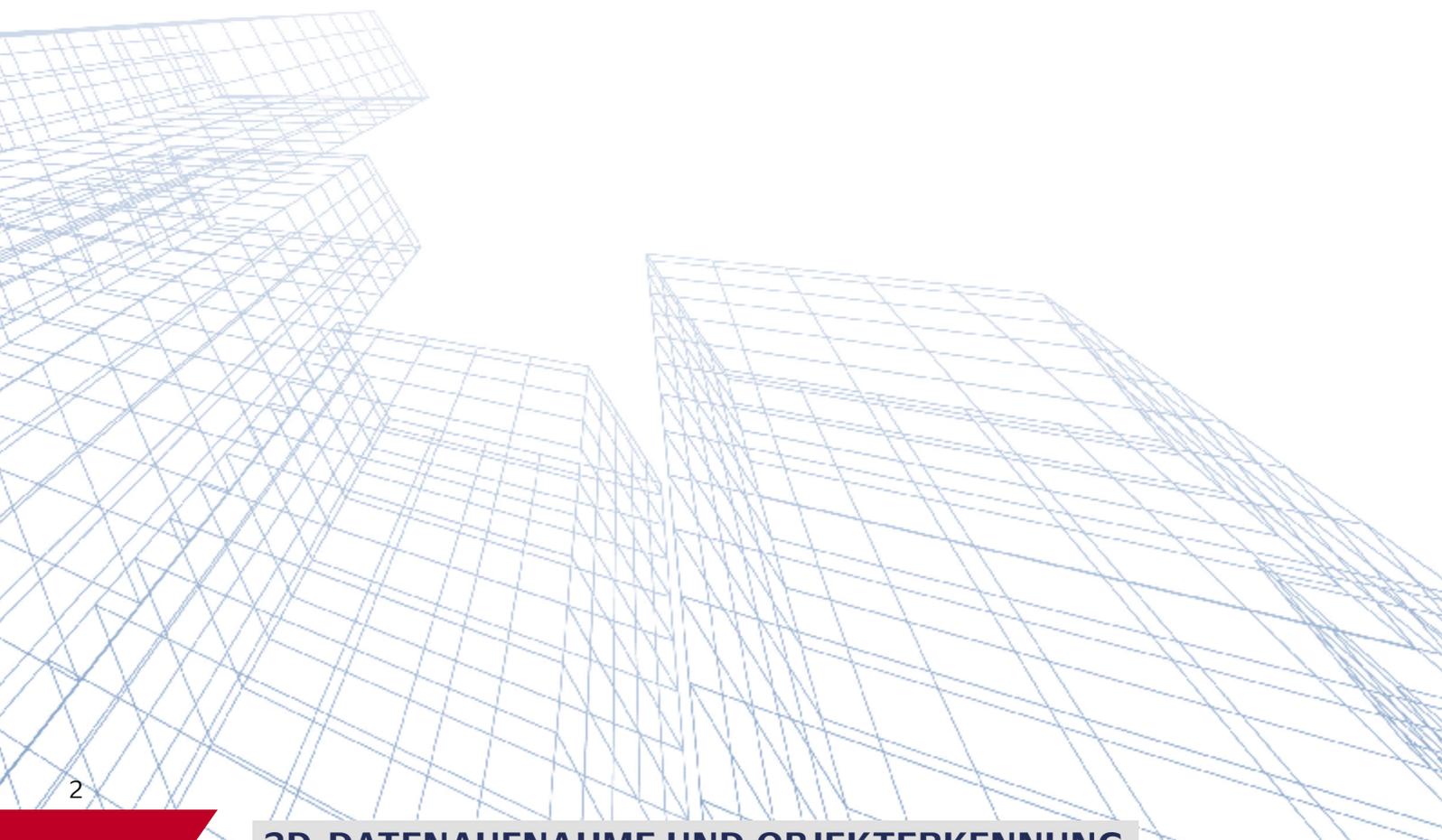




**3D-DATENAUFNAHME UND
OBJEKTERKENNUNG AUF
BAUSTELLEN UND IN GEBÄUDEN**

TU Hamburg – Institut für Technische Logistik



Inhaltsverzeichnis

Grußwort	4
Management Summary	5
1. Einleitung	6
Kontext: BIM	6
Motivation: 3D-Vermessung und Objekterkennung	7
Ziel der Kurzstudie	7
2. Wissenschaftlicher und praktischer Hintergrund	8
3D-Datenaufnahme	8
Terrestrisches Laserscanning	8
Kinematisches Laserscanning / Mobile Mapping	10
Objekterkennung	10
3. Ergebnisse: Vergleich und Qualifikation von Messgeräten zur 3D-Datenaufnahme	12
3.1 Methodisches Vorgehen	12
3.2 Betrachtete Messgeräte	13
Artec Ray	16
FARO Focus S 70 (und Focus S 350)	18
Leica Geosystems RTC360	20
Zoller + Fröhlich Z+F IMAGER 5016	22
Exkurs: Kinematisches Laserscanning / Mobile Mapping – GeoSLAM, NavVis und Ausblick	24
3.3 Analyse und Diskussion	25
4. Ergebnisse: 3D-Vermessung einer Büroumgebung	26
4.1 Methodisches Vorgehen	26
4.2 Aufgenommene Punktwolken und Darstellung der Vergleiche	28
4.3 Analyse und Diskussion	35
5. Ergebnisse: Objekterkennung in 3D-Daten	36
5.1 Methodisches Vorgehen	36
5.2 Erkennung von Böden, Wänden und Türen	37
5.3 Analyse und Diskussion	39
6. Handlungsempfehlungen	40
7. Zusammenfassung und Fazit	41
Literaturverzeichnis	42
Impressum	43

Grußwort

Bauen ist naturgemäß dreidimensional, doch Jahrtausende lang basierte das Errichten von Gebäuden, ganz gleich, ob es sich um eine Stadtmauer oder um die ägyptischen Pyramiden handelte, auf zweidimensionalen Daten: Zahlen, Berechnungen, Zeichnungen. Noch vor wenigen Jahren war dreidimensionale Objekterkennung,



Datenaufnahme und Datenverarbeitung bestenfalls in Science-Fiction-Filmen zu bewundern – zu groß erschien der Bedarf an Rechenleistung und Speicherplatz vor dem Hintergrund der damaligen Möglichkeiten. Inzwischen hat der Fortschritt der Computertechnik die Digitalisierung auch und gerade in allen Phasen von Bauprojekten immens vorangebracht. Über welche praktischen Eigenschaften die verschiedenen Systeme verfügen, darüber berichtet die hier vorgelegte Studie, die zweifellos auf großes Interesse der Fachwelt stoßen wird.

Zumal solche faszinierenden neuen 3D-Techniken kein spielerischer Selbstzweck sind, sondern vor allem der stark nachgefragten Beschleunigung von Bauvorhaben dienen können. Schnellere Prozesse wiederum nutzen allen: in erster Linie den Menschen, die eine Wohnung oder Gewerberäume suchen und sich über Neubauten freuen. Ebenso verkürzen schlankere, dabei vielseitig einsetzbare Verfahren die Bearbeitungszeiten und sparen so Steuergelder. Dass sich wiederum die ausführenden Unternehmen über exakte Daten aus drei Dimensionen freuen, liegt auf der Hand. Obendrein lassen sich eines Tages anhand der 3D-Daten Gebäude jeglicher Art noch lange nach ihrer Fertigstellung leichter verwalten, instand halten und modernisieren – ein Vorteil, der sozusagen in die vierte Dimension, nämlich in die Zukunft reicht.

Ich wünsche Ihnen eine spannende Lektüre dieser aufschlussreichen Studie und danke allen Beteiligten der TU Hamburg und der Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen für ihre verdienstvolle Arbeit.

Dr. Dorothee Stapelfeldt



Senatorin für Stadtentwicklung und Wohnen

Management Summary

Diese Kurzstudie stellt Geräte zur 3D-Datenaufnahme vor und testet ein ausgewähltes Messgerät exemplarisch zur 3D-Vermessung einer Büroumgebung. Auf Grundlage der erzeugten 3D-Messdaten werden Anwendungsprogramme zur automatisierten Objekterkennung erprobt, welche die Erstellung und Aktualisierung von Modellen im Building Information Modeling (BIM) vereinfachen und beschleunigen sollen.

Der Prozess des BIM fußt auf der transparenten, gemeinsamen Nutzung eines digitalen Gebäudemodells durch alle Planer*innen und Gewerke für den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung ist, dass Änderungen am realen Gebäude stets im digitalen BIM-Modell nachgeführt werden. Dieser zeit- und arbeitsaufwändige Prozess besteht jedoch zum großen Teil aus manuellen Tätigkeiten. Hierbei verspricht der Einsatz von 3D-Messgeräten im Zusammenhang mit intelligenten Verfahren der Objekterkennung, die Anwender*innen bei der Erstellung oder Anpassung von BIM-Modellen zu unterstützen.

Terrestrische Laserscanner erzeugen 3D-Messungen auf Basis einer hohen Anzahl einzelner Distanzmessungen mithilfe eines Lasers. Sie stellen aktuell einen guten Kompromiss aus Anschaffungspreis, Datenqualität und Flexibilität bei der Nutzung dar. Geräte verschiedener Hersteller*innen unterscheiden sich vor allem im Preis, in der Reichweite, im maximalen Detailgrad der Messdaten sowie in der Messgeschwindigkeit. Das Zusammenfügen mehrerer 3D-Messungen zu einer größeren Gesamtmessung erfolgt in vielen Fällen automatisiert. Die Entfernung fehlerhafter Messpunkte, zum Beispiel aufgrund von reflektierenden Oberflächen, muss weiterhin manuell durchgeführt werden.

Die getesteten Softwarelösungen zur Objekterkennung erlauben noch keine automatisierte Detektion von Objekten wie Wänden, Fenstern oder Türen in den Messdaten. Die Anwender*innen werden aber bei der BIM-Modellierung unterstützt, indem einfache Geometrien aus den 3D-Messdaten abgegriffen, Wände angeglichen oder vorhandene Tür- und Fenstermodelle eingepasst werden können.

Es wird empfohlen, die technischen Entwicklungen auf diesem Gebiet zu verfolgen und regelmäßig den aktuellen Stand der Anwendungssoftware aber auch der angebotenen Messgeräte zu evaluieren. Interessante Entwicklungen finden sich beispielsweise im Bereich handgeführter 3D-Sensoren, zu denen mittlerweile auch Smartphones und Tablets zählen.

