung wird das Airborne Laserscanning (ALS) in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Mehr Informationen sind in der einschlägigen Literatur zu finden (z.B. (Freedon und Rummel 2019).

Das Vorgehen beim Laserscanning lässt sich in 2 Schritte einteilen:

- Aufnahme (Scan)
- Registrierung

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die grundlegende Technik eingegangen, welche Laserscanning zugrunde liegt.

2.1.2.1 Aufnahme

Auf dem Markt existiert eine Vielzahl von Laserscannern, die sich hinsichtlich ihrer Technik und Einsatzgebiete unterscheiden. Grundlegend unterscheidet man im TLS zwischen Camera-View-Scannern und Panorama-View-Scannern. Camera-View-Scanner erlauben es lediglich einen bestimmten Sektor einer Halbkugel zu erfassen, da diese nur um eine Achse rotieren, wohingegen Panorama-View-Scanner sich um 2 Achsen drehen und so eine Rundum-Erfassung erlauben (Luhmann 2018, S. 549).

Der grundlegende Aufbau eines Laserscanners ist in Abbildung 5 dargestellt. Von einer Laserdiode wird ein Strahl ausgesendet und trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Dieser Strahl besteht aus nicht sichtbarem Licht, welches das menschliche Auge nicht schädigt und daher kann die emittierte Energie um ein Vielfaches (bis zu 10^6) höher sein (Jutzi et al. 2016). In Abhängigkeit der Messtechnik (Laufzeit- / Phasendifferenzmessung) wird die elektromagnetische Strahlung entsprechend moduliert und dann über einen zweiten Spiegel abgelenkt. Dieser zweite Spiegel dreht sich kontinuierlich um die horizontale und vertikale Achse und ermöglicht so eine durchgehende Messung von Punkten. Bei Panorama-View-Scannern erfolgt zusätzlich eine Rotation um die Stehachse, um eine 360° - Punktwolke zu erhalten (Luhmann 2018). Dies erlaubt es mit wenigen Aufstellungen ein Objekt vollständig zu erfassen.

Das vom Objekt reflektierte Signal ermöglicht eine Messung der Distanz zum Objekt. Dieser Wert bildet zusammen mit dem horizontalen und vertikalen Winkel eine 3D – Polarkoordinate. Für die Streckenmessung werden grundsätzlich 2 Verfahren unterschieden: Phasenvergleichsverfahren und Impulslaufzeitverfahren.

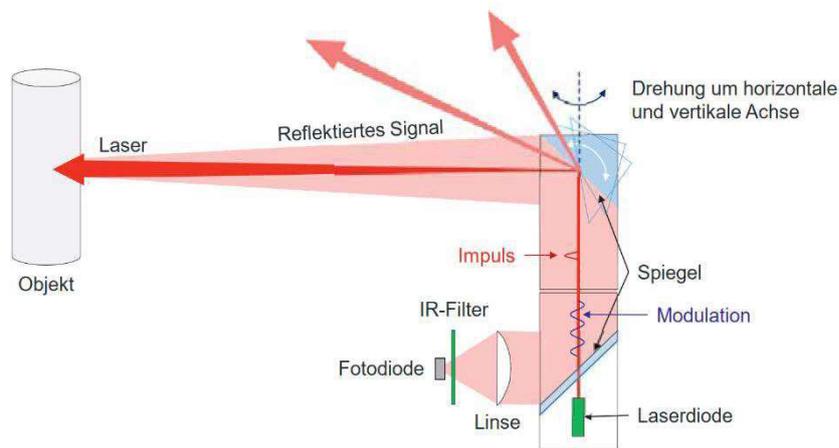


Abbildung 5: Prinzip eines Laserscanners (Luhmann 2018)

Beim **Phasenvergleichsverfahren** oder auch Phasendifferenzmessung wird die Dauerstrich – Modulation verwendet. Dabei wird kontinuierlich elektromagnetische Strahlung emittiert, die in Abhängigkeit von der Zeit, entweder in ihrer Amplitude oder Frequenz verändert wird. Dies ermöglicht der Messtechnik, über den Vergleich der Phasen, die verbrauchte Zeit zwischen Aussenden und Empfangen zu bestimmen. Dadurch kann anschließend auf die zurückgelegte Distanz geschlossen werden. (Jutzi et al. 2016)

Diese Art der Messung erlaubt eine sehr hohe Scanrate mit bis zu einer Million Punkten pro Sekunde. Allerdings ist die Reichweite auf ca. 130m begrenzt, was aber für eine As-Built Dokumentation von Innenräumen ausreichend ist. Die erreichbare Reichweitengenauigkeit liegt bei $1\text{mm} + 10\text{ ppm/m}$ und die Winkelgenauigkeit bei $\pm 0.004^\circ$. Für z.B. den RTC360 von Leica ergibt sich so eine 3D – Punktgenauigkeit von 5,3mm auf 40m Entfernung. (Leica Geosystems AG 2020b)

Das **Impulslaufzeitverfahren** misst die Laufzeit eines einzelnen Impulses und ermittelt so die Distanz. Dazu wird mittels Puls-Modulation ein möglichst kurzer (2-10ns) Impuls mit hoher Energie ausgesendet und vom Objekt reflektiert (Jutzi et al. 2016). Da hier kein konstanter Strahl ausgesendet wird, wie beim Phasenvergleichsverfahren, sondern eine Kette von Einzelimpulsen, liegt die maximale Anzahl der Messpunkte pro Sekunde etwa 220.000. Die maximale Entfernung ist abhängig von der Pulswiederholrate und beträgt beim TLS bis zu 6000m (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2020).

Unabhängig von der verwendeten Messtechnik, reflektiert jede Oberfläche die elektromagnetische Strahlung unterschiedlich stark und lässt so, über die Intensität des zurückkommenden Signals, auf verschiedene Materialien schließen. Das Ergebnis dieser Information wird in Intensitätsbildern dargestellt (s. Abbildung 6).

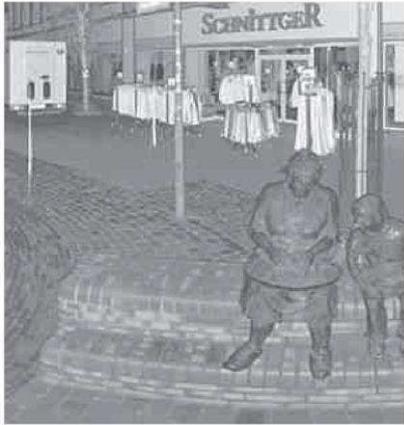


Abbildung 6: Intensitätsbild (Luhmann 2018)

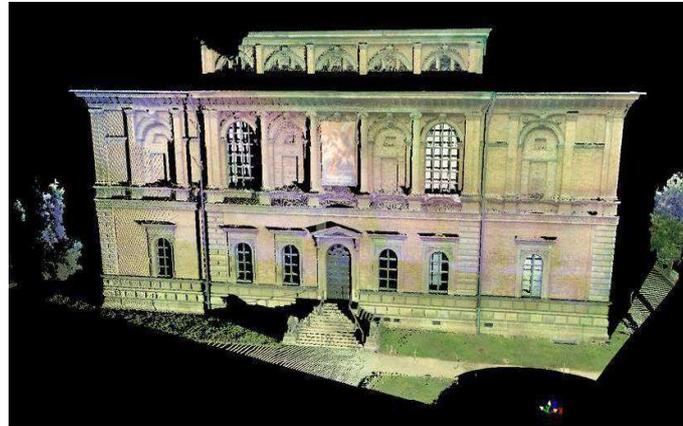


Abbildung 7: Überlagerung mit Farbinfos aus einer Digitalkamera (Ingenieur fakultät BGU 2020)

Zusätzlich erlauben es moderne Laserscanner gleichzeitig Bilder aufzunehmen (Leica Geosystems AG 2020b) und die Intensitätsbilder mit den daraus extrahierten Farbinformationen zu überlagern. Ein Resultat davon zeigt Abbildung 7, in der das 3D-Abbild aus Laserscans mit Aufnahmen einer Digitalkamera kombiniert wurde.

2.1.2.2 Registrierung

Die Aufnahme eines Objektes bzw. eines Gebäudes erfordert oft mehrere Scans von verschiedenen Standorten aus, um Verschattungen, also Bereiche ohne Daten, zu verhindern. Diese Punktwolken müssen in der Weiterverarbeitung zusammengeführt werden, um ein einzelnes vollständiges 3D-Modell zu erhalten.

Diese Zusammenführung wird als Registrierung bezeichnet. Dabei werden die Punktwolken, vergleichbar mit dem Vorgehen in der Photogrammetrie, entweder über homologe Punkte oder die Punktwolke als Ganzes (ICP-Algorithmus) orientiert.

Die Orientierung über **homologe Punkte** erfolgt mithilfe von Zielmarken, die künstlich eingebracht werden. Es haben sich hier verschiedene Formen bzw. Muster, wie z.B. Kugeln, retroreflektive Zielmarken oder planare Hell-Dunkel-Muster bewährt. Kugeln haben den Vorteil, dass sie nicht auf den Scanner ausgerichtet werden müssen und es so ermöglichen, bei bekanntem Kugelradius, den Kugelmittelpunkt zu bestimmen

und die Punktwolke dann mithilfe dieser bekannten Punkte zu orientieren. Retroreflektive Zielmarken werfen fast die gesamte Strahlung wieder zurück und erscheinen auf einem Intensitätsbild als sehr helle Punkte. Dadurch können diese Marken vollautomatisch gefunden werden. Planare Hell-Dunkel-Muster sind eine sehr einfache Form der Zielmarke, die sich meist aus einem geviertelten Kreis mit abwechselnd hellen und dunklen Vierteln zusammensetzt (Pfeifer et al. 2016). Sind diese Zielmarken bereits in einem übergeordneten Koordinatensystem bekannt, so lässt sich auch gleichzeitig eine Georeferenzierung vornehmen (Schwarz 2017, S. 184).

Eine andere Möglichkeit für homologe Punkte sind natürliche Verknüpfungspunkte, wie z.B. Ecken oder Kanten. Hierbei werden in den Scans markante Punkte ermittelt und eine Liste mit Merkmalen erstellt. Der anschließende Vergleich dieser Listen liefert homologe Punktpaare, anhand derer die relative Orientierung der Scans vorgenommen werden kann. Ein Verfahren nach Böhm et al. (Böhm und Becker 2007) nutzt hierfür z.B. den aus der Photogrammetrie bekannten SIFT-Operator (s. Kap. 2.1.1.3) und RANSAC-Algorithmus und extrahiert aus den Intensitätsbildern homologe Punkte. (Pfeifer et al. 2016)

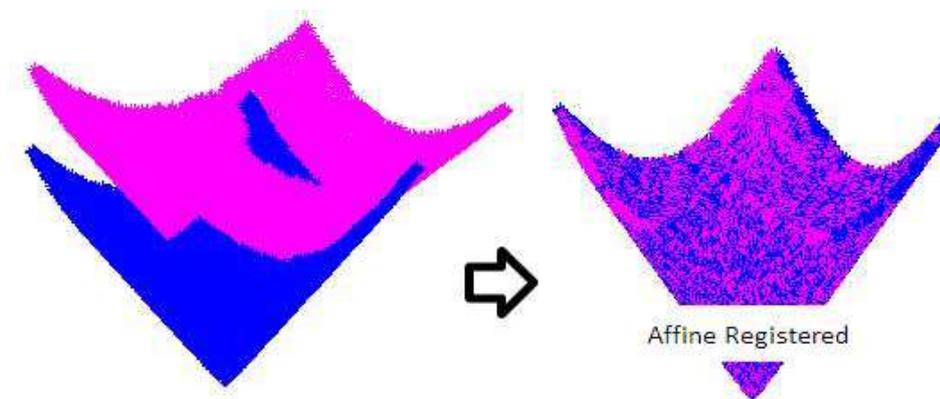


Abbildung 8: Iterative Closest Point – Algorithmus (Kroon 2020)

Für die Ermittlung von homologen Punktpaaren werden immer nur Ausschnitte verwendet, um den gesamten Scan zu orientieren. Dies kann in Bereichen ohne Verknüpfungspunkte zu teils großen Abweichungen führen. Der Ansatz des **Iterative Closest Point** (ICP) nutzt daher den ganzen Scan für eine Orientierung. Hierfür wird ein Scan fixiert und der zweite Scan, dessen relative Ausrichtung zum ersten Scan näherungsweise bekannt ist, ist in seiner Position variabel. Nun wird für jeden Punkt im fixierten Scan der nächstliegende (closest) Punkt im anderen Scan gesucht. Dieser Schritt wird

solange wiederholt (s. Abbildung 8), bis ein festgelegtes Konvergenzkriterium erreicht wird. (Pfeifer et al. 2016)

Nach dem gleichen Schema können anschließend weitere Scans hinzuorientiert werden und so eine vollständige Punktwolke erstellt werden.