1. Einleitung

Kontext: BIM

Sensoren zur Aufnahme von 3D-Daten werden heutzutage in den verschiedensten Bereichen eingesetzt: Zur Umfeldwahrnehmung an autonomen Fahrzeugen, zur Dokumentation von Denkmälern, aber auch zunehmend im Bauwesen. Hier finden sich insbesondere im Kontext des BIM vielversprechende Anwendungsfälle in der Bauprüfung oder als Hilfsmittel bei der Modellierung.

BIM beschreibt einen ganzheitlichen Ansatz der Planung, des Baus, aber auch des Betriebs von Gebäuden. Wesentlicher Aspekt ist die gemeinsame Nutzung eines digitalen Gebäudemodells durch alle Beteiligten. Ein BIM-Modell kann neben geometrische Daten zusätzlich verschiedenste Informationen zu im Gebäude verbauten Materialien und Komponenten umfassen.

Die Verwendung eines gemeinsamen Modells bringt einige Vorteile mit sich: Änderungen stehen frühzeitig allen Beteiligten zur Verfügung, sodass Entscheidungen stets auf Grundlage des aktuellen Planungsstands getroffen werden können. Eine kontinuierliche Prüfung des Gesamtbaus wird ermöglicht, sowohl als Integrationsprüfung vor Baubeginn als auch zur Überprüfung der korrekten Ausführung beziehungsweise des As-built-Zustands nach (Teil-)Fertigstellung. Renovierungs- und Instandhaltungsarbeiten lassen sich basierend auf aktuellen Gebäudedaten im Vorwege planen. Hieraus kann nicht nur im Bau eine Zeit- und Kostenersparnis folgen, sondern über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes.

Notwendige Bedingung ist, dass ein BIM-Modell jederzeit den realen Zustand des Gebäudes korrekt abbildet. Änderungen oder Abweichungen, auch nach Fertigstellung des Baus, müssen fortlaufend im BIM-Modell nachgeführt werden.

Sofern ein Neubau bereits nach der BIM-Methode geplant und umgesetzt wird, entsteht das digitale BIM-Modell parallel zum physischen Gebäude und wird, im Idealfall, nach Fertigstellung dem Betreiber zur weiteren Nutzung und Pflege übergeben. Für Bestandsbauten stehen BIM-Modelle in der Regel nicht zur Verfügung und müssen nachträglich erstellt werden, wenn die Vorteile der BIM-Methode im Betrieb genutzt werden sollen.

Weitere Informationen zum Thema finden sich unter anderem bei Borrmann et al. (2015).

Motivation: 3D-Vermessung und Objekterkennung

In beiden Fällen, der Anpassung vorhandener BIM-Modelle sowie der Neuerstellung von BIM-Modellen für Bestandsbauten, lassen sich die durchzuführenden Prozesse durch den Einsatz von 3D-Messgeräten vereinfachen und beschleunigen. Ein 3D-Aufmaß liefert eine direkte Aufnahme des As-built-Zustands. Manuelle Streckenmessungen vor Ort oder eine nachträgliche Digitalisierung von Bauplänen entfallen.

Für den Einsatz auf Baustellen oder in Gebäuden empfehlen sich vor allem zwei Messverfahren: Terrestrisches Laserscanning und kinematisches Scanning beziehungsweise Mobile Mapping. Terrestrische Laserscanner vermessen von diskreten Standorten aus kugelförmig die Umgebung mithilfe abgelenkter Laserstrahlen. Beim Mobile Mapping erfolgt die Datenaufnahme aus der Bewegung heraus, ebenfalls mit auf Lasern basierten Sensoren. Ergebnis ist jeweils ein 3D-Modell der Umgebung, bestehend aus einer Vielzahl einzelner Messpunkte, sogenannte Punktwolken. Diese Daten können dann als Hilfsmittel zum Aufbau digitaler BIM-Modelle genutzt werden. Semantische Informationen über die vermessenen Objekte sind in diesen Daten jedoch nicht vorhanden. Objekte müssen manuell in den Daten erkannt bzw. Objektbeschreibungen manuell in den Modellen annotiert werden.

Ziel der Kurzstudie

Die vorliegende Kurzstudie bietet einen Überblick zur 3D-Datenaufnahme auf Baustellen und in Gebäuden. Kommerziell erhältliche Messsysteme verschiedener Hersteller*innen werden vorgestellt und bezüglich der Nutzung und der erreichbaren Datenqualität verglichen. Schwerpunkt ist insbesondere auch ein Vergleich der unterschiedlichen Vorgehens- und Arbeitsweisen von der Datenaufnahme bis hin zur fertiggestellten Punktwolke. Hierzu werden sechs verschiedene Geräte im Rahmen praktischer Demonstrationen getestet.

Ausgehend von den erzielten Testergebnissen wird ein Messsystem ausgewählt und in einem realen Anwendungsszenario erprobt. Die aufgenommenen Daten sowie dabei gewonnene Erfahrungen werden dargestellt und analysiert. Weiterhin werden auf Basis der erhobenen Messdaten exemplarisch Verfahren zur automatisierten Erkennung von Objekten mittels eines Beispiels diskutiert und evaluiert.

2. Wissenschaftlicher und praktischer Hintergrund

3D-Datenaufnahme

Ziel einer 3D-Datenaufnahme ist die räumliche Vermessung von Gebäuden, Außenbereichen, technischen Anlagen oder anderer Objekte. Typische Anwendungsfälle sind beispielsweise die Erstellung von 3D-Modellen zur Visualisierung, die Tatortaufnahme, Konstruktion, Denkmalpflege, Bauprüfung und -dokumentation oder, wie in der Einleitung dargestellt, die Nutzung im Kontext der Erstellung und Anpassung von BIM-Modellen.

Für die technische Umsetzung von 3D-Messgeräten kommen verschiedene Sensoren und Messverfahren zum Einsatz. Die beiden für das Aufmaß von Baustellen und Gebäuden relevantesten Technologien und Verfahren, terrestrisches Laserscanning und kinematisches Laserscanning / Mobile Mapping werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Terrestrisches Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning (TLS) beschreibt ein bodengebundenes, aktives, berührungsloses Messverfahren, welches einen abgelenkten Laser zur Durchführung von Distanzmessungen nutzt. Die zugehörigen Messgeräte werden als terrestrische Laserscanner oder weitläufig auch als (3D-) Laserscanner bezeichnet. Im Zusammenhang mit der eigentlichen Messeinrichtung finden sich ebenfalls häufig die Begriffe Light Detection and Ranging (LiDAR) oder Elektronische Distanzmessung (EDM).

Messungen erfolgen von einer statischen Position aus. Der Laserscanner tastet seine Umgebung mithilfe eines Laserstrahls in regelmäßigen Winkelsegmenten ab. Die dafür notwendige Bewegung besteht aus Drehungen um zwei Raumachsen. Um die vertikale Drehachse lenkt ein rotierender Spiegel den Laserstrahl ab, die horizontale Drehung wird durch das Rotieren des Laserscanners selbst beziehungsweise dessen Gehäuses umgesetzt. Folglich deckt der erreichbare Messbereich in der horizontalen Ebene volle 360 Grad ab, in der vertikalen Ebene ist der Messbereich nach unten durch das Gehäuse des Laserscanners beschränkt (siehe Abbildung 2.1). Da durch den vertikal abgelenkten Laserstrahl sowohl die Bereiche vor als auch hinter dem Laserscanner erfasst werden, ist für eine vollständige Messung sogar nur eine Rotation des Gehäuses um 180 Grad erforderlich.

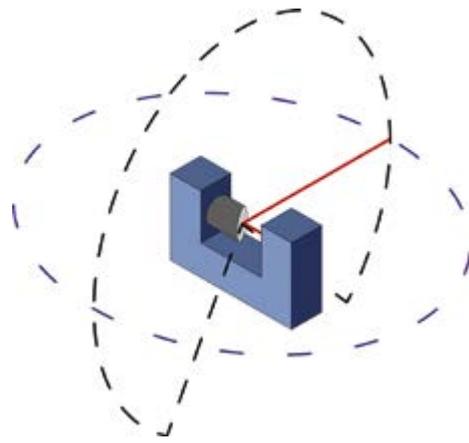


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines terrestrischen Laserscanners

Jeder erfasste Messwert besteht aus der gemessenen Distanz, ergänzt um beide Rotationswinkel. Zusätzlich wird die Intensität des reflektierten Laserlichts gemessen. Unabhängig von einer verbauten RGB-Farbkamera entstehen so bereits Panoramabilder in Graustufen beziehungsweise grau einfärbbare Punktwolken. Viele Laserscanner sind mit einer oder mehreren RGB-Kameras ausgestattet, um farbige Panoramaaufnahme bzw. eingefärbte Punktwolken zu erstellen.

Die Auflösung eines Scans legt fest, in welchem Winkelabstand (horizontal und vertikal) zwei über- oder nebeneinanderliegende Messungen erfolgen. Damit beeinflusst die Auflösung, wie dicht das Punkteraster ist, mit welchem die Objekte beziehungsweise Oberflächen in der Umgebung des Laserscanners abgetastet werden. Je größer die Auflösung, desto mehr Details werden erfasst. Gleichzeitig spielt der Abstand des Laserscanners zum Objekt eine entscheidende Rolle. Bei festem Winkelabstand ist das Raster umso engmaschiger, je dichter sich die abgetastete Oberfläche befindet. Zu beachten ist auch eine mit der Entfernung zunehmende Aufweitung des Laserstrahls. In der Praxis ist die einzustellende Auflösung abhängig von den zu erfassenden Details sowie von den vorherrschenden Abständen. Eine hohe Auflösung ist insbesondere dann von Vorteil, wenn auch in großer Entfernung noch detaillierte Daten erhoben werden sollen. Mit der Anzahl der Messpunkte steigen jedoch auch der Zeit- und Speicherbedarf für eine Messung.

Wenn größere Objekte oder Gebäude vermessen werden sollen, ist die Verwendung einer einzelnen Messposition zumeist nicht ausreichend. Dabei spielt nicht nur die mit der Entfernung abnehmende Dichte des Punkterasters eine Rolle, sondern auch Abschattungen oder Verdeckungen im Sichtfeld einer Messposition. Daher setzt sich eine Gesamtmessung in der Regel aus mehreren Einzelmessungen zusammen. Der Prozess des Zusammenfügens der einzeln aufgenommenen Punktwolken zu einer gesamten Punktwolke ist die Registrierung. Hierfür stellen die Hersteller*innen der Laserscanner spezifische Softwarelösungen bereit. Bereits bei der Vermessung ist darauf zu achten, dass die einzelnen Punktwolken eine ausreichend große Überlappung aufweisen, damit eine Registrierung möglich ist.

Detailliertere und darüber hinausgehende Informationen zum Thema Laserscanning finden sich unter anderem bei Mettenleiter et al. (2015).

Kinematisches Laserscanning / Mobile Mapping

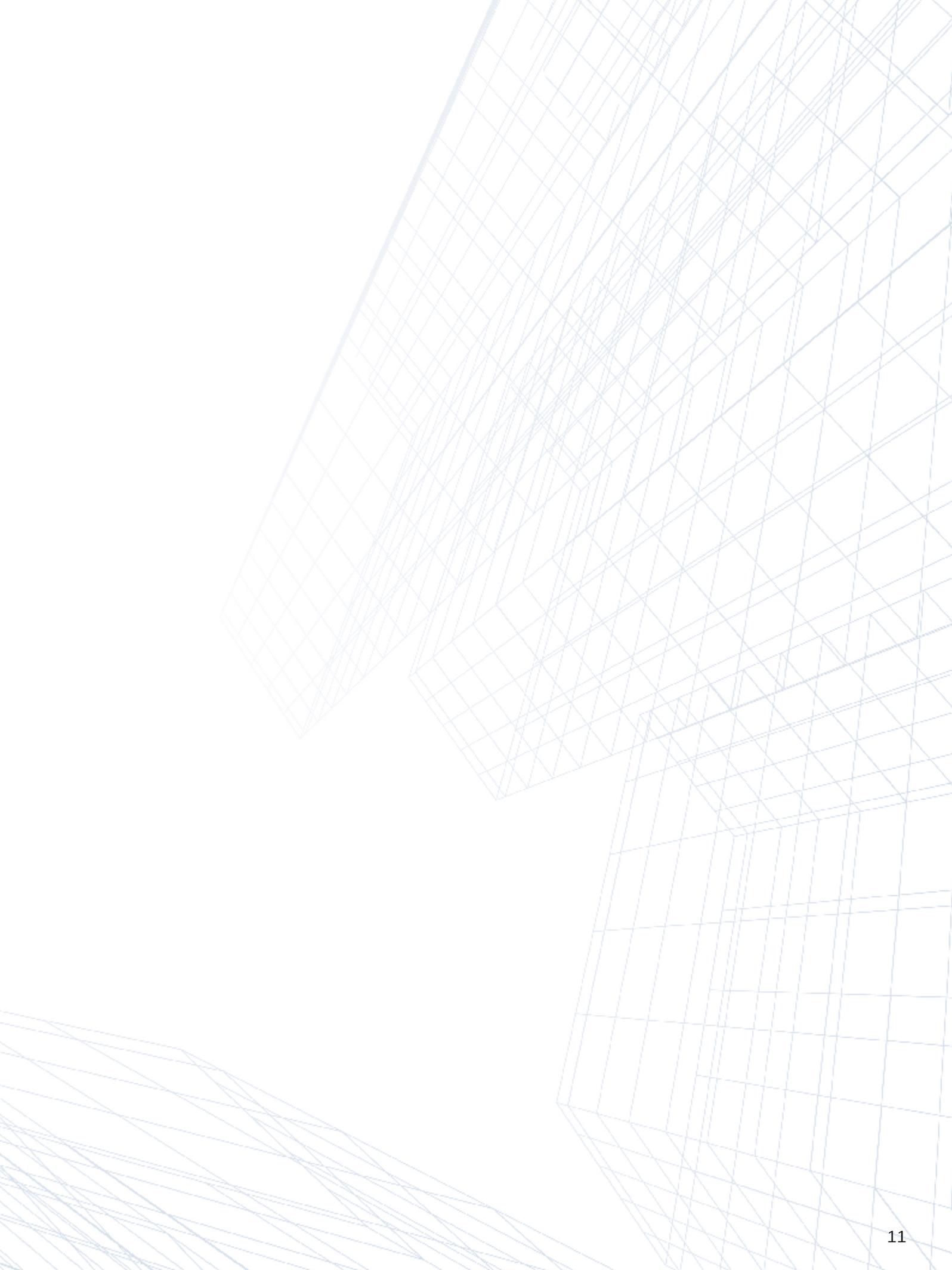
Während die Datenaufnahme beim terrestrischen Laserscanning von diskreten Standorten aus erfolgt, beschreibt das kinematische Laserscanning bzw. Mobile Mapping eine 3D-Datenaufnahme aus der Bewegung heraus. Der dabei genutzte Laser wird hierbei häufig nur um eine Raumachse abgelenkt oder rotiert. Die Vermessung einer dreidimensionalen Umgebung erfolgt dann durch das Bewegen dieser 2D-Messebene durch den Raum. Innerhalb der Messebene des Laserscanners ist die erzielte Auflösung allein durch dessen Winkelinkrement festgelegt. Die bei der 3D-Vermessung erzielte Auflösung hängt maßgeblich von Art und Geschwindigkeit der Bewegung ab. Je schneller der Laserscanner bewegt wird, desto geringer ist die Dichte des Punkterasters auf den abgetasteten Oberflächen. Durch die kontinuierliche Datenaufnahme ist eine nachträgliche Registrierung der Messungen nicht erforderlich. Allerdings setzt das kinematische Laserscanning voraus, dass die Bewegung des Messgeräts im Raum hochgenau erfasst wird. Ungenauigkeiten hierbei wirken sich negativ auf die Datenqualität aus. Hinzu kommt, dass selbst bei genauer Messung dieser Bewegung stets die Gefahr eines Drifts besteht, also der stetigen Abweichung durch Kumulation kleinster Messfehler. Neben Lasern können in Mobile Mapping Systems (MMS) auch andere Sensoren genutzt werden, welche in der Lage sind, Entfernungs- beziehungsweise Tiefendaten zu nutzen.

Weitere Informationen zum Thema Mobile Mapping sind unter anderem bei Schwarz (2017) aufgeführt.

Objekterkennung

Mit Objekterkennung wird im Rahmen dieser Kurzstudie die Identifikation von Objekten in aufgenommenen Messdaten bezeichnet. Eine Objekterkennung ergänzt die Messdaten (Entfernungen, Farbwerte) durch semantische Informationen. Im Idealfall ist für jeden einzelnen Messpunkt bekannt, zu welcher Objektklasse oder Objektinstanz dieser gehört, also ob ein Messpunkt Teil einer Wand, einer Treppe oder eines Heizkörpers ist. Weiterhin ist im Kontext von BIM auch Bereichen ohne Messpunkte eine semantische Bedeutung zuzuordnen, wenn es sich zum Beispiel um Fenster- oder Türöffnungen handelt. Ziel des Einsatzes einer Objekterkennung ist es, den manuellen Aufwand der Modellierung deutlich zu verringern.

Aufgrund der Aktualität und Dynamik des Themas Objekterkennung in 3D-Daten wird nur beispielhaft auf relevante Veröffentlichungen verwiesen. Themenfelder mit BIM-Kontext sind beispielsweise die Erkennung von Wänden, Räumen und Grundrissen (vgl. S. Murali et al. 2017; Gankhuyag und Han 2020), aber auch die Erkennung weiterer Gegenstände der Inneneinrichtung (vgl. Han et al. 2020).



3. Ergebnisse: Vergleich und Qualifikation von Messgeräten zur 3D-Datenaufnahme

Am Markt existieren verschiedene Messgeräte zur Aufnahme von 3D-Daten, die laut den technischen Datenblättern ähnliche Leistungsmerkmale aufweisen. Um zu evaluieren, wie sich diese Geräte in der Datenqualität aber auch in der Bedienung unterscheiden, wurden sechs Hersteller*innen um Demonstrationen am Institut für Technische Logistik der TU Hamburg gebeten. Der folgende Abschnitt stellt die einzelnen Geräte vor und fasst die Erkenntnisse der Demonstrationen vergleichend zusammen.

3.1 Methodisches Vorgehen

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der bei den Demonstrationen aufgenommenen Messdaten zu erreichen, wurde eine über die Termine hinweg feste Position in der Halle markiert. Kriterien für die Auswahl der Position waren unter anderem, dass Ausdrücke mit Testmustern in ausreichendem Abstand angebracht werden konnten. Außerdem sollte ein möglichst großes Spektrum verschiedener Oberflächen und Objekte im erfassten Messbereich liegen. Abbildung 3.1 zeigt die gewählte Position im Grundriss. Technologiebedingt ist diese Position insbesondere für einen Vergleich der terrestrischen Laserscanner relevant.



Abbildung 3.1: Scan-Position für Testaufnahmen in der Versuchshalle des Instituts für Technische Logistik, TU Hamburg (blaue Markierung)



Abbildung 3.2: Übersicht: Versuchshalle des Instituts für Technische Logistik, TU Hamburg (Ausschnitt aus der mit dem FARO Focus S 350 aufgenommenen Punktwolke)

Ein Ausschnitt aus einer aufgenommenen Punktwolke (hier: aufgenommen mit dem FARO Focus S 350) ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Testmuster sind im unteren Feld des Palettenregals zu erkennen.

Zur Beurteilung und zum Vergleich der Bedienung wurde der typische Ablauf einer Messung von Vertriebsmitarbeiter*innen oder -partner*innen der jeweiligen Sensorhersteller*innen demonstriert. Dies beinhaltete sowohl die eigentliche 3D-Vermessung als auch die anschließende Verarbeitung der Messdaten in der mitgelieferten Software. Mithilfe der bereitgestellten Messdaten wurde die Registrierung und Datenverarbeitung anschließend noch einmal detailliert in der jeweiligen Software nachvollzogen.

Für einen Vergleich der aufgenommenen Daten wurden ausgewählte Bereiche der Instituts-halle inklusive der Testmuster in den Punktwolken sowie in den RGB-Panoramaaufnahmen verglichen.

3.2 Betrachtete Messgeräte

Die Auswahl der zu testenden Messgeräte wurde auf Basis einer umfassenden Onlinerecherche erstellt. Im Feld der terrestrischen Laserscanner wurden vier Geräte am Institut demonstriert. Die Hersteller*innen und Modellbezeichnungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Tabelle 3.1: Hersteller*in und Modellbezeichnung der betrachteten terrestrischen Laserscanner.