Aktuelle Messsystem-Anbieter (z.B. Leica) bieten die Möglichkeit einer Vorregistrierung im Feld. Dabei wird während des Umsetzens des Scanners die Umgebung über Kameras getrackt (s. Abbildung 9) und so die relative Orientierung der einzelnen Scans direkt bestimmt werden kann. Dies hat den Vorteil, dass die Scans im Vorfeld überprüft werden können und zusätzliche Detailfotos direkt mit Punkten aus dem Scan verknüpft werden können. (Leica Geosystems AG 2020b)



Abbildung 9: Umgebungstracking für die automatische Vorregistrierung (Leica Geosystems AG 2020a)

2.2 Auswertung von Punktwolken

2.2.1 Segmentierung

Die erzeugten Punktwolken müssen, bevor sie als 3D-Modell zur Verfügung stehen, weiterverarbeitet werden, da die Punkte noch nicht in Bauteile oder Objekte gruppiert wurden und so kein direkter Bezug zwischen ihnen vorliegt. Bei der Weiterverarbeitung gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder man modelliert mithilfe der Punktwolke das aufgenommene Objekt bzw. Gebäude manuell oder dieser Vorgang geschieht teilautomatisch mithilfe von Algorithmen. Beim manuellen Modellieren werden alle relevanten Objekte, wie z.B. Wände, Decken oder Dächer, mithilfe eines CAD-Programms nachgezeichnet. Meist geschieht das über ein spezialisiertes Plug-In innerhalb der Planungssoftware, z.B. PointCab (PointCab GmbH 2020b). Hierbei werden die Koordinaten aus der Punktwolke genutzt, um das Gebäude mit exakten Maßen nachzubilden (s. Abbildung 10). Dieser Vorgang ist allgemein sehr aufwendig, was dazu führt, dass es für größere Umfänge kaum sinnvoll genutzt werden kann.

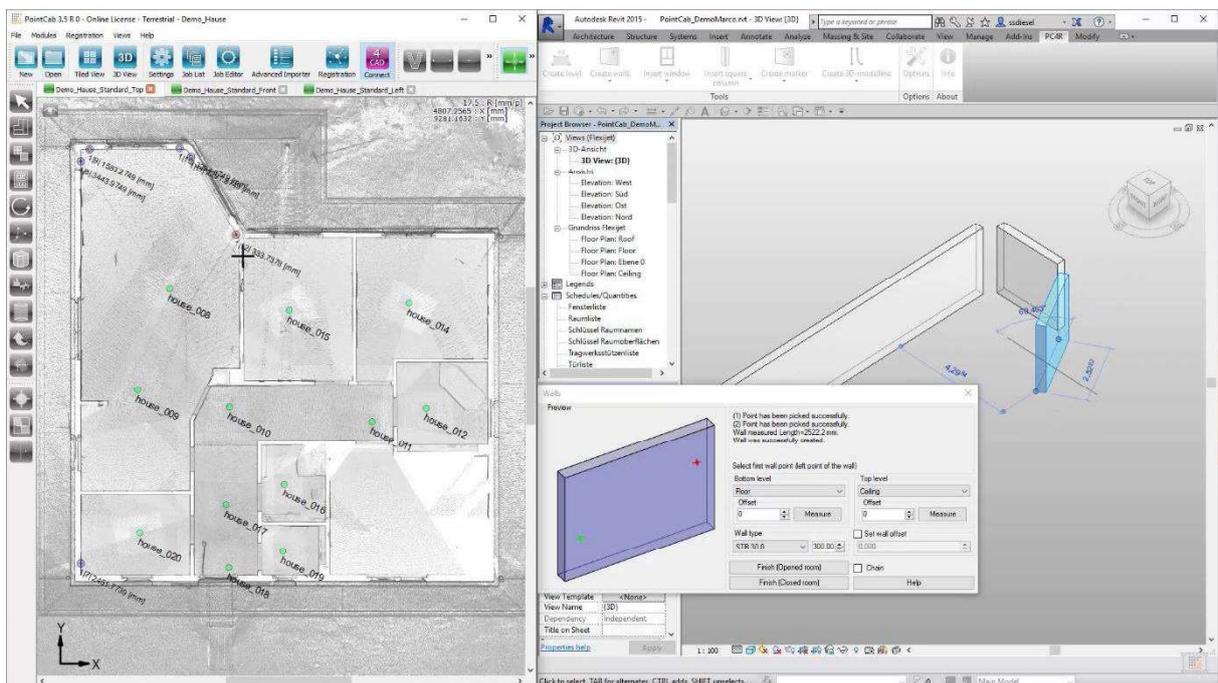


Abbildung 10: Manuelle 3D-Modellierung in PointCab (PointCab GmbH 2020a)

Aus diesem Grund werden Ansätze entwickelt diesen Prozess zu automatisieren, um weitestgehend ohne Eingreifen Strukturen zu erkennen. Dieses Verfahren wird Segmentierung genannt und beschreibt die Gruppierung von gleichartigen Punkten mittels eines Homogenitätskriteriums (Pöchtrager 2017). Die Segmentierung von Punktwol-

ken kann in 2 Bereiche eingeteilt werden: Geometrie-basierte und Attribut-basierte Methoden (Xu 2019). Da die Weiterentwicklung von Algorithmen zur Segmentierung aktuell Bestandteil vieler Forschungen ist und es stetig neue Entwicklungen gibt, beschränkt sich diese Arbeit auf eine Beschreibung der grundlegenden Vorgehensweisen.

Attribut-basierte Methoden nutzen die Intensitäts- oder Farbinformationen aus den Scans, um Punkte mit ähnlichen Attributen zu gruppieren. Dieser Ansatz birgt aber eine hohe Fehleranfälligkeit, da diese beiden Informationen durch wechselnde Lichtverhältnisse oder ähnliche Materialien zu unsicher sind. Im Folgenden werden daher Geometrie-basierte Methoden behandelt. (Xu 2019)

Vo et al. unterteilt die Methoden zur Geometrie-basierten Segmentierung folgendermaßen: *Model fitting-based methods*, *Region growing-based methods* und *Clustering feature-based methods* (Vo et al. 2015).

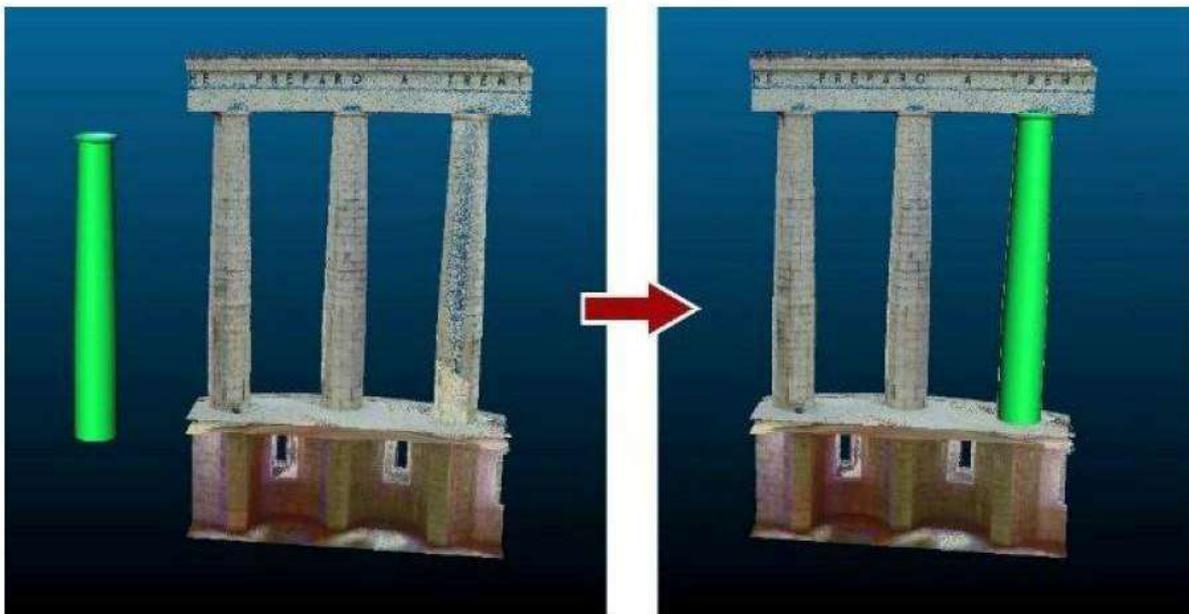


Abbildung 11: Segmentierung von 3D-Punktwolken durch model fitting von geometrischen Grundformen (Grilli et al. 2017)

Model fitting-based methods nutzen die Tatsache aus, dass viele Objekte auf einfachen geometrischen Formen basieren, wie z.B. Ebenen, Zylinder und Kugeln (s. Abbildung 11). Zwei bekannte Algorithmen sind die Hough Transformation (Ballard 1981) und der RANSAC-Algorithmus (Fischler und Bolles 1981). Die Hough Transformation erkennt diese Formen über Kantenerkennung in Gradientenbildern und bildet so geometrische Formen. RANSAC wird hier genutzt, um aus einer Punktwolke diejenigen

Punkte zu extrahieren, die am besten zu einer geometrischen Grundform passen. Dies geschieht, indem der Algorithmus eine Form immer wieder in die Punktwolke legt und die Position ermittelt, an der am meisten Punkte mit der Form übereinstimmen. Ein Vorteil hierbei ist, dass dieses Verfahren sehr robust gegenüber Ausreißern in den Punkten ist. Dieser Algorithmus wurde seit seiner Veröffentlichung mehrfach angepasst und optimiert (Schnabel et al. 2007; D. Chen et al. 2014). Nachteile dieser beiden Algorithmen sind jedoch, dass die Qualität der Segmentierung stark von den Charakteristika der Punktwolke (Dichte, Positionsgenauigkeit, Rauschen) abhängt und die Performance bei großen Datensätzen oder komplexen Geometrien sehr schlecht ist (Vo et al. 2015). (Xu 2019)

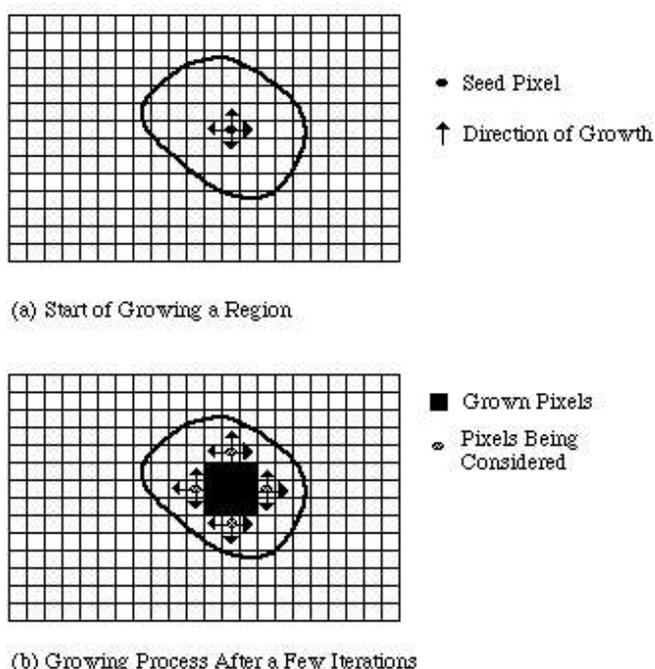


Abbildung 12: Region growing – Algorithmus (Dave Marshall 1997)

Region growing-based methods basieren auf dem region growing-Algorithmus. Bei diesem wird ein Startpunkt (seed) innerhalb einer Punktwolke gewählt und dann in einem iterativen Prozess alle umliegenden Punkte anhand eines festgelegten Kriteriums geprüft (s. Abbildung 12). Wird dieses Kriterium erfüllt, so ist dieser Punkt homogen zum Startpunkt und gehört so zum gleichen Segment. Erst wenn in der Nachbarschaft des Startpunktes keine Punkte mehr vorhanden sind, die das Kriterium erfüllen, wird ein neues Segment mit einem neuen Startpunkt begonnen. Auf diese Weise wird die Punktwolke schrittweise segmentiert. Der Erfolg bzw. die Qualität dieses Algorithmus hängt stark von der Wahl der Startpunkte und des Kriteriums ab. Zudem wird für die Segmentierung von 3D-Punktwolken viel Rechenzeit benötigt. Aber auch hier gibt

es verschiedene Erweiterungen und Verbesserungen z.B. durch einen Split-and-Merge – Ansatz, um eine Parallelisierung zu ermöglichen und die Gesamtlaufzeit so zu senken (Pöchtrager 2017). (Vo et al. 2015)

Clustering feature-based methods ähneln dem *region growing – Algorithmus*, indem sie Punkte, entweder über ihre Nähe oder Ähnlichkeit mittels verschiedener Kriterien, in Verbindung setzen. Punkte, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten, werden verbunden und die Menge dieser Punkte wird zu einem Cluster zusammengefügt. Im Gegensatz zum *region growing* werden aber keine Startpunkte oder Regionen benötigt. Auch hier gibt es, wie beim *region growing* verschiedene Ansätze für die Auswahl dieser Kriterien, z.B. Euklidische Distanz (A. Aldoma et al. 2012) oder der Normalenvektor (Vo et al. 2015), um eine zuverlässige Segmentierung zu erreichen. Diese Methode ist stark von der Wahl und Zuverlässigkeit der gewählten Kriterien für die Gruppierung in Clustern abhängig. So steigert die Verwendung von mehreren Kriterien die Qualität der Segmentierung, benötigt aber auch mehr Rechenkapazität. (Xu 2019)

2.2.2 Vermaschung/Modellierung

Um aus einer segmentierten Punktwolke ein 3D-Modell zu erstellen, ist es nötig die gruppierten Punkte mittels Dreiecksvermaschung zu einem Oberflächenmodell zu transformieren oder teilautomatisch objektorientiert zu modellieren.