Hersteller*in	Modell
Artec 3D	Ray
Faro Technologies	Focus S 70 bzw. S 350
Leica Geosystems	RTC360
Zoller+Fröhlich (Z+F)	IMAGER 5016

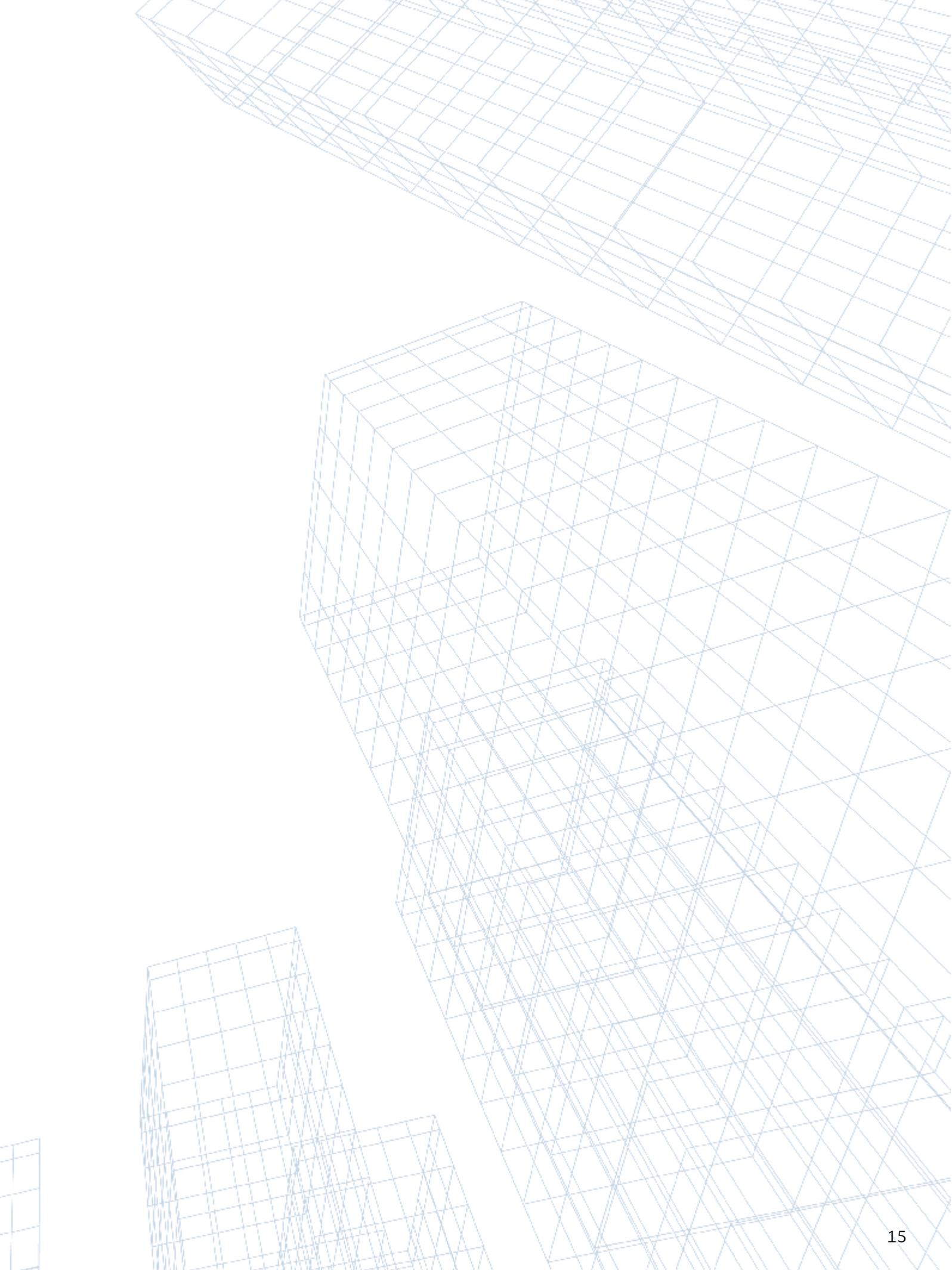
Die Hersteller*innen Riegl und LIMESS wurden nicht für die Auswahl berücksichtigt. Geräte der Hersteller*in Riegl schienen mit Reichweiten ab 800 m bis zu 6000 m für das Vermessen von Innenräumen überdimensioniert. Die Hersteller*in LIMESS vertreibt ihre Laserscanner Surphaser 10 inzwischen als Artec Ray. Dieser ist in der Auswahl enthalten. Die Hersteller*in Trimble konnte nicht zur Absprache einer Demonstration erreicht werden. Eine Rückmeldung erfolgte erst nach Abschluss der Tests.

Zusätzlich zu den terrestrischen Laserscannern wurden drei Mobile-Mapping-Lösungen am Institut demonstriert. Tabelle 3.2 führt die Hersteller*innen und Modellbezeichnungen auf.

Tabelle 3.2: Hersteller*innen und Modellbezeichnungen der betrachteten Mobile-Mapping-Lösungen.

Hersteller*in	Modell
GeoSLAM	ZEB HORIZON
GeoSLAM	ZEB REVO RT
NavVis	M6 IMMS

Die vorgestellten Mobile-Mapping-Lösungen wurden nach den Demonstrationen als Kandidat*innen für die praktische Erprobung ausgeschlossen. Daher werden diese Geräte folgend verkürzt präsentiert. Gründe hierfür sind eine im Vergleich geringere Auflösung und Genauigkeit (Hersteller*in GeoSLAM) bzw. eine durch den Aufbau als Trolley unflexiblere Nutzung für einen ebenfalls gewünschten Baustelleneinsatz (Hersteller*in NavVis).



Artec Ray

Der Artec Ray (Abbildung 3.3) fügt sich in ein Portfolio handgeführter Scanner der Firma Artec3D ein und ergänzt deren Reichweite nach oben. Mit einem Reichweitenfehler von 0,7 mm bei 15 m Entfernung weist der Laserscanner eine sehr hohe Genauigkeit auf, dies dann aber nur in einer Entfernung von bis zu 50 m. Eine schräge Aufstellung wird auf Wunsch automatisch kompensiert. Die Bedienung ist am Gerät selber, aber auch über per WLAN oder Kabel verbundene Tablets oder Notebooks möglich. Nach einem Vorschau-Scan können Bereiche für eine genauere Aufnahme ausgewählt werden. Im Vergleich dauert die Datenaufnahme relativ lange. Weitere technische Daten sind in Tabellen 3.3 und 3.4 zusammengefasst.



Abbildung 3.3: Artec Ray (Bildquelle: Artec3D)

Tabelle 3.3: Modi und Technische Daten des Artec Ray (Artec 3D o. J.).

Technische Daten	Hohe Qualität	Hohe Empfindlichkeit
Reichweite	50 m	110 m
Reichweitenfehler	0,70 mm @ 15 m	0,90 mm @ 15 m
Reichweitenrauschen	0,12 mm @ 15 m	0,25 mm @ 15 m

Tabelle 3.4: Technische Daten des Artec Ray (Modus: hohe Qualität) (Artec 3D o. J.).

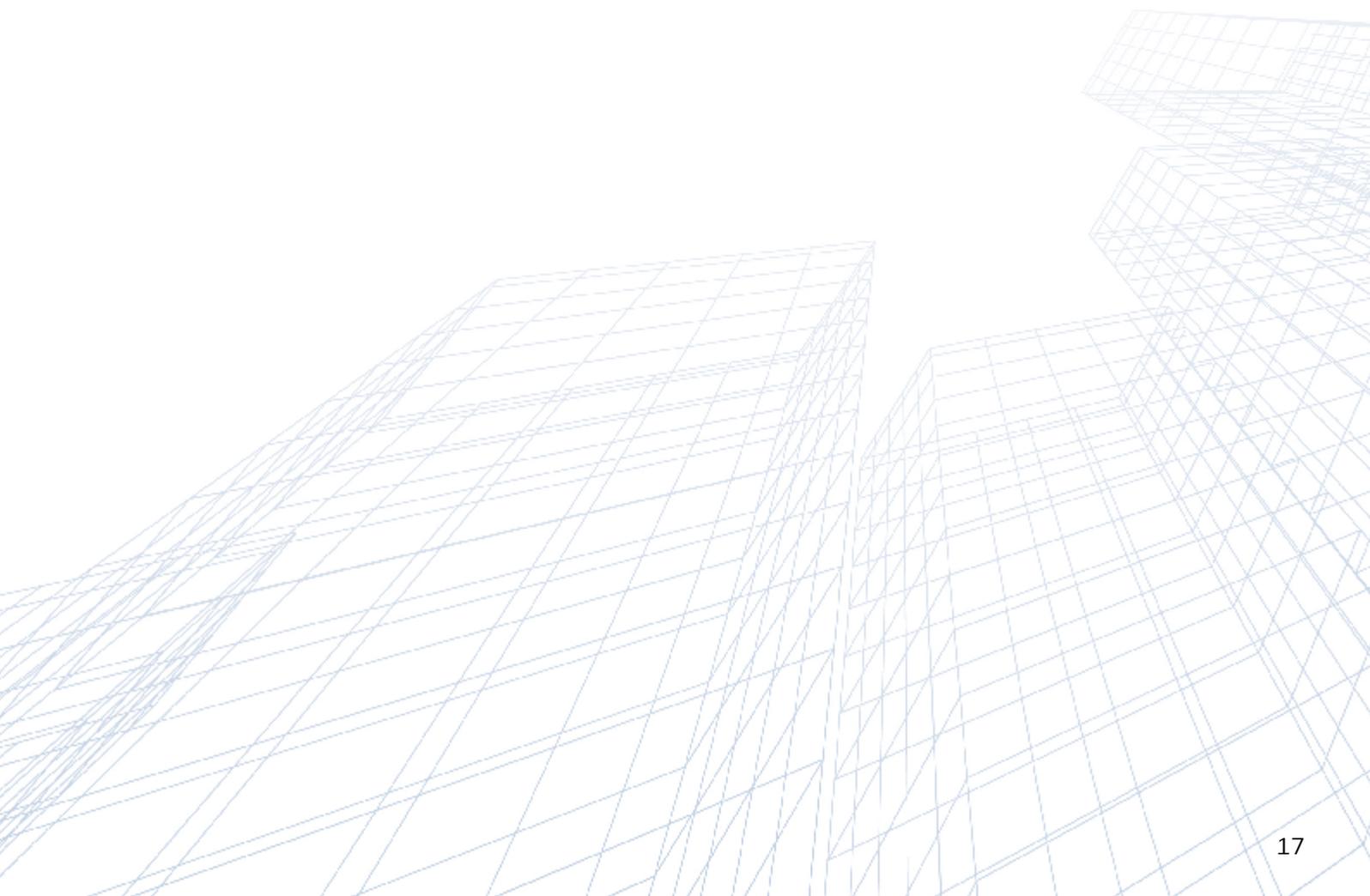
Technische Daten	
Distanzmessverfahren	Phasendifferenz
Reichweite	1 m – 0 m
Reichweitengenauigkeit	0,70 mm @ 15 m
Distanzrauschen	0,12 mm @ 15 m
3D-Punktgenauigkeit	keine Angaben
Messrate	208 000 Punkte/s
Auflösung RGB-Kamera	2 x 5 MP

Die bereitgestellte Software Artec Studio scheint insbesondere für den Bereich der Erstellung digitaler Oberflächen-Modelle geeignet zu sein. Da die Punktwolke nicht eingefärbt werden konnte, war die Navigation in den Messdaten im Vergleich schwieriger. Ein Einsatz für die Bearbeitung umfangreicherer Scan-Projekte sollte vorher geprüft werden.

Im Rahmen der Demonstration sowie im Nachgang konnte keine Einfärbung der Punktwolke umgesetzt werden. Ein Export der Panoramaaufnahmen war ebenfalls nicht möglich. Folgend ist daher ein Grauwert-Panorama dargestellt (Abbildung 3.4)



Abbildung 3.4: Panorama-Aufnahme: Artec Ray.



FARO Focus S 70 (und Focus S 350)

Die Laserscanner der Focus Serie von FARO sind als drei Modelle erhältlich, die sich lediglich in der maximalen Reichweite unterscheiden. Für die Verwendung in Innenräumen wäre ein Modell Focus S 70 ausreichend, demonstriert wurde das ansonsten baugleiche Modell Focus S 350 (Abbildung 3.5). Der Laserscanner weist eine gute Genauigkeit bei annehmbarer Scan-Dauer auf. Eine digitale Libelle hilft bei der Ausrichtung des Laserscanners, verbleibende Abweichungen reduziert der verbaute Zweiachskompensator. Zu scannende Bereiche können in Grad festgelegt oder nach einem Vorschau-Scan grafisch ausgewählt werden. Insgesamt lassen sich verschiedene Scan-Parameter einfach anpassen. Eine Bedienung ist am Gerät selbst oder an per WLAN verbundenen Handys und Rechnern möglich. Wird ein Rechner verbunden, können Scans bereits vor Ort registriert werden. Über einen Qualitätsregler lässt sich einstellen, ob Punkte mehrfach gescannt werden sollen, um eine Rauschunterdrückung durch Mittelung der Messwerte zu erreichen. Tabelle 3.5 fasst die technischen Daten zusammen.



Abbildung 3.5: FARO Focus (Bildquelle: FARO).

Tabelle 3.5: Technische Daten des Faro Focus S 70 (FARO Europe GmbH & Co. KG 2019)

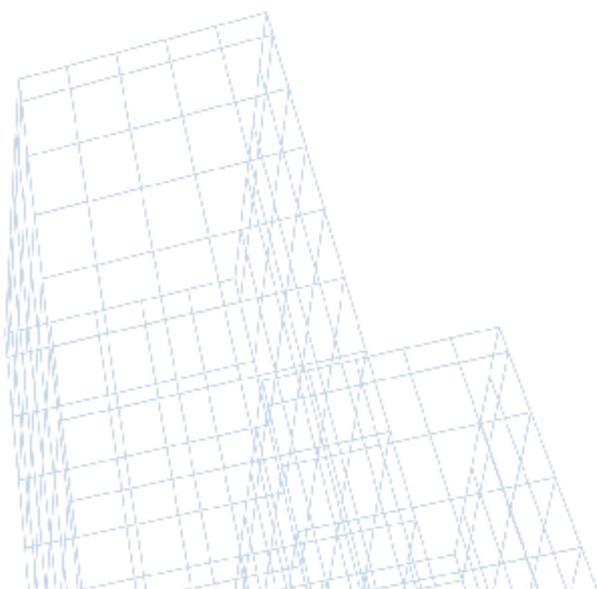
Technische Daten	
Distanzmessverfahren	Phasendifferenz
Reichweite	0,6 m – 70 m (- 350 m für Focus S 350)
Reichweitengenauigkeit	± 1 mm
Distanzrauschen	0,3 mm [10 m, 90 %]
3D-Punktgenauigkeit	2 mm @ 10 m
Messrate	122 000 – 976 000 Punkte / s
Auflösung RGB-Kamera	bis zu 165 MP (Gesamtpanorama)
Schutzklasse	IP 54

Die mitgelieferte Software FARO SCENE führt intuitiv durch die Verarbeitung der aufgenommenen Daten. Einfache Werkzeuge für Messungen in der Punktwolke sind ebenfalls enthalten. Mit einem Laser-HDR genanntem Feature lassen sich überbelichtete Bereiche der Farbaufnahmen durch die Intensitätswerte der Lasermessung ersetzen, was Strukturen in überbelichteten Bereichen auch in der Punktwolke deutlich besser sichtbar macht.

Hervorzuheben sind die Panoramaaufnahmen aufgrund der hohen Auflösung, aber auch insbesondere wegen der guten Qualität in der Darstellung von Details, siehe Abbildung 3.6.



Abbildung 3.6: Panorama-Aufnahme: FARO Focus S 350.



Leica Geosystems RTC360

Der Leica RTC360 (Abbildung 3.7) ist nach dem BLK360 der kompakteste und günstigste Laserscanner von Leica. Trotzdem zeichnet sich der Laserscanner durch die höchste Messrate unter den demonstrierten Geräten aus. Auch die Aufzeichnung der Farbaufnahmen erfolgt aufgrund der Nutzung mehrerer Kameras am schnellsten. Ob aus der Kameraposition abseits der Laserachse Parallaxefehler resultieren, die sich auf die Einfärbung der Messpunkte auswirken, konnte nicht geprüft werden. Wesentliches Merkmal ist außerdem ein einfach zu handhabender Ablauf der gesamten Messung. Den Nutzer*innen stehen nur wenige Einstellungsmöglichkeiten zur Wahl. Eine Detailmessung einzelner Bereiche wird so beispielsweise nicht unterstützt. Die Bedienung per Tablet wird empfohlen, auf diesem lässt sich der Scan-Fortschritt genau nachvollziehen. Per Visual Inertial System (VIS) genannter Technologie verfolgt der Laserscanner seine Bewegung im Raum und kann bereits vor Beginn des Scans die neue Position auf der bisher aufgenommenen Karte anzeigen lassen. Messungen lassen sich direkt vor Ort registrieren und zusammen mit den bisherigen Scans anzeigen. Die Rohdaten der Scans sind allerdings vergleichsweise groß. Weitere technische Daten sind in Tabelle 3.6 aufgeführt.



Abbildung 3.7: Leica RTC360 (Bildquelle: Leica Geosystems).

Tabelle 3.6: Technische Daten des Leica RTC360 (Leica Geosystems AG 2018).

Technische Daten	
Distanzmessverfahren	ToF, optimiert durch WFD
Reichweite	0,5 m - 130 m
Reichweitengenauigkeit	1 mm ± 10 ppm
Distanzrauschen	0,4 mm [10 m, 89 %]
3D-Punktgenauigkeit	1,3 mm @ 10 m
Messrate	bis zu 2 000 000 Punkte / s
Auflösung RGB-Kamera	bis zu 432 MP (Gesamtpanorama)
Schutzklasse	IP 54

Leica Cyclone Register 360 bietet einen einfachen Arbeitsablauf mit guter Visualisierung der durchgeführten Scans sowie der ausgeführten Registrierung. Cyclone Register 360 ist eine von mehreren Softwarelösungen von Leica Geosystems zur Be- und Verarbeitung von Punktwolken. Abbildung 3.8 zeigt eine mit dem Leica RTC360 erstellte Panoramaaufnahme.

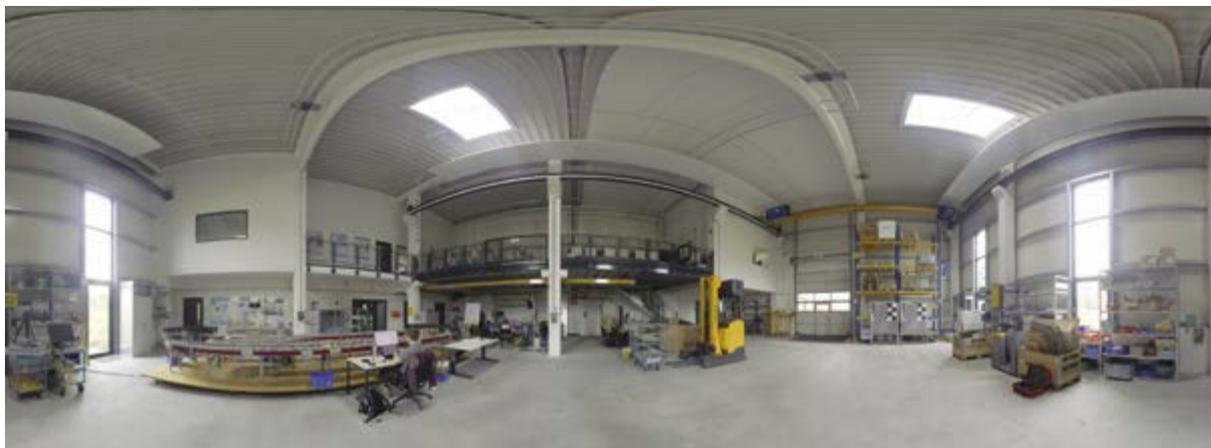
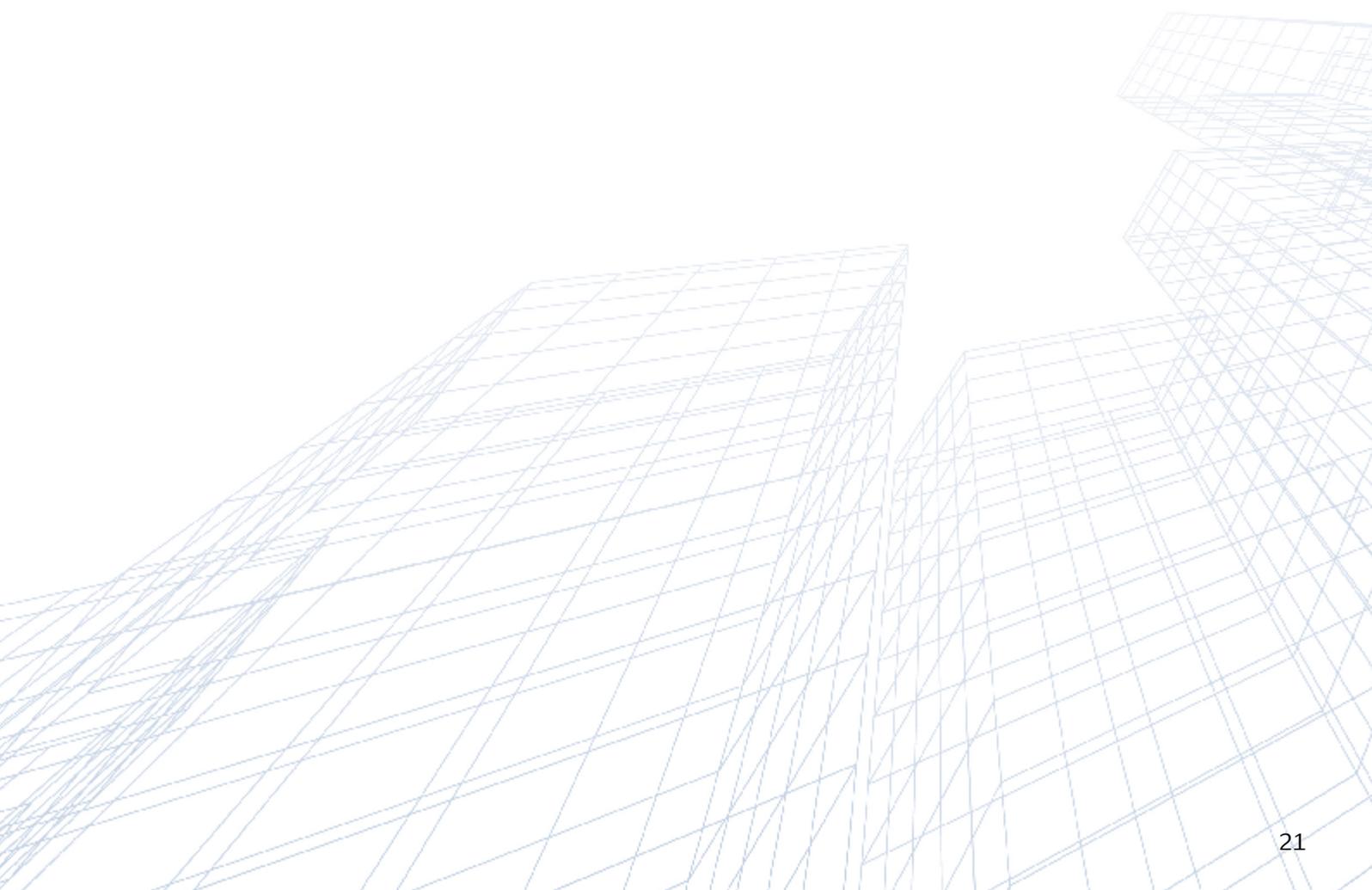