Kersten et al. unterscheidet hier in „*die 2,5D- und die 3D-Triangulation. Für eine 2,5D-Vermaschung wird eine Projektionsoberfläche (z.B. Ebene, Kugel oder Zylinder) benötigt, die dem Objekt in grober Form ähnelt. Komplexere Oberflächen, die sich nicht durch Regelgeometrien annähern lassen, können durch eine 3D-Triangulation modelliert werden.*“ (Kersten et al. 2008, S. 17)

Bei der Dreiecksvermaschung werden die segmentierten Punkte durch Dreiecke zu einem Oberflächenmodell verbunden. Ein bekannter Algorithmus hierfür ist die Delaunay-Triangulation, bei der die Punkte so vernetzt werden, „*dass innerhalb des Umkreises des Dreiecks keine weiteren Punkte enthalten sind*“ (Borrmann 2019). Dadurch wird ein Modell mit gleichmäßigen Dreiecken erzeugt (s. Abbildung 13).

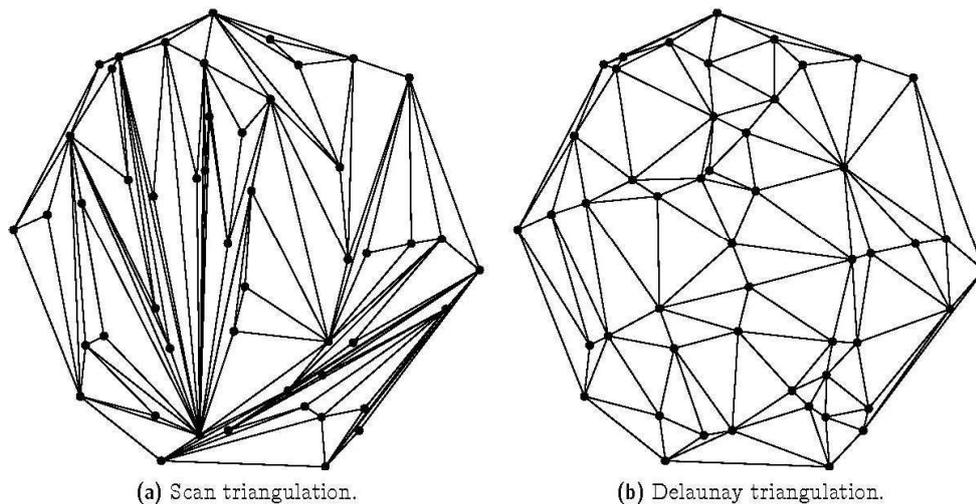


Abbildung 13: Delaunay Triangulation (ETH Zürich)

Neben der Erzeugung eines reinen Oberflächenmodells, ist es aber auch möglich aus der Punktwolke ein semantisches (BIM) Modell abzuleiten. In der Theorie erkennt eine Software alle dargestellten Objekte und setzt sie zueinander in Verbindung (z.B. Tür in Wand). Diese automatische Modellierung ist in der Praxis aber (noch) nicht vollständig umgesetzt, da vor allem in großen Punktwolken eine Vielzahl unterschiedlicher Objekte vorhanden sind, die erkannt und zugeordnet werden müssen (Patraucean et al. 2014). Die stetige Weiterentwicklung und Forschung in diesem Bereich führen aber dazu, dass Ansätze für eine automatische Modellierung durch Kombination verschiedener Techniken vorhanden sind (Adán et al. 2020).

Die Erstellung eines As-Built Modells wird erleichtert, falls ein sogenanntes As-Planned Modell vorhanden ist, also die Planung bereits mit einem 3D-Modell erfolgt ist. In diesem Fall kann das bereits vorhandene Abbild des Gebäudes als Leitfaden für die Modellierung eines As-Built Modells genutzt werden und erlaubt zusätzlich einen Abgleich der Ausführung mit der Planung (s. Kap. 4.4.2).

2.3 Visualisierung

Als letzter Schritt in der Verarbeitung von Punktwolken erfolgt die Visualisierung. Hier bieten die Hersteller oft eigene Viewer wie Leica TruView (Leica 2020c) oder FARO Scene (FARO 2018). Diese Viewer ermöglichen es das Modell für Präsentationen, Visualisierungen oder zur Dokumentation z.B. durch direktes Messen im Modell, zu nutzen (s. Abbildung 14).

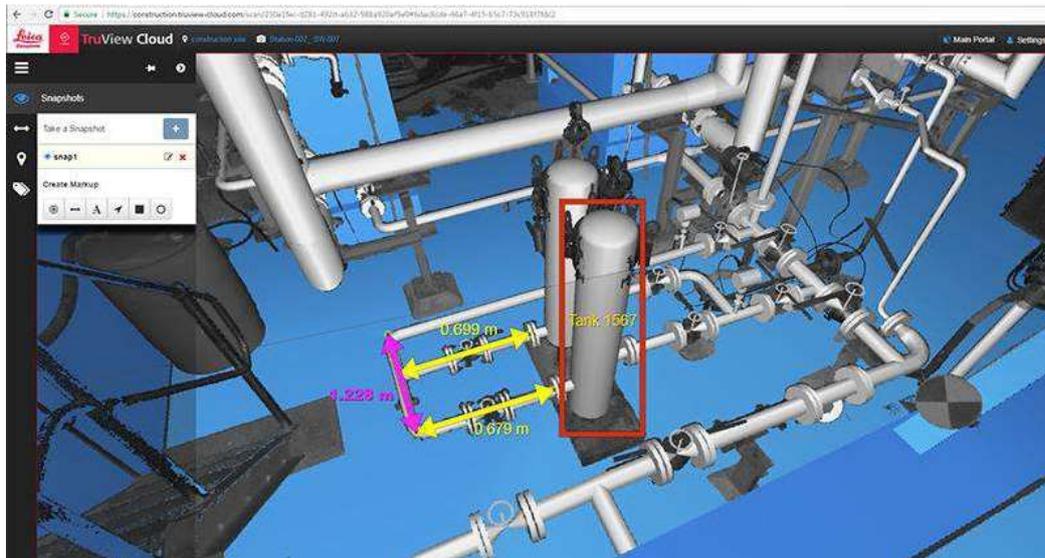


Abbildung 14: Oberfläche von Leica TruView (Leica 2020c)

Um ein noch realistischeres Modell zu erhalten, besteht die Möglichkeit das 3D-Modell zu texturieren. Dabei werden die Daten aus der Punktwolke mit Farbinformationen aus Bildern überlagert und so ein photorealistisch texturiertes Modell zu generieren. (Kersten et al. 2008)

2.4 Vergleich von Photogrammetrie und Laserscanning

Zum Abschluss dieses Kapitels sollen die Photogrammetrie und das Laserscannings miteinander verglichen werden und mögliche Synergien der beiden Verfahren aufgezeigt werden.

Wie in Kap. 2.1 erläutert, unterscheiden sich die beiden Verfahren z.B. in der Genauigkeit, der Aufnahmegeschwindigkeit oder dem Aufwand bei der Messung. So haben Laserscanner den Vorteil, dass sie sehr viele Punkte in kurzer Zeit, vor allem unter Verwendung des Phasenvergleichsverfahrens, aufnehmen können. Diese Punkte müssen anders als in der Photogrammetrie nicht erst aufwendig extrahiert werden, sondern stehen direkt als 3D-Koordinaten zur Verfügung. Dieser schnellen Erfassung und direkten Bereitstellung einer Punktwolke, stehen aber ein 2 – 5facher Zeitaufwand in der Aufnahme gegenüber (Luhmann et al. 2019) und wesentlich höhere instrumentelle Kosten gegenüber. Ein Nachteil von Photogrammetrie ist die fehlende Tiefen Genauigkeit und die starke Abhängigkeit von der Beleuchtung. Durch die Aufnahme von hochauflösenden Bildern erreicht diese aber einen höheren Detaillierungsgrad als das Laserscanning, welches außer den 3D-Koordinaten und der Intensität keine zusätzlichen Informationen bereitstellt.

Daher lohnt es sich eine Kombination der beiden Verfahren über die Zusammenführung der Teilpunktwolken aus TLS und Photogrammetrie zu betrachten, um die Nachteile zu kompensieren und ein möglichst genaues und detailliertes Modell zu erhalten. In Abbildung 15 werden die einzelnen Vor- und Nachteile dargestellt und gezeigt, wie die Verfahren von einer Kombination profitieren können. Luhmann et al. haben in einem Projekt zur Erfassung komplexer Kirchenbauwerke das mögliche Potential untersucht (Luhmann et al. 2019). Dabei wurden Daten aus terrestrischem Laserscanning mit UAV-gestützten photogrammetrischen Aufnahmen kombiniert. Durch eine Drohne konnten Bereiche, die vom TLS nicht erfasst wurden (z.B. das Dach), einfach aufgenommen werden und die so entstandenen Punktwolken aus TLS und Photogrammetrie zusammengeführt werden. (Luhmann et al. 2019)

	Laser-scanning	Photo-grammetrie	Kombinierte Auswertung
Schnelle 3D-Messung ohne Bildzuordnung	+	-	+
Tiefengenaugigkeit weitgehend unabhängig von Entfernung bzw. Schnittwinkel	+	-	+
Automatische Registrierung der Orientierungsparameter	+	-	+
Kurze Aufnahmezeit trotz hoher Auflösung	-	+	+
Hohe Detailgenauigkeit (z.B. Kanten)	-	+	+
Gute Interpretationsmöglichkeit durch natürliche Darstellung (z.B. Semantik)	-	+	+
Entfernungsbereich nahezu unbegrenzt	-	+	+

Abbildung 15: Vergleich der Auswerteverfahren (Blankenbach 2017)

In der Auflistung in Abbildung 15 weist Blankenbach auf die fehlende Interpretationsmöglichkeiten durch natürliche Darstellung im Laserscanning hin. Dies ist per se korrekt, da dort lediglich Intensitätsbilder erzeugt werden, dennoch erfassen moderne Scanner gleichzeitig Panoramafotos. Diese Fotos werden genutzt, um die entstandene Punktwolke mit Farbinformationen zu versehen. Daher ist dieser Punkt in Bezug auf das reine Abtasten von Oberflächen mithilfe eines Laserstrahls korrekt, in Anbetracht der auf dem Markt verfügbaren Lösungen aber nicht mehr aktuell.

3 Vergleich aktueller Produkte auf dem Markt

Auf dem Markt sind für die Punktwolkenverarbeitung eine Vielzahl von Anbietern zu finden. Die Hersteller von Laserscannern (z.B. Leica, Trimble, Faro) bieten oft eigene Software für die Weiterverarbeitung der gewonnenen Daten an. Diese unterscheiden sich in ihrem Funktionsumfang und Anwendungsgebieten. Daher sollen die folgenden Kapitel einen Überblick über die auf dem Markt verfügbaren Lösungen bieten.

3.1 Leica Cyclone & Cloudworx

Leica ist ein Hersteller von verschiedenen Präzisionsmessinstrumenten für die Bauwerksvermessung, unter anderem Laserscanner. Zugleich bieten sie für die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Punktwolken eine Vielzahl von Software-Lösungen an. Darunter auch Leica Cyclone, welches aus mehreren Modulen für die Registrierung, Modellierung und Visualisierung besteht. Das Modul *Leica Cyclone Model* ist als standalone-Lösung verfügbar und ermöglicht die Verarbeitung von registrierten Punktwolken zu Modellen. Dabei unterstützt es den Anwender mit verschiedenen Funktionen, wie einer automatisierten Rohr- und Stahlbaumodellierung oder dem Auto Pipe Finder und Pipe Run Finder. Diese können aber vorhandene Rohre oder Träger nicht vollautomatisch erkennen, sondern benötigen immer die Eingabe des Nutzers, der die Bauteile manuell durch Klicken auswählt. Cyclone Model modelliert dann mithilfe von region growing das ausgewählte Objekt und im Falle von Rohren auch Verbindungen zwischen zwei Geradenstücken. Das fertige Modell kann im Anschluss in gängige CAD-Programme exportiert werden. (Leica 2020b)

Neben dieser standalone-Software bietet Leica auch ein spezielles Plugin für die Modellierung aus Punktwolken innerhalb von z.B. AutoCad, Revit oder MicroStation: Leica CloudWorx. Dieses Plugin erlaubt es die Punktwolke direkt im bevorzugten Modellierungswerkzeug des Benutzers zu bearbeiten. Genauso wie in Cyclone Model, ist es hier möglich Wände, Stützen, Rohre o.ä. teilautomatisch zu modellieren. (Leica 2020a)

Diese teilautomatische Modellierung spart gegenüber der klassischen Modellierung Zeit, da das aufwendige Einfügen von Rohren in die Punktwolke erleichtert wird. Bei großen Datensätzen, mit mehreren tausend Rohren, erfordert diese Methode dennoch viel Handarbeit.