Abbildung 3.8: Panorama-Aufnahme: Leica RTC360.



Zoller + Fröhlich Z+F IMAGER 5016

Zoller + Fröhlich bietet mit dem Z+F IMAGER 5016 (Abbildung 3.9) das Gerät mit der höchsten Auflösung sowie der höchsten Reichweite unter den demonstrierten Geräten an. Der IMAGER 5016 ist allerdings auch das größte, schwerste und teuerste Messgerät im Vergleich. Über eine WLAN-Verbindung lassen sich Messdaten im Betrieb vollständig herunterladen und vor Ort registrieren. Bei der Registrierung der Punktwolken unterstützt eine Inertial Measurement Unit (IMU), die entlang einer auf dem Gerät markierten Richtung die Bewegung des Laserscanners im Raum verfolgt. Weiteres Merkmal ist die Möglichkeit, Messungen ohne Drehung des Gehäuses durchzuführen, womit sich in der nun statischen Messebene beispielsweise Zeitverläufe von Objekt-Verformungen aufnehmen lassen. Zwei Akkuschächte erlauben das Wechseln von Akkus im Betrieb. LEDs beleuchten die Umgebung des Laserscanners, falls zur Aufnahme der Farbbilder nicht ausreichend Licht vorhanden ist. Insgesamt sind die Scan-Parameter detailliert von Nutzer*innen einstellbar. Die weiteren technischen Daten sind in Tabelle 3.7 aufgeführt.



Abbildung 3.9: Zoller + Fröhlich GmbH Z+F IMAGER® 5016 (Bildquelle: Zoller + Fröhlich GmbH).

Tabelle 3.7: Technische Daten des Z+F IMAGER 5016 (Zoller + Fröhlich GmbH o. J.).

Technische Daten	
Distanzmessverfahren	Phasendifferenz
Reichweite	0,3 m - 365 m
Reichweitengenauigkeit	$\leq 1 \text{ mm} \pm 10 \text{ ppm}$
Distanzrauschen	0,2 mm rms [10 m, 80 %]
3D-Punktgenauigkeit	keine Angaben
Messrate	1 100 000 Punkte / s
Auflösung RGB-Kamera	ca. 80 MP (Gesamtpanorama)
Schutzklasse	IP 54

Die genutzte Software setzt sich aus zwei Teilen zusammen: LaserControl Scout für die Nutzung im Feld bei der Aufnahme sowie zur Registrierung und Bereinigung der Punktwolken vor Ort; LaserControl Office zur Bearbeitung und Visualisierung der Punktwolken im Nachgang. Beide Programme sind übersichtlich aufgebaut, bieten aber trotzdem eine Vielzahl an Funktionen. Für LaserControl Scout ist noch hervorzuheben, dass überbelichtete beziehungsweise übersteuerte Laseraufnahmen (wie senkrecht zu reflektierenden Oberflächen) in der Ansicht des Scans markiert werden. So lässt sich bereits vor Ort gegebenenfalls eine neue Messung durchführen.



Abbildung 3.10: Panorama-Aufnahme: Zoller + Fröhlich Z+F IMAGER 5016.

Eine Panoramaaufnahme ist in Abbildung 3.10 dargestellt.



Exkurs: Kinematisches Laserscanning / Mobile Mapping – GeoSLAM, NavVis und Ausblick

An dieser Stelle sollen kurz die drei demonstrierten Messgeräte zum kinematischen Laserscannen beziehungsweise Mobile Mapping vorgestellt sowie ein kurzer Ausblick auf weitere Technologien des Bereichs Mobile Mapping gegeben werden.

Eine bekannte Herstellerin handgeführter Laserscanner ist die Firma GeoSLAM. Bei den vorgestellten Geräten (Abbildungen 3.11 und 3.12) sind Laserscanner drehbar an einem Griff montiert. Die Messebene der Laserscanner weist vom Bediener weg und rotiert am Drehpunkt. Aufgrund der Bewegung der Benutzer*innen durch die zu vermessende Umgebung wird diese stückweise erfasst. Eine IMU ermittelt die Bewegung des Geräts und erlaubt so, einen geometrischen Zusammenhang zwischen den Einzelmessungen herzustellen. Diese Lösung ist insbesondere für unwegsames Gelände geeignet. Im Vergleich zu terrestrischen Laserscannern fallen die erzielten Punktedichten sowie die Reichweitengenauigkeit geringer aus (GeoSLAM o. J.a, o. J.b).



Abbildung 3.11: GeoSLAM ZEB HORIZON (Bildquelle: GeoSLAM).



Abbildung 3.12: GeoSLAM ZEB REVO RT (Bildquelle: GeoSLAM).



Abbildung 3.13: NavVis M6 IMMS (Indoor Mobile Mapping System) (Bildquelle: NavVis).

NavVis vertreibt mit dem M6 IMMS (Indoor Mobile Mapping System) eine mobile Scan-Lösung, die als Basis einen rollbaren Trolley nutzt (Abbildung 3.13). An diesem sind mehrere Laserscanner angebracht, die beim Verschieben des Trolleys kontinuierlich die Umgebung abtasten. Zur Erzeugung der Punktwolke ist auch hier eine Bewegungsschätzung nötig, die aufgrund der zusätzlichen Verwendung von Rädern genauer ausfallen dürfte als bei den Geräten von GeoSLAM. Mehrere Farbkameras erfassen zusammen ein komplettes Kugelpanorama. Für jede Position, an der solch ein Panorama aufgenommen werden soll, muss die Bewegung des Geräts kurz unterbrochen werden. Aufgrund des vergleichsweise hohen Anschaffungspreises sowie der Konstruktion als Trolley lohnt sich dieses Gerät besonders dann, wenn ebene, große Flächen schnell oder häufig zu vermessen sind. Zur Reduktion des Drifts lassen sich bei längeren Strecken vorher eingemessene Fixpunkte als Referenzen nutzen (NavVis GmbH o. J.). Neben den drei vorgestellten Geräten zum Mobile Mapping gibt es eine Reihe weiterer Hersteller*innen beziehungsweise Messgeräte, die zukünftig von Interesse sein könnten. Dies betrifft besonders den Bereich handgeführter Messsysteme. So bietet beispielsweise Paracosm mit dem PX-80 ein handgeführtes Messgerät an, welches mithilfe eines mehrlagigen Laserscanners Innen- und Außenbereiche aus der Bewegung heraus vermisst (Paracosm 2020). Noch kompakter sind die Geräte der Herstellerin DotProduct, wobei der Messbereich sowohl von der Entfernung als auch vom Sichtfeld her deutlich geringer ausfällt (DotProduct LLC 2020). Der Einsatz von Smartphones zur 3D-Vermessung wird seit einigen Jahren neben der Nutzung der verbauten RGB-Kameras, unter anderem auch durch das Verbauen zusätzlicher 3D-Sensoren verfolgt. Im Zusammenhang mit dem mittlerweile eingestellten Project Tango von Google veröffentlichte zum Beispiel Lenovo ein Smartphone mit zusätzlicher Time-of-Flight-Tiefenkamera (Lenovo 2017). Aktuell bietet Apple ein Tablet mit verbautem LiDAR-Sensor an (Apple Inc. 2020).

3.3 Analyse und Diskussion

Die vorgestellten terrestrischen Laserscanner unterschieden sich insbesondere in Merkmalen, welche die Flexibilität, den Komfort oder die Geschwindigkeit der 3D-Vermessung bestimmen. Bezüglich der Güte der Messdaten ergeben sich für Anwendungen im Kontext von BIM keine relevanten Unterschiede. Alle terrestrischen Laserscanner konnten die untersuchten Detailbereiche ähnlich gut abbilden. Aus diesem Grund wird auf eine weitergehende Visualisierung der Punktwolken-Messungen über Abbildung 3.2 hinaus verzichtet. Auf den erstellten Panoramaaufnahmen sind Unterschiede in der Wiedergabe kleiner Details zu erkennen. Zur Einfärbung von Punktwolken oder zur Begutachtung von Details einer 3D-Vermessung, losgelöst von der eigentlichen Punktwolke, dürften die ermittelten Unterschiede keine entscheidende Rolle spielen.

Ein wichtiges Merkmal für den Einsatz auf Baustellen ist der Schutz der Laserscanner vor Staub und Spritzwasser sowie ein weiter Temperatur-Einsatzbereich. Faro, Leica und Zoller + Fröhlich geben die Schutzklasse IP 54 an. Bei Artec lassen sich keine Angaben bezüglich einer Schutzklasse finden.