3.2 FARO As-Built

Ein weiterer Hersteller von Laserscannern für die Bauwerksvermessung ist das amerikanische Unternehmen FARO. Es bietet, ähnlich wie Leica, Laserscanner für verschiedene Einsatzbereiche, sowie die dazugehörige Software für die Weiterverarbeitung, an. FARO As-Built (früher FARO PointSense) ist hierbei die Lösung für eine 3D-Modellierung. Das Programm ist als standalone-Version oder Plugin für AutoCAD und Revit verfügbar. Die standalone-Version heißt FARO As-Built Modeler und ermöglicht das halbautomatische Erkennen von Flächen und Zylindern (z.B. Rohre). Hierzu erstellt die Software ein Vektor Map, in der sie vorhandene Linien, z.B. von Wänden, automatisch erkennt. Mithilfe dieser Grenzen kann der Benutzer durch Klicken Wandflächen festlegen. Bereiche, die von Objekten verdeckt werden, müssen aber manuell ergänzt werden. Besonders für große Projekte kann das sehr aufwendig werden. Die Erkennung von Rohren beschränkt sich auf das Erkennen von geraden Rohrstücken, erfolgt aber anders als in Leica Cyclone automatisch durch die Software, ohne Benutzerinteraktion. Die zugehörigen Krümmungen müssen manuell modelliert werden. Das gewonnene Modell kann im Anschluss in eine externe CAD-Anwendung exportiert werden. (FARO 2019a)

Das Plugin für AutoCAD/Revit unterstützt das parametrische Modellieren von Bauteilen und erstellt auf Grundlage der Scandaten Volumenmodelle. Zusätzlich ist es möglich eigene Revit Familien mit benutzerdefinierten Objekten zu erstellen und so spezielle Geometrien einfach im Modell darzustellen. Das Objekt wird hierfür im Scan isoliert und es werden Orthophotos aus 3 Perspektiven (oben, vorne, Seite) erzeugt. Diese maßstabsgetreuen Bilder werden dann im Familien-Editor von Revit auf die gleichen Ebenen ausgerichtet und markante Linien und Formen werden manuell nachgezeichnet. Die erzeugten Teile des Objekts werden extrudiert und mithilfe der 3 Ansichten aus den Orthophotos korrekt angeordnet. Zur Kontrolle kann die Punktwolke überlagert werden und die Abmessungen verifiziert werden. Die Erstellung von Rohrverbindungen wird durch die Standardobjekte in Revit erleichtert, erfolgt aber immer noch halbautomatisch durch Klicken und Auswählen. (FARO 2019b)

Für eine Visualisierung und Erstellung von ebenen Flächen aus der Punktwolke reicht der FARO As-Built Modeler aus, kann aber im Vergleich zum Plugin für Revit o.a. kein semantisches Modell erzeugen. Die Daten können aber aus FARO As-Built Modeler in eine CAD-Anwendung exportiert und dort weiterverarbeitet werden.

3.3 Trimble RealWorks & SketchUp

Trimble Inc. bietet, neben Laserscannern, mit Trimble RealWorks ein Softwarepaket zur Weiterverarbeitung von Punktwolken an. Im Gegensatz zu Leica und FARO wird aber kein Plugin für CAD-Programme angeboten. RealWorks ist ein eigenständiges Tool für die Registrierung, Segmentierung und Modellierung von 3D-Modellen aus Punktwolken. Für die Modellierung bietet es eine Reihe von Werkzeugen, die die Arbeit erleichtern. Dazu gehören eine best-fit Modellierung auf Grundlage von manuell ausgewählten geometrischen Grundformen, wie Zylinder, Kegel, Kugel oder Quader, sowie ein *Easy Pipe Tool*, für eine teilautomatische Rohrmodellierung. Ähnlich wie bei Leica Cyclone und FARO As-Built wird das Rohr manuell ausgewählt und dann der Verlauf, inklusive Krümmungen, automatisch modelliert. Zusätzlich bietet RealWorks besondere Funktionalitäten im Bereich von Tankanlagen zur Modellierung und Auswertung. Für einfache Visualisierungen kann ein Mesh-Modell erstellt werden. (Trimble 2020)

Trimble bietet zusätzlich SketchUp an, eine eigenständige Software zur einfachen Erstellung von 3D-Modellen, die ursprünglich nicht für die Arbeit mit Punktwolken entwickelt wurde. Im Mai 2020 wurde eine Erweiterung für SketchUp eingeführt, die es ermöglicht Punktwolken in das Programm zu importieren und die darin enthaltenen Informationen zu nutzen. Dadurch wird es möglich direkt innerhalb von SketchUp die Punktwolke als Grundlage für präzise Modelle zu verwenden. Die Scandaten dienen hier aber lediglich als Koordinaten für eine manuelle Modellierung und das Programm hat keine Funktion zur Erkennung von z.B. Rohren, was hingegen in RealWorks möglich ist. (SketchUp 2020)

3.4 ClearEdge3D EdgeWise

Im Jahr 2009 wurde die erste Version von EdgeWise veröffentlicht, damals mit dem Fokus auf Gebäude- und Geländemodellierung. Kurz darauf kam auch eine Version für die Gebäudetechnik dazu. EdgeWise sticht vor allem durch seine vollautomatische Rohrmodellierung hervor. Laut ClearEdge3D werden hierbei bis zu 85% der Rohre ohne Benutzer – Interaktion erkannt und im Scan dargestellt (ClearEdge3D 2020a). Agapaki und Brilakis haben in ihrer Arbeit die Software untersucht und sind für die automatische Erkennung von Rohren auf einen Durchschnittswert von 58,1% gekommen, wobei die ermittelten Werte für die Test-Punktwolken zwischen 80,1 und 33,3% lagen. Diesen großen Unterschied erklärten sie durch ein erhöhtes Rauschen in einem

der Datensätze (Agapaki und Brilakis 2018). Die erkannten Stücke können dann mithilfe einer automatischen Vervollständigung miteinander verbunden werden (s. Abbildung 16). Dabei werden auch Bögen ergänzt, T-Kreuzungen oder Flansche müssen von Hand modelliert werden.

Neben der Anwendung für die Gebäudetechnik, kann EdgeWise Wände automatisch modellieren. Dafür werden in einer Punktwolke automatisch Ebenen erkannt, die vom Nutzer bestätigt werden. EdgeWise nutzt diese Ebenen, um den automatisch erkannten Wänden die richtige Höhe zuzuordnen. Der Nutzer kann im Anschluss daran die Wände verbinden oder fehlerhafte Wände anpassen.

In Bauwerken finden sich häufig Strukturen mit gleicher oder ähnlicher Geometrie, wie z.B. Fenster, Türen, Stützen oder Metallträger. EdgeWise kann diese Objekte mit Hilfe des Nutzers erkennen und im Anschluss nach gleichen Strukturen suchen, um diese automatisch zu ergänzen. Vor allem im Hallenbau bietet das große Vorteile, da hier in der Regel immer die gleichen Konstruktionen verwendet werden und durch diese Funktion nur einmal manuell erkannt werden müssen.

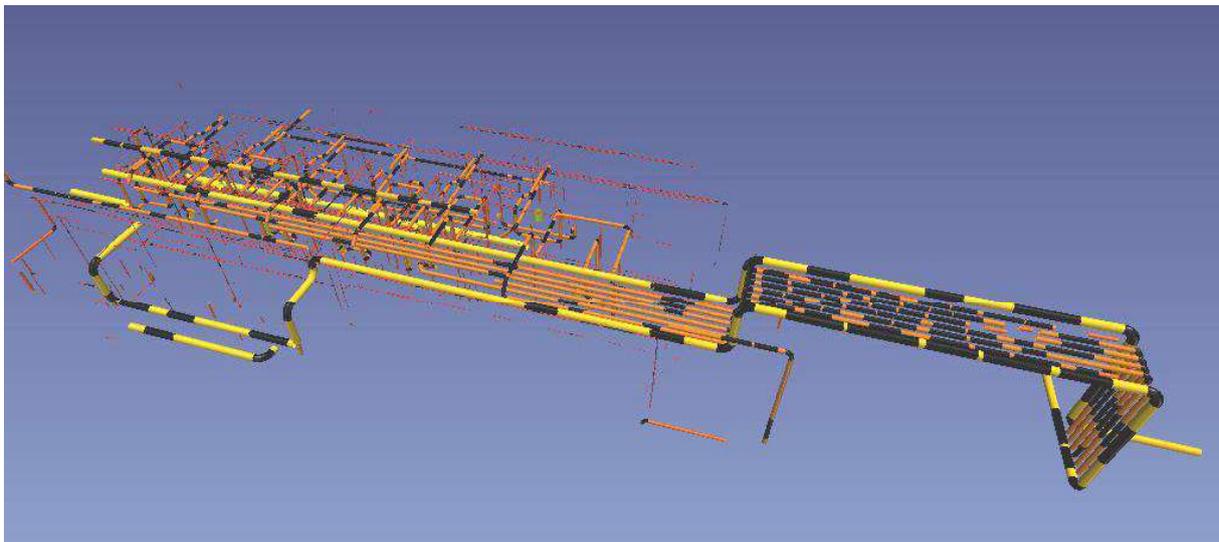


Abbildung 16: Automatisch extrahierte und verbundene Rohre (ClearEdge3D 2020b)

EdgeWise automatisiert viele Vorgänge und birgt dadurch ein großes Potential der Fehlinterpretation von Punkten durch den Algorithmus. Diesem Problem wird durch ein Tool zur Qualitätskontrolle Rechnung getragen, mit dem jede Modellierung einzeln auf ihre Einpassung in die Punktwolke überprüft und verifiziert werden kann.

Zuletzt bietet EdgeWise eine Zuordnung zu Familien in Revit. Dadurch werden Objekte bereits vorab als Stütze, Träger oder Rohr klassifiziert und können mithilfe von integrierten Katalogen genau beschrieben werden. (ClearEdge3D 2020c)

3.5 PointCab

PointCab ist eine Software zur Punktwolkenanalyse, die seit 2010 entwickelt wird und seitdem immer mehr Aufmerksamkeit bekommen hat. Sie soll vor allem durch ihre leichte Bedienung den Einstieg in die 3D-Modellierung mit Punktwolken erleichtern. Aus diesem Grund wird ein Plugin für Revit und ArchiCAD angeboten, welches eine direkte Verbindung zwischen PointCab und dem jeweiligen CAD-Programm ermöglicht. Punkte in der Scanwolke können so direkt nach Revit extrahiert werden, ohne die gesamte Punktwolke dort zu importieren. Seinen Fokus setzt PointCab auf die teilautomatische Modellierung von Wänden, Fenstern und Türen. Die Software kann auf Grundlage der Punktwolke eine Vektorisierung des Grundrisses vornehmen und erleichtert so die Erstellung von Wänden. Öffnungen können aus einer Panorama-Ansicht direkt herausgemessen werden und über das Plugin in Revit eingefügt werden (s. Abbildung 17) In dieser Ansicht ist es ebenso möglich interessante Punkte, wie z.B. Lichtschalter oder Steckdosen, zu markieren und für eine spätere Modellierung zu verwenden.

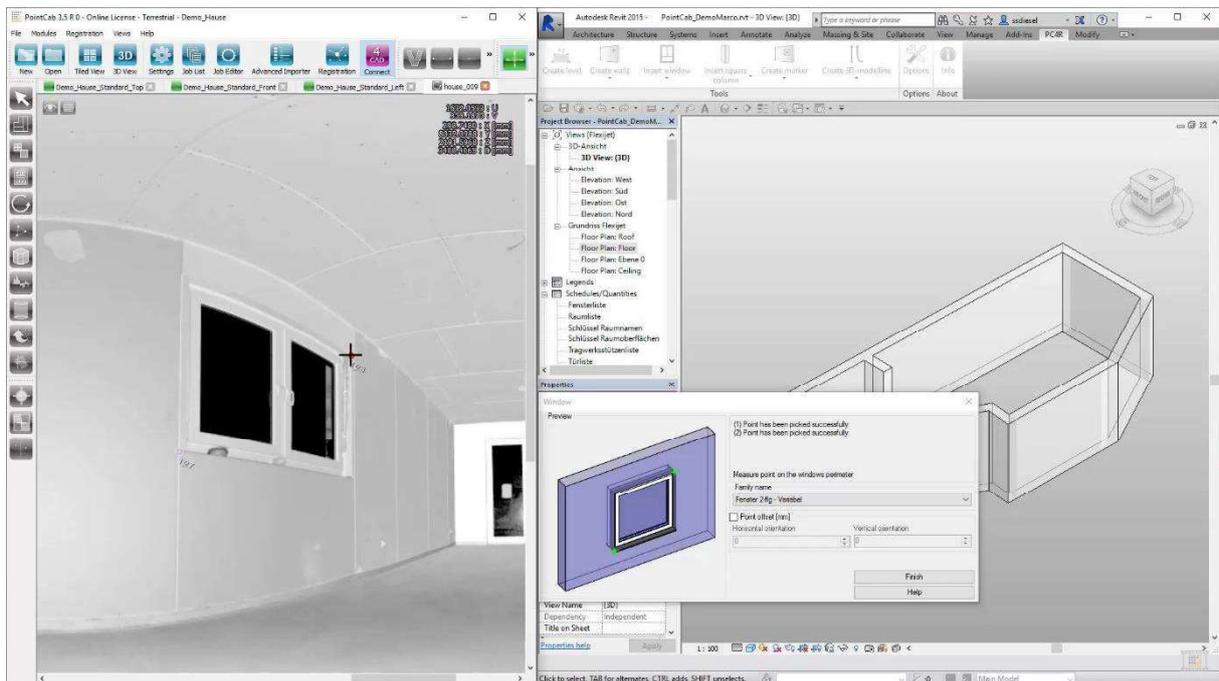


Abbildung 17: Panorama-Ansicht in PointCab für Revit (PointCab 2016)

Die angebotenen Funktionalitäten sind auf die Erstellung von Modellen von Wohnhäusern oder Bürogebäuden mit einem geringen Anteil von haustechnischen Installationen ausgerichtet, da eine Funktion zur (teil-)automatischen Rohrmodellierung nicht vorhanden ist. (PointCab GmbH 2020c)

3.6 Vergleich

Jede der vorangehend beschriebenen Softwarelösungen ist für eine allgemeine 3D-Modellierung mit Punktwolken geeignet, aber in Bezug auf die Automatisierung ergeben sich deutliche Unterschiede. Leica, FARO und Trimble bieten als Hersteller von Laserscansystemen mit ihrer Software Lösungen an, die sich nahtlos an den bestehenden Workflow von Aufnahme und Registrierung anschließen. Die Punktwolken können einfach geladen und bearbeitet werden, ohne vorherige Konvertierung. Während FARO sowohl Daten von Trimble- als auch Leica-Scannern unterstützt, ist eine gegenseitige Kompatibilität bei Leica und Trimble nicht gegeben.

Cyclone, As-Built und RealWorks bieten einen vergleichbaren Funktionsumfang, der sich auf teilautomatische Modellierung von Rohren und in Grundzügen auch Wänden fokussiert, aber dennoch viel User-Input erfordert. Gleiches gilt für PointCab, dessen Anwendungsgebiet nicht wie bei den vorherigen drei in der Modellierung von Industrieanlagen mit einem großen Anteil von Rohren liegt, sondern eher bei Wohn- und Bürogebäuden. Der Vorteil von PointCab liegt in seiner guten Anbindung an gängige CAD-Systeme und der Einsteigerfreundlichkeit.

EdgeWise sticht in dieser Betrachtung durch fortgeschrittene Algorithmen zur Objekterkennung hervor, die den anderen Anbietern deutlich voraus ist. Besonders die vollautomatische Erkennung von Rohren ist für große Datensätze ein Vorteil und spart im Vergleich zu anderen Programmen viel Zeit. Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal ist die Mustererkennung zur automatischen Modellierung von wiederkehrenden Strukturen, wie Fenster, Türen oder Stahlträgern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jedes der genannten Programme eine 3D-Modellierung erheblich erleichtert, aber sich vor allem EdgeWise durch seinen Vorsprung in der Automatisierung absetzt. Jedoch lässt sich mit keiner Software ein Projekt vollautomatisch mit allen Objekten, wie Lichtschaltern oder Einrichtungsgegenständen modellieren. Die aktuell verfügbaren Lösungen können einen Teil der Modellierungsarbeit automatisieren, Fehler reduzieren und die benötigte Arbeitszeit senken.

4 As-Built Dokumentation in der Praxis

4.1 Ablauf

In der Praxis erfordert die Erstellung eines As-Built Modells einige Vorarbeit, da es mehrere Beteiligte gibt, deren Anforderungen und Möglichkeiten im Vorfeld geklärt werden müssen. (Wang et al. 2019) unterteilen diese Erstellung in folgende Schritte:

1. Ermitteln des erforderlichen Informationsgrads
2. Festlegung der erforderlichen Scanqualität
3. Erfassung der Scandaten
4. As-Built Rekonstruktion

Auf eine ähnliche Einteilung kommen auch (Badenko et al. 2019). Hier wird der gesamte Vorgang in 6 Schritte aufgeteilt, entspricht aber im Prinzip dem gleichen Ablauf wie eben beschrieben.

Anhand der einzelnen Schritte soll im Folgenden der Ablauf weiter präzisiert werden.

4.1.1 Erforderlicher Informationsgrad

As-Built Modelle werden für ganz unterschiedliche Anwendungsfälle erstellt. Diese Anwendungsfälle bilden auch die Grundlage für den Bedarf an Informationen im Modell. Während das Sammeln von zu viel Daten einen unnötigen Kostenfaktor darstellt, führen zu wenig Informationen zu einem unbrauchbaren Modell für die geforderte Anwendung. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass der Auftraggeber bzw. der spätere Nutzer des Modells genaue Angaben zu den geplanten Verwendungen macht und die erforderliche Informationstiefe definiert.

Zu diesen Informationen gehören die zu modellierenden Bauteile, die benötigte Detaillierung und, falls ein BIM-Modell gefordert wird, auch zusätzliche, nicht geometrische, Informationen (Wang et al. 2019). Ein BIM-Modell stellt dabei ein „... umfassendes digitales Abbild eines Bauwerks mit großer Informationstiefe“ (Borrmann et al. 2015, S.4) dar.

Die Auswahl der zu modellierenden Bauteile erfolgt in der Regel mithilfe eines Klassifizierungssystems, um eine einheitliche Basis zu schaffen. In der ISO 12006-2 wird ein

Rahmenwerk für diese Klassifizierung vorgestellt, auf dessen Grundlage zwei wesentliche Klassifizierungssysteme entwickelt wurden, OmniClass (USA) und Uniclass (UK). In Deutschland gibt es verschiedene Systeme zur Klassifikation, wie z.B. die DIN 276, die eine Einteilung in Kostengruppen vornimmt und sich besonders dann anbietet, wenn mithilfe des Modells auch Kostenberechnungen vorgenommen werden sollen. (König 2017)

Nach der Festlegung der zu modellierende Bauteile, muss der erforderliche Detaillierungsgrad bestimmt werden. Im Kontext mit BIM wird hier meist von LOD (Level of Development) gesprochen. Die Abkürzung LOD wird in anderen Arbeiten auch als Level of Detail verwendet. Die Verwendung dieser beiden Begriffe ist etwas irreführend, da sich der Unterschied nicht direkt erschließt. Level of Development beschreibt den Ausarbeitungsgrad eines Modells, d.h. wie präzise sind die Angaben zur Geometrie und welche zusätzlichen Informationen sind vorhanden. Level of Detail beschreibt dagegen wie detailliert im grafischen Sinne ein Objekt repräsentiert wird. Mit zunehmender Ausarbeitung steigt in der Regel auch der Detaillierungsgrad. Trotzdem sind diese beiden Level getrennt voneinander zu betrachten. In dieser Arbeit wird LOD, gemäß der Definition der AIA, als Level of Development verwendet (AIA 2013).

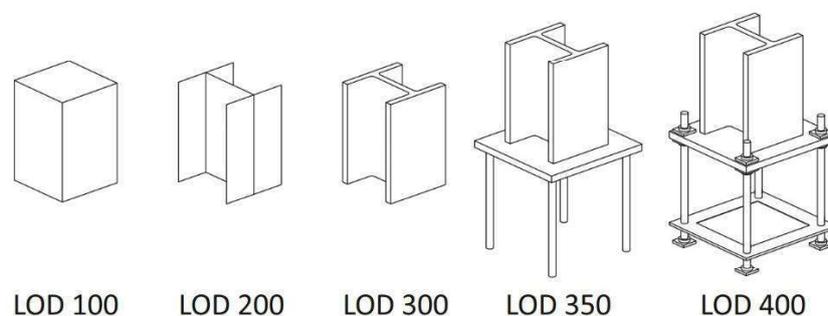


Abbildung 18: Darstellung der verschiedenen LOD-Grade anhand einer Stahlstütze und ihres Anschlusses (Bormann et al. 2015)

Ein Beispiel der verschiedenen Levels wird in Abbildung 18 gezeigt. Die LOD's lassen sich wie folgt kurz beschreiben (NATSPEC 2013):

- LOD 100: Konzeptionell
- LOD 200: Ungefähre Geometrie
- LOD 300: Präzise Geometrie
- LOD 350: Präzise Geometrie + Schnittstellen
- LOD 400: Herstellung
- LOD 500: As-Built

Eine As-Built Dokumentation würde dabei dem LOD 500 entsprechen. Dies gilt uneingeschränkt aber nur für Neubauten, die unter Verwendung eines BIM-Modells geplant und nach Fertigstellung mit einem Scan abgeglichen wurden, um die genaue Lage aller Bauteile zu verifizieren. Wang et. al untersuchen in ihrer Arbeit die Erfassung von Bestandsgebäuden und weichen für eine Definition der Genauigkeit von den LODs ab und verwenden die drei Einteilungen „conceptual“, „approximate geometry“, and „precise geometry.“ (Wang et al. 2019).

Andere Arbeiten definieren für Bestandsgebäude ebenfalls eigene Level, wie z.B. in (Badenko et al. 2019). Hier werden neben drei Leveln der geometrischen Genauigkeit (G) auch drei Level der Informationsfülle (I) angegeben. Die drei Level der geometrischen Genauigkeit sind unterteilt in eine *schematische Darstellung ohne Ansprüche an die Genauigkeit* (G1), eine *Geometrie mit mittlerer Genauigkeit bis 50mm* (G2) und eine *präzise Geometrie mit Genauigkeiten bis 5mm* (G3). Diese Einteilung ist auch in Wang et al. zu finden. Die drei Level der Informationsfülle definieren den Informationsgehalt des Modells und sind unterteilt in:

- minimale Attributinformation, inklusive RGB-Farben (I1)
- Informationen zu Material und Struktur der Objekte, um Simulationen durchzuführen (I2)
- Integration aller verfügbaren Informationen in das Modell (I3)

Diese werden je nach Bedarf unterschiedlich miteinander kombiniert. Die Kombination GI 13 (G1 + I3) erzeugt z.B. eine Datenbank mit allen relevanten Informationen des Objekts, ohne eine genaue geometrische Repräsentation. GI 31 hingegen definiert ein präzises geometrisches Modell, das kaum Informationen erhält und z.B. für eine Kollisionskontrolle genutzt werden kann.

Zuletzt müssen, neben dem Level der geometrischen Genauigkeit, auch zusätzliche nicht-geometrische Attribute festgelegt werden, die für die spätere Nutzung des Modells relevant sind (Wang et al. 2019). Diese können beispielsweise Material, Feuerwiderstand, Öffnungsrichtung von Türen oder der U-Wert sein. Diese Festlegung muss auf die Anforderungen des Modells abgestimmt werden und kann nach Belieben erweitert werden. In Abbildung 19 ist ein Beispiel dargestellt, wie eine solche Festlegung, unter Verwendung des Klassifizierungssystems OmniClass, aussehen könnte.

OmniClass ID	Element	Required LOD (Accuracy)	Non-geometric Attributes
21-02-10-10	Floor Construction	Approximate geometry (50 mm for size, shape, and location)	Material
21-02-10-20	Roof Construction	Approximate geometry (50 mm for size, shape, and location)	Material
21-02-10-80	Stairs	Approximate geometry (50 mm for size, shape, and location)	Material
21-02-20-10	Exterior Walls	Precise geometry (20 mm for size, shape, and location)	Fire rating
21-02-20-20	Exterior Windows	Precise geometry (20 mm for size, shape, and location)	
21-02-20-50	Exterior Doors and Grilles	Precise geometry (20 mm for size, shape, and location)	

Abbildung 19: Beispiel für die Festlegung des erforderlichen Informationsgrades (Wang et al. 2019)

Falls die Planung bereits mithilfe eines BIM-Modells erfolgt ist, kann die Festlegung der Attribute entfallen, da diese bereits vorhanden sind. In diesem Fall wird nur ein geometrischer Vergleich des Modells mit der Realität vorgenommen und mögliche bauliche Abweichungen ergänzt (LOD 500).

4.1.2 Scanqualität

Die Scanqualität muss auf den vorher festgelegten Informationsgrad abgestimmt werden. Hieraus ergibt sich die Ausprägung verschiedener Parameter, wie z.B. Genauigkeit, räumliche Auflösung, Abdeckung und andere Parameter (Reflektion, RGB-Wert) (Wang et al. 2019). Die Genauigkeit der Scandaten muss gleich oder höher als die Anforderungen sein, wobei bereits bei der Bestimmung der Anforderungen darauf geachtet werden muss, welche Genauigkeit sinnvoll bzw. technisch möglich ist.

Die Abdeckung beschreibt das Verhältnis von aufgenommener Fläche zu totaler Fläche. Je komplexer und detailreicher das Objekt ist, desto höher muss diese ausfallen. In einem Einfamilienhaus mit geraden Wänden können diese auch mithilfe weniger Punkte korrekt identifiziert werden. Für Fabrikgebäude mit komplizierten Geometrien und Details, wie z.B. der Lüftungsanlage, wird eine höhere Abdeckung benötigt, um alles korrekt abzubilden. (Wang et al. 2019)

Eine hohe Scanqualität erleichtert zudem eine automatische Erkennung und Modellierung von Objekten mithilfe von Programmen (siehe Kap. 3), erhöht aber gleichzeitig die Kosten und den Zeitaufwand für die Erfassung. Hier muss im Hinblick auf die spätere Verwendung ein sinnvoller Kompromiss geschaffen werden.