Für die praktische Erprobung einer 3D-Vermessung im nächsten Abschnitt wird der FARO Focus gewählt. Er stellt einen guten Kompromiss aus Anschaffungspreis, Geschwindigkeit der Datenaufnahme, Umfang von Zusatzfunktionen sowie einer intuitiv nutzbaren Software für die Nachbereitung der Punktwolken dar.

4. Ergebnisse: 3D-Vermessung einer Büroumgebung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden vier ausgewählten Laserscanner im Rahmen kurzer Demonstrationen erprobt. Um eine 3D-Datenaufnahme inklusive der nachgelagerten Bearbeitungsschritte an einem umfangreicheren, praktischen Anwendungsfall nachzuvollziehen, wurde die 3D-Vermessung einer Büroumgebung durchgeführt. Als Beispiel diente hierbei ein Gebäudeabschnitt der Hamburger Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) im Stadtteil Wilhelmsburg. Der Gebäudeabschnitt schließt insgesamt neun Büroräume, einen Besprechungsraum und einen verbindenden Gang mit Sitzecke ein. Die einfach gekrümmte Fassade des Gebäudes führt zu nicht-rechteckigen Grundrissen einiger Büroräume. Der verbindende Gang ist ebenfalls gebogen, sodass beide Enden nur von wenigen Punkten im Gang gleichzeitig sichtbar sind. Alle Räume sind vollständig möbliert mit Tischen, Stühlen und Schränken.

Als Laserscanner für die 3D-Datenaufnahme wurde ein FARO Focus S 350 verwendet. Sowohl der FARO Focus S 70 beziehungsweise S 350 als auch der Leica RTC360 stellen einen guten Kompromiss aus Leistungsfähigkeit (Geschwindigkeit, Genauigkeit), Preis sowie Bedienbarkeit (Laserscanner, Software) dar, wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt wurde. Aufgrund der größeren Flexibilität in den verwendbaren Scan-Parametern wurde dem Faro Focus S der Vorzug gegenüber dem Leica RTC360 gegeben.

Ergänzend zur eigentlichen 3D-Vermessung wurden drei weitere Versuche durchgeführt: ein Scan mit Zielmarken zur Unterstützung der Registrierung, ein Vergleich verschiedener Scan-Auflösungen zur Wiedergabe von Details sowie ein Vergleich unterschiedlicher Positionen des Laserscanners im Raum zur Betrachtung von Abschattungen.

4.1 Methodisches Vorgehen

Zur Aufnahme der Gesamtpunktwolke wurden insgesamt 23 Laserscans erstellt. Kriterium bei der Auswahl von Positionen ist eine gleichmäßige Abdeckung aller Oberflächen mit Messpunkten. Ausschlaggebend ist neben der eingestellten Auflösung auch die Verdeckung durch Wände oder andere Objekte. Je geringer die Auflösung gewählt ist, und je stärker das Sichtfeld des Laserscanners beschränkt wird, desto mehr Scan-Positionen sollten eingeplant werden. Abbildung 4.1 zeigt einen Grundriss mit den markierten Standorten, welche für den Gesamtscan ausgewählt wurden.

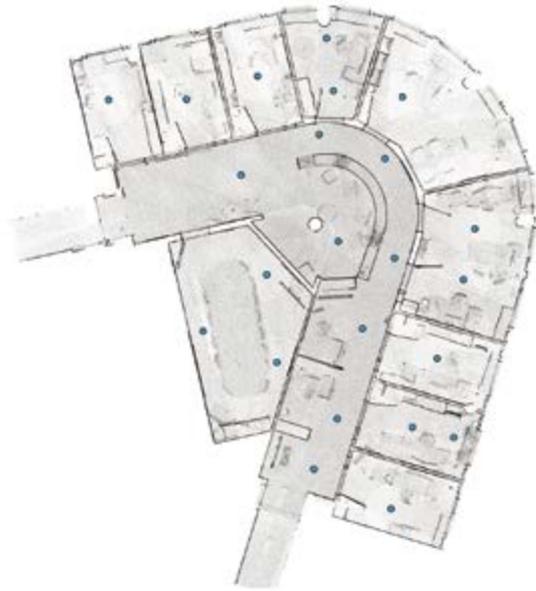


Abbildung 4.1: Verwendete Scan-Positionen für den Gesamtscan.

Die Spiegelhöhe aller Messungen betrug 164 cm. Die Höhe ergibt sich durch den gleichmäßigen, kompletten Auszug der oberen beiden Beinsegmente des verwendeten Carbon-Stativs von Gitzo. So wurde eine Spiegelposition in Kopfhöhe gefunden, die bereits gut nivelliert war. Der Messaufbau mit dem montierten Laserscanner ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Abweichend davon sind die beim Vergleich verschiedener Scan-Positionen eingerichteten Spiegelhöhen später gesondert aufgeführt.



Abbildung 4.2: Messaufbau – FARO Focus S 350 Laserscanner auf Stativ (Bildquelle rechtes Foto: Thorsten Walter, BSW).

Die bei der Messung verwendeten Scan-Parameter sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Abweichende Einstellungen zu Auflösungen und Qualitäten beim Vergleich dieser sind später gesondert dargestellt.

Tabelle 4.1: Verwendete Scan-Parameter am FARO Focus S 350 (sofern folgend nicht abweichend angegeben).

Bezeichnung	Einstellung
Profil	Innen ... 10 m (modifiziert)
Auflösung	1 / 8 (12,3 mm @ 10 m)
Qualität	3x
Scanbereich	Horizontal 0 – 360 °, vertikal -60 – 90
Verwendete Sensoren	Neigungsmesser, Kompass, Höhenmesser
HDR-Modus	Aus
Belichtungsmessmethode	Gleichmäßige Messung

Alle Angaben zur Registrierung beziehen sich auf eine im Nachgang an die Datenaufnahme durchgeführte Registrierung. Die von FARO unterstützte Registrierung im Feld auf einem per WLAN verbundenen Notebook wurde nicht genutzt.

Zum Test der auf Zielmarken basierenden automatisierten Registrierung wurden zwei Büroräume und ein Abschnitt des Gangs mit insgesamt 8 Scans erneut vermessen. Zwei verschiedene Typen von Zielmarken kamen dabei zum Einsatz: Codierte (eindeutige) Zielmarken sowie Schachbrettmarken. Die Anbringung erfolgte entsprechend der Empfehlungen des Herstellers FARO: Winkel zum Laserscanner möglichst kleiner 45 Grad, Schachbrettmarken in unterschiedlichen Höhen, Zielmarken oder Schachbrettmarken im Sichtfeld mehrerer Scan-Positionen.

Für die Versuche zum Vergleich der Auflösungen und zum Vergleich der Laserscanner-Positionen sind die jeweilig variierten Positionen und Qualitätsstufen beziehungsweise Auflösungen in den entsprechenden Unterabschnitten aufgeführt. Die übrigen Parameter blieben unverändert.

4.2 Aufgenommene Punktwolken und Darstellung der Vergleiche

Die Ergebnisse der Registrierung des Gesamtscans und der Vergleichsuntersuchungen werden in den folgenden Unterabschnitten grafisch dokumentiert und beschrieben.

Registrierter Gesamtscan

Abbildung 4.3 zeigt eine Draufsicht der eingefärbten, registrierten und gesäuberten Gesamtpunktwolke (verbesserte Darstellung durch aktiviertes Supersampling und aktivierte Lückenfüllung). Für einen besseren Einblick in die Struktur der Räume ist die Decke ausgeblendet.



Abbildung 4.3: Registrierter Gesamtscan (Draufsicht).

Weitere Ansichten mit und ohne ausgeblendete Decke sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Zur Einordnung: Ein den gescannten Gebäudeabschnitt umspannendes Rechteck hat in etwa die Kantenlängen 20m x 15m. Die Büros mit rechteckigem Grundriss sind ungefähr 10 m² groß (circa 4 m x 2,5 m).

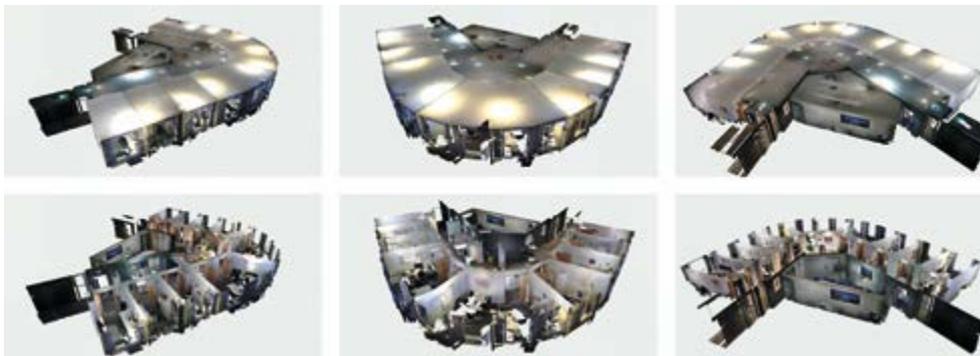


Abbildung 4.4: Registrierter Gesamtscan (Seitenansicht, Vorderansicht, Rückansicht).

Reflexionen wurden manuell aus der Punktwolke entfernt und sind in den Darstellungen nicht mehr vorhanden. Reflexionen zeigen sich durch eine anscheinende Verlängerung von Räumen oder durch Fenster spiegelnde Oberflächen hindurch. Der vor dem Fenster liegende Bereich ist gespiegelt hinter dem Fenster zu finden. Objekte und Wände vor einem Fenster werden durch darin reflektierte Laserstrahlen abgetastet (Laserscanner – Fenster – Objekt), was eine dementsprechend verlängerte gemessene Entfernung nach sich zieht. Da die ausgeführte Messung in Richtung des Fensters erfolgte, werden die Messpunkte in ebendieser Richtung dargestellt. Der Umfang zu entfernender Reflexionen ist beispielhaft in Abbildung 4.5 dargestellt.

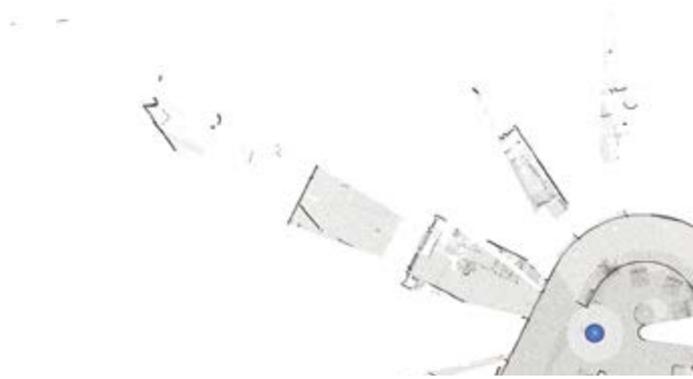


Abbildung 4.5: Reflexionen vor der manuellen Säuberung der Punktwolke.