4.1.3 Erfassung

Die Erfassung stellt den Vorgang der Aufnahme von Punktwolken dar. Hierbei sind vor allem der verwendete Scanner und die Scannerstandorte wichtig. Das Scangerät muss auf die Anforderungen abgestimmt sein und diese erfüllen. Bei der Aufnahme ist zu beachten, dass die verwendeten Geräte eine Mindest- und Maximalentfernung haben, in der sie Punkte erfassen können. In der Regel liegt dieser Bereich zwischen 0,5 – 350m (Leica 2020d; FARO 2020). In beengten Aufnahmesituationen (<0,5m), kann es dazukommen, dass keine Punkte aufgenommen werden können. Auf der anderen Seite nimmt die Genauigkeit mit zunehmender Entfernung zwischen Gerät und Punkt ab, sodass die maximale Distanz von den Anforderungen an das spätere Modell bestimmt wird.

Um eine ausreichende Abdeckung aller relevanten Bereiche zu erhalten, müssen die Standorte des Scanners daher vorher sorgfältig geplant werden, um Verschattungen zu vermeiden. Je nach gewähltem Verfahren zur Registrierung der einzelnen Punktwolken muss das Messfeld unter Umständen zusätzlich vorab signalisiert werden, um eine Gesamtpunktwolke zu erhalten (siehe Kap. 2.1.2.2).

4.1.4 As-Built Rekonstruktion

Im letzten Schritt werden die Punktwolken dann zur digitalen Rekonstruktion des Gebäudes genutzt. Die Rahmenbedingungen hierfür sind durch den erforderlichen Informationsgrad (siehe Kap. 4.1.1) gegeben. Für die Modellierung gibt es zwei Herangehensweisen: eine manuelle und eine automatische Modellierung. Diese zwei Arten können jedoch nicht scharf getrennt werden, sondern gehen ineinander über. Aktuelle Software basiert auf einer überwiegend manuellen Modellierung, die in Teilbereichen durch Algorithmen z.B. zur automatischen Erkennung von Rohren unterstützt wird (siehe Kap. 3).

Die Verarbeitung von Scandaten zu einem Modell lässt sich in zwei Szenarios unterteilen:

1. Aus der Planung ist ein BIM-Modell vorhanden, welches im Zuge der Dokumentation vom Stand *As-Planned* auf *As-Built* aktualisiert werden soll. Formal gesehen erreicht das Modell hierbei den Ausarbeitungsgrad LOD 500 (s. Kap. 4.1.1). Dieser Vorgang wird auch als Scan-vs-BIM bezeichnet und beschreibt den Vergleich des geplanten Modells mit der Punktwolke des gebauten Zustands. In der Regel ist dies

lediglich für Neubauten der Fall, da für Altbauten selten BIM-Modelle vorhanden sind, bzw. gerade erst erstellt werden. Hierbei muss die Punktwolke in das Koordinatensystem des Modells eingepasst werden. Dies erfolgt über die manuelle Bestimmung von mindestens 3 korrespondierenden Punkten oder eine schrittweise Registrierung. In Fabrikumgebungen existiert oft bereits ein übergeordnetes Koordinatensystem, das ebenfalls für diesen Vorgang verwendet werden kann, wenn sowohl der Scan als auch das vorhandene BIM-Modell in diesem Koordinatensystem orientiert sind (Wang et al. 2019). Sobald dies geschehen ist, werden die Modelldaten mit den Scandaten abgeglichen und Übereinstimmungen gesucht. Anschließend wird das BIM-Modell mithilfe der Scandaten geometrisch aktualisiert und mögliche Abweichungen werden korrigiert.

2. Aus der Planung ist kein Modell vorhanden und die Scandaten dienen als Grundlage für die komplette Neu-Modellierung. Dieses Szenario trifft wahrscheinlich auf die meisten Fälle einer As-Built Dokumentation zu und erfordert mehr Aufwand als ein reiner Abgleich wie im vorhergehenden Fall. Für eine automatische Modellierung muss die Punktwolke aufwendig segmentiert werden (siehe Kap. 2.2.1) und die erkannten Objekte korrekt modelliert werden. Auf dem Markt sind aktuell nur teilautomatische Lösungen erhältlich, weswegen ein Großteil der Modellierungsarbeit manuell erfolgen muss.

4.2 Zeitpunkt der Aufnahme

Der Zeitpunkt der Aufnahme hängt von den Anforderungen des Auftraggebers ab. So ist es möglich den gesamten Bauablauf zu begleiten oder erst nach Fertigstellung das Gebäude aufzunehmen. Im Falle der Erfassung von großen Industrieanlagen empfiehlt es sich die Aufnahme bereits baubegleitend zu bestimmten Meilensteine vorzunehmen. Diese Meilensteine könnten z.B. die Fertigstellung des Rohbaus oder der Haustechnik sein. Oft sind Bereiche in der Zukunft nicht mehr zugänglich und können mit einer vorgezogenen Aufnahme dennoch vollständig dokumentiert werden. Die zeitlich versetzt erfassten Punktwolken können in der Regel ohne Probleme zusammengeführt werden (Wujanz et al. 2019) und bilden so die Grundlage für ein möglichst vollständiges 3D-Modell.

Neben diesen Aufnahmen im bzw. im Anschluss an den Bauprozess ist aber auch eine nachträgliche Erfassung von Bestandsgebäuden möglich. Auf diese Weise können

nicht nur einzelne Bauwerke digitalisiert werden, sondern auch ganze Fabriken mit einer Vielzahl von Einzelgebäuden mit unterschiedlichen Baujahren.

Wie eingangs erwähnt, hängt dieser Zeitpunkt von den Anforderungen des Auftraggebers ab. Eine baubegleitende Aufnahme führt zu einem umfangreicheren Modell, aber auch zu höheren Kosten als eine abschließende Einzelaufnahme am Ende der Bauphase.

4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Planungsleistung von Architekten und Ingenieuren wird in Deutschland anhand von 9 Leistungsphasen (LPH) klassifiziert. In der HOAI werden diese Leistungsphasen genauer definiert und sind wie folgt aufgeteilt:

LPH 1	Grundlagenermittlung
LPH 2	Vorplanung
LPH 3	Entwurfsplanung
LPH 4	Genehmigungsplanung
LPH 5	Ausführungsplanung
LPH 6	Vorbereitung der Vergabe
LPH 7	Mitwirkung bei der Vergabe
LPH 8	Objektüberwachung und Dokumentation
LPH 9	Objektbetreuung

Zu jeder Leistungsphase gehören Grundleistungen und besondere Leistungen. Grundleistungen sind Leistungen, „...die zur ordnungsgemäßen Erfüllung eines Auftrags im Allgemeinen erforderlich sind...“ (§2 Abs. 2 S.1 HOAI). Besondere Leistungen gehen dagegen über diese Grundleistungen hinaus oder ersetzen sie. Für eine As-Built Dokumentation sind vor allem die Leistungen der Leistungsphase 8 von Bedeutung. Grundleistungen in dieser LPH sind die Dokumentation des Bauablaufs und die „Systematische Zusammenstellung der Dokumentation, zeichnerischen Darstellungen und rechnerischen Ergebnisse des Objekts“ (§34 Abs. 4 Anl. 10 HOAI). Eine Erstellung

eines 3D- oder BIM-Modells im Sinne einer As-Built Dokumentation ist keine Grundleistung und stellt somit eine besondere Leistung dar, die gesondert beauftragt werden muss (BAK 2017).

Neben den Leistungen wird in der HOAI auch die Vergütung geregelt. Die dafür geltenden Honorartafeln für Grundleistungen mit ihren Mindest- und Höchstsätzen verstoßen, laut eines Urteils vom Europäischen Gerichtshof vom 04. Juli 2019, gegen europäisches Recht. Die HOAI ist abgesehen davon aber weiter gültig und bildet die Grundlage für die Vergütung von besonderen Leistungen. In §3 Abs.3 S.2 HOAI ist festgeschrieben, dass das Honorar von besonderen Leistungen frei vereinbart werden kann, demzufolge auch nicht an die Mindest- oder Höchstsätze gebunden ist. Die Bundesarchitektenkammer schlägt hier eine Abrechnung nach Aufwand vor, die vom Ersteller des Modells unter Berücksichtigung der Anforderungen des Auftraggebers und der dafür benötigten Zeit, zu erstellen ist (BAK 2017).

4.4 Anwendungsfälle

4.4.1 Dokumentation

Ein wichtiger Anwendungsfall ist die Dokumentation der Bauleistung. Diese wird aufgrund der steigenden Komplexität von Bauwerken immer wichtiger. Die bisherige Praxis der Dokumentation mittels Fotografien und handgemessenen Entfernungen ist in vielerlei Hinsicht unzureichend, da diese im Hinblick auf digitale Archivierung und Vollständigkeit lückenhaft ist. Hier können epochenübergreifende Scans, also Scans in verschiedenen Baustadien, Abhilfe schaffen. (Wujanz et al. 2019)

Die so gewonnenen Modelle können dann verwendet werden, um korrekte CAD-Bestandspläne zu erzeugen, die, im Vergleich zur Planung, das tatsächliche Abbild der gebauten Umwelt darstellen (Luhmann 2018).

4.4.2 Baufortschrittskontrolle

In Kapitel 4.4.1 wurde kurz auf Scans zu verschiedenen Zeitpunkten (Epochen) eingegangen. Diese Scans können auch für die Baufortschrittskontrolle genutzt werden und bilden so einen effektiven und präzisen Soll-Ist-Vergleich (Wujanz et al. 2019). Sein volles Potential entfaltet dieser Anwendungsfall, wenn die Planung bereits in 3D oder sogar als BIM-Modell erfolgt ist. Durch eine Einpassung der Punktwolke in das Koor-

dinatensystem der Planung kann ein automatischer Abgleich des Baufortschritts vollzogen werden. Diese Methode wird auch als Scan-vs-BIM bezeichnet (s. Kap. 4.1.4). Durch den Vergleich können Abweichungen vom Bauablauf schnell erkannt, sowie die Richtigkeit der Ausführung sichergestellt werden. (University of Edinburgh 2020)

In der Forschung existieren auch Ansätze zur (automatischen) Qualitätserkennung mithilfe von Deep Learning. Hierbei dienen Punktwolken aus Photogrammetrie bzw. die verwendeten Bilder als Grundlage für verschiedene Qualitätskontrollen, wie z.B. Risserkennung oder Verifizierung des Materials und der Abmessungen. (Braun et al. 2019)

Zusätzlich dazu kann es in der Bauausführung für die Kostenüberwachung oder das Mängelmanagement genutzt werden. Während der Ausführung und vor allem nach Fertigstellung der Bauleistung kann die Abrechnung nachvollziehbar und einfach anhand dieses Modells erfolgen. (Witte et al. 2020)

4.4.3 Facility Management

Facility Management (FM) ist die „organisatorische Funktion, die Personen, Ort und Prozess (...) innerhalb der bebauten Umgebung (...) zu dem Zweck integriert, die Qualität (...) des Lebens von Personen und die Produktivität des Kerngeschäfts (...) zu verbessern“ (DIN EN ISO 41011).

Aufgabe des FM ist die Verwaltung und Bewirtschaftung von Grundstücken, Gebäuden, Anlagen und Einrichtungen. Dies umfasst alle Tätigkeiten von Baumaßnahmen über die Wartung bis zum Verkauf oder Abriss eines Gebäudes. Aber auch die Steigerung der Produktivität über Verbesserungen der Prozesse gehört dazu.

Daher liegt hier auch der für den Auftraggeber interessanteste Anwendungsfall eines As-Built Modells. Das volle Potential wird, wie bereits erwähnt, mit einem durchgängigen BIM-Modell erreicht. Doch auch ohne diese Erweiterung des geometrischen Modells, lässt es sich für die meisten der nachfolgenden Anwendungen problemlos nutzen.

4.4.3.1 Baumaßnahmen

Maßnahmen des Umbaus, der Modernisierung oder Sanierung begleiten ein Gebäude über seinen gesamten Lebenszyklus (s. Abbildung 20).

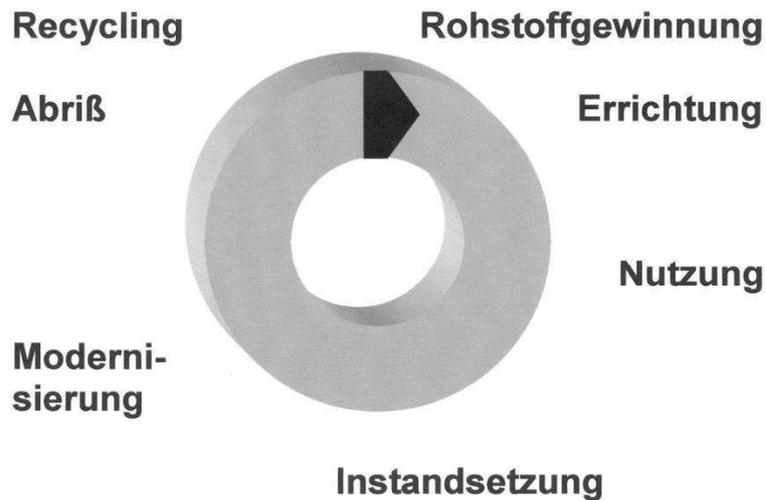


Abbildung 20: Lebenszyklus eines Gebäudes (Offensive Gutes Bauen)

In der Phase der Errichtung wird das Modell zur Kontrolle und Dokumentation genutzt (Kap. 4.4.1 und 4.4.2). Die Nutzung bzw. der Betrieb stellt den längsten Zeitraum dar und beträgt z.B. bei Fabrikgebäuden etwa 40 Jahre (BMF 1998). In dieser Zeit unterläuft ein Gebäude immer wieder baulichen Änderungen durch veränderte Produktionstechniken oder Umnutzung. Diese Maßnahmen können durch die Verwendung und konsequente Aktualisierung des As-Built Modells erleichtert werden. Vor allem in Produktionsstätten, aber auch in Kraftwerken (vor allem nuklear) ist eine kurze Verweildauer von größter Wichtigkeit, um vorhandene Prozesse so wenig wie möglich zu stören und die Sicherheit der Mitarbeiter zu gewährleisten. Hierbei kann ein digitales Abbild des tatsächlichen Zustandes benötigte Geometriedaten bereitstellen, um z.B. Bauteile vorzufertigen und im Anschluss in den, meist nur wenige Wochen dauernden, Produktionsunterbrechungen, auszutauschen. Ohne ein digitales Modell müssten diese Daten vor Ort zuerst erfasst und übertragen werden. (Luhmann 2018)

Neben diesen Maßnahmen der Instandsetzung und Modernisierung werden Gebäude aber oft für eine andere Nutzung umgebaut. Ein Modell kann bei der Entscheidungsfindung helfen und verschiedene Planungsvarianten im Vorfeld durchgespielt werden. Durch Simulation der bestehenden oder neuen Prozesse ist es möglich bereits im Vorfeld ein hohes Maß an Sicherheit für die spätere Produktion zu erhalten. Dies ist jedoch nicht nur für Produktionsanlagen interessant, sondern auch für z.B. Wohngebäude, in denen die Fassade erneuert werden soll. Die geometrischen Daten können für eine Mengenermittlung oder das Abgreifen der Fenstermaße genutzt werden (Luhmann

2018). Anhand des Modells ist es aber ebenso möglich verschiedene Farbgestaltungen zu testen und die Mieter in den Prozess mit einzubeziehen.

Nach baulichen Veränderungen ist es wichtig das Modell wieder auf den neuen As-Built Stand zu bringen. Dies erfolgt in der Regel über einen erneuten Scan des Objekts, der dann im Koordinatensystem des Modells registriert wird und dieses so aktualisiert.

Selbst am Ende der Nutzung, dem Abriss, kann ein As-Built (BIM) Modell hilfreich sein, da es genaue Informationen über die im Gebäude enthaltenen Stoffe und Mengen enthält. Die abgebrochenen Abfälle können so effizient dem Recycling zugeführt werden oder für andere Bauprojekte wiederverwendet werden (Borrmann et al. 2018). Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „Buildings as Material Banks“ wird untersucht, auf welche Weise die, in Gebäuden verbauten, Rohstoffe effizient wiederverwertet werden können, um so den unnötigen Verbrauch neuer Ressourcen zu senken (BAMB 2020).

4.4.3.2 Gebäudebetrieb

Auch im allgemeinen Betrieb des Gebäudes ergeben sich verschiedenen Vorteile. Durch die Übergabe eines Modells, das die tatsächliche Ausführung, inklusive Informationen zu den verbauten Einbauteilen und Geräten, widerspiegelt, wird das Verwalten des Gebäudes erleichtert. Wartungen und Reinigungen können leichter geplant werden, da alle notwendigen Informationen sofort verfügbar sind.

Im Flächenmanagement können verfügbare Flächen besser verwaltet werden und so eine effizientere und nutzerorientierte Verwendung realisiert werden (Borrmann et al. 2015).

4.4.3.3 Gebäudeenergieeffizienz

Die Energieeffizienz von Gebäuden ist in den vergangenen Jahren immer mehr in den Fokus der Planer, Bauherrn und Gebäudebetreiber gerückt. Die steigenden Energiepreise (Prognos AG et al. 2014) machen es nötig, auch eine energetische Sanierung von Bestandsgebäuden zu betrachten. Ein, auch nachträglich erstelltes, As-Built Modell kann hierbei die Grundlage für verschiedene Simulationen und Berechnungen bilden (Borrmann et al. 2018). Das Ergebnis hilft den Beteiligten die energetischen Zusammenhänge besser zu verstehen und die passenden Umbaumaßnahmen zu planen.

4.4.4 Bauen im Bestand

Ein Bereich, der in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit bekommen hat, ist das Bauen im Bestand. Hierbei werden bereits bestehende Gebäude umgebaut oder erweitert. Vor allem in Bereichen mit einem großen Bedarf an Wohnungen, aber wenig freiem Bauland ist diese Nachverdichtung ein interessanter Ansatz. (BBSR 2015)

Über 65% des Wohngebäudebestandes in Deutschland ist vor 1980 erbaut worden (Destatis 2014) und verfügt meist über alte und nicht mehr aktuelle Pläne. Für die Planung einer Nachverdichtungsmaßnahme (Umbau, Anbau, Aufstockung) ist eine aktueller Planstand aber zwingend erforderlich. Hier kann die nachträgliche Erzeugung eines As-Built Modells Abhilfe schaffen. Da moderne 3D-Modellierungssoftware (z.B. Revit) eigentlich für Neubauten mit parallelen Wandoberflächen und orthogonalen Wandelementen ausgelegt sind, muss hier, im Zuge der Modellierung, ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit des Modells und den Möglichkeiten der Software getroffen werden. Dennoch ermöglicht es eine gute Planung anhand der tatsächlichen Gegebenheiten und verringert so, während der Bauphase, mögliche Komplikationen durch veraltete oder nicht mehr vorhandene Pläne. Das Ergebnis ist eine höhere Planungs- und Kostensicherheit. (Borrmann et al. 2018)

4.4.5 Digitale Fabrik

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.

Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ (VDI-Richtlinie 4499)

Für die Digitalisierung einer Fabrik bildet ein digitales Modell der realen Fabrik einen wichtigen Grundstein. Ein Ziel der digitalen Fabrik ist die Erreichung betriebswirtschaftlicher Ziele, z.B. durch Reduktion von Verschwendung oder Effizienzsteigerungen. Dafür werden alle Prozesse innerhalb einer Produktionsumgebung digitalisiert und miteinander in Verbindung gebracht. Anhand dieses Modells können verschiedene Simulationen zur Erreichung der Ziele durchgeführt werden. Die Planung der Maschinen

und Anlagen, des Materialflusses, der Flächen und des Layouts, sowie der Infrastruktur können Gegenstand dieser Simulationen sein. Ein digitales Modell ermöglicht die Untersuchung und Bewertung verschiedener Szenarien in einem realitätsnahen Umfeld. (VDI-Richtlinie 4499)

4.4.6 Öffentlichkeitsarbeit und Visualisierung

Das As-Built Modell kann, quasi als Nebenprodukt, auch für die Öffentlichkeitsarbeit und verschiedene Visualisierungen eingesetzt werden. Ein Projektentwickler hat so z.B. die Möglichkeit einem Käufer das fertige Projekt zu zeigen und durch Virtual Reality erlebbar zu machen. Diese Anwendung ist aber auch im Bereich des Wohnungsbaus denkbar und ermöglicht es Wohnungen nicht nur durch 2D-Fotos darzustellen, sondern virtuell begehbar zu machen. Die Einrichtung kann nach persönlichen Vorlieben dargestellt und so vorab ein realistisches Bild vermittelt werden.

Im Bereich von Bauwerken mit großem öffentlichen Interesse z.B. Bahnhöfe kann ein As-Built Modell als Grundlage für die Darstellung verschiedener Varianten bei Umbauten genutzt werden, um die Bevölkerung mit einzubinden und die Akzeptanz für die Maßnahme zu erhöhen (Walden 2015). Aktuell werden in Beteiligungsprozessen oft traditionelle 2D-Pläne bereitgestellt, die es dem Laien schwer machen daraus Informationen über das Projekt zu gewinnen. Ein Modell kann hier Abhilfe schaffen und ermöglicht eine bessere Kommunikationsbasis. (Borrmann et al. 2018)

4.4.7 Mitarbeitertraining

Ein anderer Ansatz der Nutzung von As-Built Modellen ist das Training von Mitarbeitern mithilfe von VR-Anwendungen. Vor allem in gefährlichen Umgebungen, wie Kraftwerken oder Ölplattformen ist eine sichere Schulung von größter Wichtigkeit (Hannover Messe 2018). Das Einüben von Abläufen in einem virtuellen Umfeld ohne reale Konsequenzen hilft den Mitarbeitern diese Situationen im Anschluss besser und schneller einzuschätzen und zu lösen. Diese Technik ist aber auch für ein Training von Routineaufgaben, wie z.B. Wartung sinnvoll, da es die Effizienz in der Ausführung steigert und so Kosten reduzieren kann (Digital Twins Studio 2020).

5 Fazit

Mit Photogrammetrie und Laserscanning stehen heute gute Möglichkeiten zur Erfassung von Punktwolken, die als Grundlage für eine As-Built Dokumentation dienen, zur Verfügung. Besonders das Laserscanning eignet sich mit seiner schnellen und präzisen Erfassung der Umgebung für eine solche Anwendung. In der Auswertung dieser Punktwolken spielen Algorithmen zur Segmentierung, wie region growing, eine wichtige Rolle, da sie eine automatische Objekterkennung ermöglichen und so Zeit in der Modellierung sparen. Auf dem Markt ist eine Reihe von Lösungen vorhanden, die diese Modellierung ermöglichen und mit einem unterschiedlichen Grad an Automatisierung unterstützen. ClearEdge3D hat mit EdgeWise das fortgeschrittenste Tool geschaffen, wenn es um diese Automatisierung und Erkennung von Strukturen geht. Dennoch kann keines der aktuell verfügbaren Programme eine vollautomatische Modellierung eines ganzen Gebäudes leisten. Ansätze hierfür sind in der Forschung vorhanden, aber in der Praxis noch nicht umgesetzt.

Für den genauen Ablauf einer solchen As-Built Dokumentation gibt es verschiedene Annäherungen, wie von Badenko et al. oder Wang et al., aber keinen klar definierten Leitfadens. Da die As-Built Dokumentationen in der Zukunft an Bedeutung gewinnen, ist es sinnvoll hier einen allgemein gültigen Rahmen zu entwickeln, um einen Einstieg in die Thematik zu erleichtern. Allgemein ist im Bereich der As-Built Dokumentation noch mehr Forschung nötig, um Probleme, wie die Automatisierung und Zuverlässigkeit der Modellierung mithilfe von Algorithmen zu lösen.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelor-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

Wolfratshausen, 27. Oktober 2020

Felix Tietze

██████████

██████████████████

██████████████████████████████

██████████████████

Literaturverzeichnis

- A. Aldoma; Z. Marton; F. Tombari; W. Wohlkinger; C. Potthast; B. Zeisl et al. (2012): Tutorial: Point Cloud Library: Three-Dimensional Object Recognition and 6 DOF Pose Estimation. In: *IEEE Robotics Automation Magazine* 19 (3), S. 80–91.
- Accenture (2016): Digitalisierung entzaubern - wie die deutschen Top500 digitale Blockaden lösen. Online verfügbar unter https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-5/accenture-top500-de-executive-summary-final-web.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2020.
- Adán, A.; Quintana, B.; Prieto, S. A.; Bosché, F. (2020): An autonomous robotic platform for automatic extraction of detailed semantic models of buildings. In: *Automation in Construction* 109, S. 102963. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102963.
- Agapaki, Eva; Brilakis, Ioannis (2018): State-of-Practice on As-Is Modelling of Industrial Facilities. In: Ian F. C. Smith und Bernd Domer (Hg.): *Advanced Computing Strategies for Engineering*, Bd. 10863. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science), S. 103–124.
- AIA (2013): Guide, Instructions and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents. Online verfügbar unter https://help.aiacontracts.org/public/wp-content/uploads/2020/03/Digital-Practice_Guide.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- Badenko, V.; Fedotov, A.; Zotov, D.; Lytkin, S.; Volgin, D.; Garg, R. D.; Liu, M. (2019): SCAN-TO-BIM METHODOLOGY ADAPTED FOR DIFFERENT APPLICATION. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-5/W2, S. 1–7. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-1-2019.
- BAK (2017): BIM für Architekten. Hg. v. Bundesarchitektenkammer. Online verfügbar unter <https://www.bak.de/w/files/bak/06service/presse/publikationen/bim-bak-broschuere-web.pdf>, zuletzt geprüft am 08.10.2020.
- Ballard, Dana H. (1981): Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. In: *Pattern recognition* 13 (2), S. 111–122.

- BAMB (2020): BAMB - Buildings As Material Banks (BAMB2020) - BAMB. Online verfügbar unter <https://www.bamb2020.eu/>, zuletzt aktualisiert am 03.10.2020, zuletzt geprüft am 03.10.2020.
- BBSR (2015): Städtebauliche Nachverdichtung im Klimawandel. In: *ExWoSt-Informationen* (46/1).
- Blankenbach, Jörg (2016): Bauaufnahme, Gebäudeerfassung und BIM. In: Willi Freuden und Reiner Rummel (Hg.): *Handbuch der Geodäsie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–31.
- Blankenbach, Jörg (2017): BIM im Bestand 3D-Aufmaß und Modellierung für die as-built Dokumentation. Berlin, 26.09.2017. Online verfügbar unter <https://docplayer.org/63364821-Bim-im-bestand-3d-aufmass-und-modellierung-fuer-die-as-built-dokumentation.html>, zuletzt geprüft am 18.06.20.
- BMF (1998): AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Eisen-, Stahl- und Tempergießereien". Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Eisen-Stahl-und-Tempergiessereien.html, zuletzt aktualisiert am 01.10.2020, zuletzt geprüft am 01.10.2020.
- Böhm, Jan; Becker, Susanne (2007): AUTOMATIC MARKER-FREE REGISTRATION OF TERRESTRIAL LASER SCANS USING REFLECTANCE FEATURES. Stuttgart.
- Borrmann, André (2019): Geometrische Algorithmen. Bau- und Umweltinformatik Ergänzungsmodul. Technische Universität München. München, 2019.
- Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (Hg.) (2015): *Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Borrmann, André; Lang, Werner; Petzold, Frank (2018): *Digitales Planen und Bauen*. Hg. v. vbw.
- Braun, Alex; Bosché, Frédéric; Borrmann, André (2019): Towards automated quality assessment of construction elements. In: *Proceedings of the 2019 European Conference on Computing in Construction*. 2019 European Conference on Computing in Construction, Jul. 10, 2019: University College Dublin (Computing in Construction), S. 482–483.

ClearEdge3D (2020a): Plant Modeling Capabilities | ClearEdge3D. Online verfügbar unter <https://www.clearedge3d.com/products/edgewise-plant/>, zuletzt geprüft am 15.10.2020.

ClearEdge3D (2020b): Easy Connect – ClearEdge3D Support. Online verfügbar unter <https://www.clearedge3d.com/support/edgewise/easy-connect/>, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.

ClearEdge3D (2020c): EdgeWise | ClearEdge3D. Online verfügbar unter <https://www.clearedge3d.com/products/edgewise/>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2020, zuletzt geprüft am 07.10.2020.

D. Chen; L. Zhang; P. T. Mathiopoulos; X. Huang (2014): A Methodology for Automated Segmentation and Reconstruction of Urban 3-D Buildings from ALS Point Clouds. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (10), S. 4199–4217.

Dave Marshall (1997): Region Growing. Online verfügbar unter https://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/Vision_lecture/node35.html, zuletzt aktualisiert am 08.07.1997, zuletzt geprüft am 26.09.2020.

Destatis (2014): Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland. Hg. v. Statistische Ämter des Bundes und der Länder.

Digital Twins Studio (2020): Augmented Reality, Virtual Reality, Mixed Reality customized development. Online verfügbar unter <https://dtsxr.com/>, zuletzt aktualisiert am 03.10.2020, zuletzt geprüft am 03.10.2020.

VDI-Richtlinie 4499, 01.02.2008: Digitale Fabrik.

ETH Zürich (Hg.): Chapter 6 Delaunay Triangulations. Online verfügbar unter <https://www.ti.inf.ethz.ch/ew/courses/CG13/lecture/Chapter%206.pdf>.

DIN EN ISO 41011, 04.2019: Facility Management - Begriffe.

FARO (2018): FARO® SCENE Zusätzliche Software | FARO EUROPE GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.faro.com/de-de/produkte/3d-design/faro-scene/software/>, zuletzt aktualisiert am 07.09.2018, zuletzt geprüft am 27.09.2020.

FARO (2019a): FARO AS-BUILT™ Modeler | FARO EUROPE GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim->

cim/faro-as-built/faro-as-built-modeler/, zuletzt aktualisiert am 13.11.2019, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

FARO (2019b): FARO As-Built™ Modeler Plugins. Online verfügbar unter <https://www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-as-built/faro-as-built-modeler-plugins/>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2019, zuletzt geprüft am 05.10.2020.

FARO (2020): 3D Dokumentation und Vermessung. Online verfügbar unter <https://www.faro.com/de-de/produkte/bausektor-bim-cim/faro-focus/features/>, zuletzt aktualisiert am 21.01.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Fischler, Martin A.; Bolles, Robert C. (1981): Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. In: *Commun. ACM* 24 (6), S. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.

Freeden, Willi; Rummel, Reiner (Hg.) (2019): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften).

Grilli, E.; Menna, F.; Remondino, F. (2017): A REVIEW OF POINT CLOUDS SEGMENTATION AND CLASSIFICATION ALGORITHMS. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W3, S. 339–344. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017.

Hannover Messe (2018): Digital Twin: Digital rig allows one-to-one safety training. Online verfügbar unter <https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/digital-rig-allows-one-to-one-safety-training>, zuletzt aktualisiert am 02.10.2020, zuletzt geprüft am 02.10.2020.

Heipke, Christian (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hofstadler, Christian; Dini, Amir; Petschnig, Johannes (2019): Digitalisierung im Baubetrieb – Einsatz der Photogrammetrie zur 3D-Rekonstruktion. In: Christian Hofstadler (Hg.): Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 805–838.

Ingenieur fakultät BGU (2020): Laserscanning. Hg. v. Ingenieur fakultät BGU. Online verfügbar unter <https://www.bgu.tum.de/gug/geo/met/laserscanning/>, zuletzt aktualisiert am 23.09.2020, zuletzt geprüft am 23.09.2020.

- ISPRS (2016): Statutes. Online verfügbar unter <https://www.isprs.org/documents/statutes16.aspx>, zuletzt geprüft am 03.09.20.
- Jutzi, Boris; Meyer, Franz; Hinz, Stefan (2016): Handbuch der Geodäsie: Aktive Fernerkundungssensorik – Technologische Grundlagen und Abbildungsgeometrie. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–39.
- Kersten, Thomas; Sternberg, Harald; Mechelke, Klaus; Lindstaedt, Maren (2008): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning - Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. In: Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda. Augsburg: Wißner-Verlag, S. 31–56.
- König, Markus (2017): Klassifikation, Merkmale und AIA. Workshop Datenbankkonzept. BMVI. Berlin, 23.05.2017. Online verfügbar unter https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2018/02/Vortrag_III.1_Koenig.pdf, zuletzt geprüft am 09.10.2020.
- Kroon, Dirk-Jan (2020): Finite Iterative Closest Point. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24301-finite-iterative-closest-point>, zuletzt aktualisiert am 24.09.2020, zuletzt geprüft am 24.09.2020.
- Leica (2020a): Leica CloudWorx Produktfamilie. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cloudworx>, zuletzt aktualisiert am 04.10.2020, zuletzt geprüft am 04.10.2020.
- Leica (2020b): Leica Cyclone MODEL. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-model>, zuletzt aktualisiert am 04.10.2020, zuletzt geprüft am 04.10.2020.
- Leica (2020c): Leica TruView Family – Intelligentere Zusammenarbeit bei digitalen Realitätsdaten. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-truview>, zuletzt aktualisiert am 27.09.2020, zuletzt geprüft am 27.09.2020.
- Leica (2020d): Leica RTC360 3D-Laserscanner. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-at/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.
- Leica Geosystems AG (2020a): From hardware to software - inside Geosystems' reality capture solutions. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de>

de/about-us/news-room/customer-magazine/reporter-85/16-from-hardware-to-software, zuletzt aktualisiert am 24.09.2020, zuletzt geprüft am 24.09.2020.

Leica Geosystems AG (2020b): Leica RTC360 3D-Laserscanner | Leica Geosystems. Online verfügbar unter <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2020, zuletzt geprüft am 22.09.2020.

Loges, Sören (2016): Vom Bildverband zum as-built BIM. In: 28. Forum Bauinformatik : Tagungsband.

Lowe, David G. (2000): METHOD AND APPARATUS FOR IDENTIFYING SCALE INVARIANT FEATURES IN AN IMAGE AND USE OF SAME FOR LOCATING AN OBJECT IN AN IMAGE am 06.03.2000. Anmeldenr: 09/519,893. Veröffentlichungsnr: US 6,711,293 B1.

Luhmann, Thomas (2018): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen – Methoden – Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Offenbach: Wichmann.

Luhmann, Thomas; Chizhova, Maria; Gorkovchuk, Denys; Jepping, Annika; Hastedt, Heidi (2019): Kombination von terrestrischem Laserscanning, UAV- und Nahbereichsphotogrammetrie zur Erfassung komplexer Kirchenbauwerke in Georgien. In: Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich – Publikationen der DGPF, Band 28, 2019, Bd. 28, S. 27–43.

Luhmann, Thomas; Robson, Stuart; Kyle, Stephen; Boehm, Jan (Hg.) (2020): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging: De Gruyter.

NATSPEC (Hg.) (2013): BIM and LOD. Online verfügbar unter https://bim.natspec.org/images/NATSPEC_Documents/NATSPEC_BIM_LOD_Paper_131115.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2020.

Offensive Gutes Bauen: Bauen im Lebenszyklus. Online verfügbar unter https://www.offensive-gutes-bauen.de/fileadmin/user_upload/komko/bedarf/3_2_0106.pdf, zuletzt geprüft am 01.10.2020.

Patraucean, V.; Armeni, I.; Nahangi, M.; Yeung, J.; Brilakis, I.; Haas, C. (2014): State of Research in Automatic As-Built Modelling.

- Pfeifer, Norbert; Mandlbürger, Gottfried; Glira, Philipp (2016): Laserscanning. In: Willi Freeden und Reiner Rummel (Hg.): Handbuch der Geodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–51.
- Pöchtrager, Markus (2017): Segmentierung großer Punktwolken mittels Region Growing. In: Thomas P. Kersten (Hg.): Kulturelles Erbe erfassen und bewahren - Von der Dokumentation zum virtuellen Rundgang. 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Würzburg. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (26), S. 414–421.
- PointCab (2016): Know-how: Der richtige Weg von der Punktwolke zur 3D-Modellierung und für BIM? Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=m9M5pb9E6CU>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2020, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- PointCab GmbH (2020a): Know-how: Der richtige Weg von der Punktwolke zur 3D-Modellierung und für BIM? - YouTube. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=m9M5pb9E6CU>, zuletzt aktualisiert am 25.09.2020, zuletzt geprüft am 25.09.2020.
- PointCab GmbH (2020b): PointCab – Point Cloud Software Company. Online verfügbar unter <https://www.pointcab-software.com/>, zuletzt aktualisiert am 25.09.2020, zuletzt geprüft am 25.09.2020.
- PointCab GmbH (2020c): PointCab 4Revit – Punktwolken Auswertung für Building Information Modeling. Online verfügbar unter <https://www.pointcab-software.com/module/produktseite-pointcab-4revit/>, zuletzt aktualisiert am 07.10.2020, zuletzt geprüft am 07.10.2020.
- Prognos AG; EWI; GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte - Energierferenzprognose.
- RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2020): RIEGL VZ-6000. Online verfügbar unter <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/33/>, zuletzt aktualisiert am 23.09.2020, zuletzt geprüft am 23.09.2020.
- Schnabel, Ruwen; Wahl, Roland; Klein, Reinhard (2007): Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection. In: *Computer Graphics Forum* 26 (2), S. 214–226.

- Schwarz, Willfried (2017): Ingenieurgeodäsie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- SketchUp (2020): Turn point clouds into 3D models with Scan Essentials. Online verfügbar unter <https://blog.sketchup.com/article/turn-point-clouds-into-3d-models-with-scan-essentials>, zuletzt aktualisiert am 06.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.
- Trimble (2020): Trimble RealWorks | Trimble Geospatial. Online verfügbar unter <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-realworks>, zuletzt aktualisiert am 02.10.2020, zuletzt geprüft am 06.10.2020.
- TU Dresden (2020): Image Matching / Structure from Motion (SfM). Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/studium/materialien/software_sfm, zuletzt aktualisiert am 12.09.2020, zuletzt geprüft am 12.09.2020.
- University of Edinburgh (2020): Scan-vs-BIM | CyberBuild Research Laboratory. Online verfügbar unter <https://cyberbuild.eng.ed.ac.uk/projects/scan-vs-bim>, zuletzt aktualisiert am 30.09.2020, zuletzt geprüft am 30.09.2020.
- Vo, Anh-Vu; Truong-Hong, Linh; Laefer, Debra F.; Bertolotto, Michela (2015): Octree-based region growing for point cloud segmentation. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, S. 88–100. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011.
- Walden, Martin (2015): Die Akzeptanz von Großprojekten steigern. In: Günter Bentele, Reinhard Bohse, Uwe Hirschfeld und Felix Krebber (Hg.): Akzeptanz in der Medien- und Protestgesellschaft: Zur Debatte um Legitimation, öffentliches Vertrauen, Transparenz und Partizipation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 325–336.
- Wang, Qian; Guo, Jingjing; Kim, Min-Koo (2019): An Application Oriented Scan-to-BIM Framework. In: *Remote Sensing* 11 (3), S. 365. DOI: 10.3390/rs11030365.
- Wiedemann, Albert (2004): Handbuch Bauwerksvermessung. Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning. Basel: Birkhäuser Basel (Bauhandbuch).
- Witte, Bertold; Sparla, Peter; Blankenbach, Jörg (2020): Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik. 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Wichmann.

Wujanz, Daniel; Gielsdorf, Frank; Romanschek, Enrico; Clemen, Christian (2019): Ebenenbasiertes Baufortschrittsmonitoring unter Verwendung von terrestrischen Laserscans. In: 18. Oldenburger 3D-Tage: Optische 3D-Messtechnik - Photogrammetrie - Laserscanning. Oldenburg.

Xu, Yusheng (2019): Reconstruction of building objects from point clouds of built environment and construction sites. Dissertation. Technische Universität München, zuletzt geprüft am 30.07.2020.