Registrierung ohne und mit Zielmarken

Die zunächst verwendete automatische Registrierung in zwei Schritten, Draufsicht und Cloud-to-Cloud (jeweils Standardeinstellungen), konnte nicht alle Einzelscans korrekt ausrichten. Während die Scans aus dem Gang sowie aus den Büros mit nicht-rechteckiger Grundfläche als einzelne Cluster registriert werden konnten, bestanden Probleme vor allem bei der Registrierung der sechs Einzelbüros mit ähnlichen, rechteckigen Grundrissen. Sowohl eine manuelle Ausrichtung vor der Registrierung als auch eine schrittweise Registrierung in kleineren Clustern führte zu zufriedenstellenden Ergebnissen (siehe Abbildung 4.6).



Abbildung 4.6: Ergebnis der Registrierung ohne Zielmarken (Links: Draufsicht und Cloud-to-Cloud; Rechts: Cloud-to-Cloud nach manueller Ausrichtung).

Beide parallel zum Gesamtskan getesteten Typen von Zielmarken, Schachbrett- und codierte Zielmarken, ließen sich in FARO SCENE automatisiert erkennen und führten zu einer korrekten Registrierung. Dabei war auch eine Erkennung von Zielmarken außerhalb des empfohlenen Auftreffwinkels von größer 45 Grad noch möglich. Erkannte Zielmarken sind beispielhaft in Abbildung 4.7 dargestellt.



Abbildung 4.7: In der Punktwolke erkannte Zielmarken (gelbe Markierungen).

Vergleich verschiedener Auflösungen

Hohe Auflösungen bei der 3D-Vermessung führen zu detaillierten Daten, erhöhen die für die Durchführung eines einzelnen Scans benötigte Zeit aber zum Teil deutlich. Tabelle 4.2 stellt die in diesem Vergleich verwendeten Auflösungen mit der jeweils benötigten Zeit der Datenaufnahme dar. Die aufgeführte Zeit beinhaltet jeweils noch die Erstellung von Farbaufnahmen (ohne HDR). Für den ersten Scan mit der geringsten Auflösung wurde die Qualitätsstufe 4 x gewählt, da dies die niedrigste in dieser Auflösung nutzbare Stufe darstellt.

Tabelle 4.2: Verwendete Scan-Parameter, gemessene Aufnahme-Dauer und resultierende Dateigrößen (Angaben inklusive Farbaufnahmen; Laserscanner: Faro Focus S 350).

Scan-Nr.	Auflösung (Punkteabstand)	Qualität	Aufnahme-Dauer	Größe der Rohdaten
1	1/20 (30,7 mm @ 10 m)	4 x	2:57 min	63 MB
2	1/8 (12,3 mm @ 10 m)	3 x	3:39 min	92 MB
3	1/4 (6,1 mm @ 10 m)	3 x	6:23 min	192 MB
4	1/2 (3,1 mm @ 10 m)	3 x	17:24 min	574 MB
5	1/1 (1,5 mm @ 10 m)	3 x	61:14 min	1940 MB

Im Vorwege der weiteren Betrachtungen soll kurz auf die Darstellungen der Punktwolken eingegangen werden. In FARO SCENE stehen drei verschiedene Einstellungen zur Darstellung der Messpunkte zur Wahl: groß, mittel und klein. Diese Einstellungen beeinflussen die wahrgenommene Dichte der Punktwolken, wie in Abbildung 4.8 illustriert. Die folgenden Abbildungen geben die jeweils verwendete Punktgröße mit an. Um den Einfluss höherer Auflösungen hervorzuheben, werden höhere Auflösungen mit kleineren Punkten dargestellt. Analog weisen kleinere Auflösungen zur besseren Sichtbarkeit eine höhere Punktgröße auf.



Abbildung 4.8: Einfluss der Punktgröße auf die Darstellung (links: groß, Mitte: mittlere, rechts: klein).

Abbildung 4.9 stellt die verschiedenen Auflösungsstufen anhand der im Gang befindlichen Sitzzecke gegenüber. Zur besseren Hervorhebung der Unterschiede beginnt die Darstellung bereits mit mittlerer Punktgröße. Ein Einfluss der höheren Auflösungen ist in diesem Entfernungsbereich insbesondere bei der Wiedergabe kleiner Strukturen erkennbar, wie z. B. an der Pflanze im Zentrum der Punktwolken-Ausschnitte.

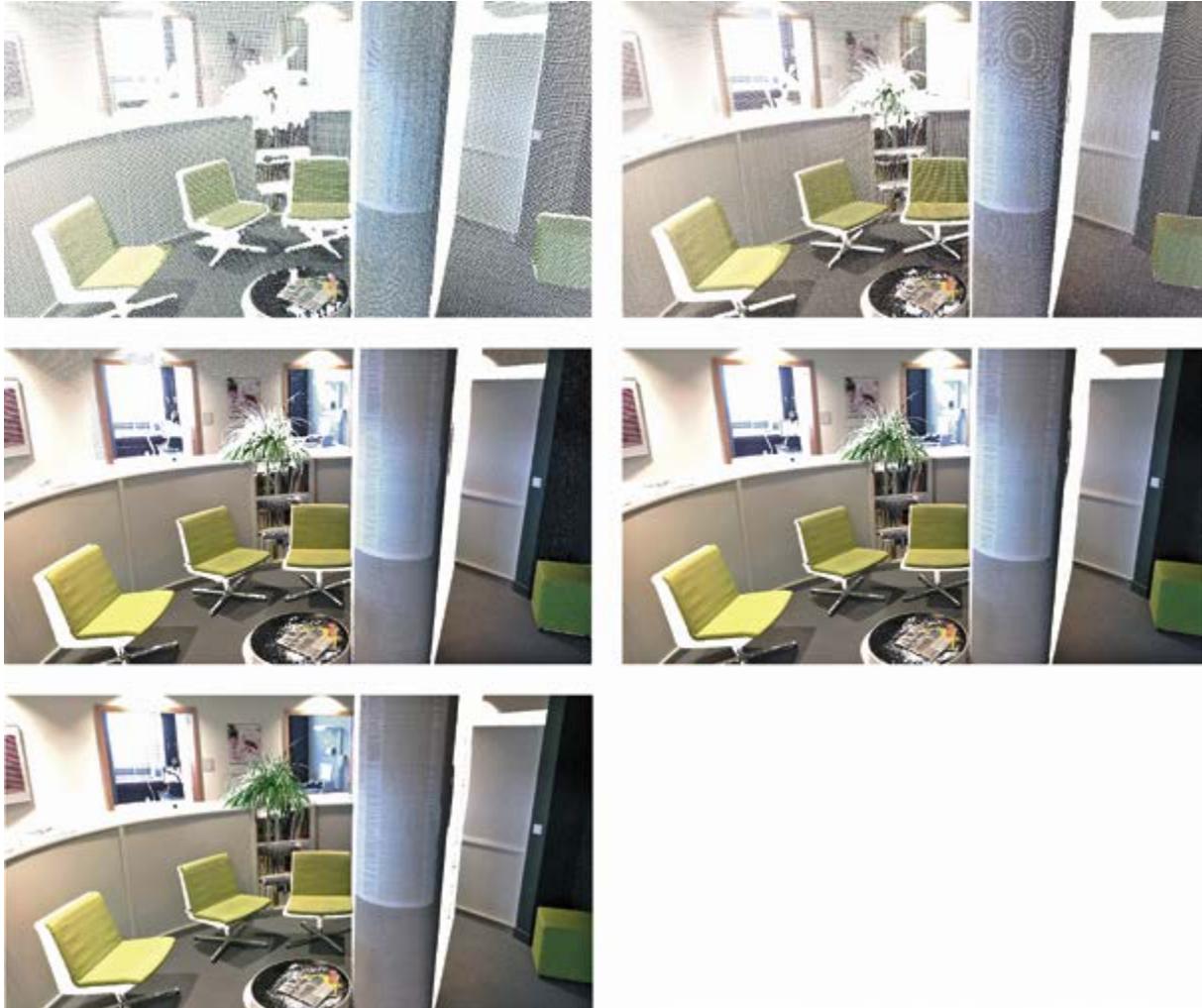


Abbildung 4.9: Vergleich verschiedener Auflösungen (in Klammern: Punktgröße der Ansicht): 1/20 (mittel), 1/8 (mittel), 1/4 (klein), 1/2 (klein), 1/1 (klein) (Faro Fokus S 350).

Deutlich wird der Unterschied unter anderem auch im Nahbereich bei der Betrachtung kleinerer Details, wie zum Beispiel Texten. Der Tisch im Vordergrund der Sitzzecke ist in der Abbildung 4.10 noch einmal hervorgehoben. Für eine deutlichere Darstellung sind die ersten drei Auflösungsstufen mit großer Punktgröße abgebildet.



Abbildung 4.10: Vergleich verschiedener Auflösungen (in Klammern: Punktgröße der Ansicht): 1/20 (groß), 1/8 (groß), 1/4 (groß), 1/2 (mittel), 1/1 (klein).

Insgesamt zeigt sich, dass die geometrischen Details der Umgebung in allen Auflösungsstufen, mit Ausnahme der kleinsten Stufe, deutlich wiedergegeben werden. Es ist davon auszugehen, dass die höheren Auflösungen besonders bei der Erfassung geometrischer Daten in größeren Entfernungen von Vorteil sind.

Unterschiedliche Positionierung des Laserscanners

Für eine praktische Untersuchung des Einflusses der Scan-Positionen auf Verdeckungen und Abschattungen in den aufgenommenen Daten wurden neun Einzelscans in einem Büro mit rechteckigem Grundriss ausgeführt. Variiert wurde die Spiegelhöhe des Laserscanners (84 cm, 123 cm, 164 cm) sowie die Position des Laserscanners auf der Längsachse des Raumes (näher zur Tür, in der Mitte, näher zum Fenster). Die neun durchgeführten Scans ergeben sich aus der paarweisen Kombination der beiden variierten Parameter. Abbildung 4.11 zeigt eine Übersicht des für den Versuch genutzten Büros (Vorderansicht und Draufsicht). Der Raum hat einen Grundriss von ungefähr 4 m x 2,5 m.

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Abbildung 4.12 zusammengeführt. In Weiß dargestellte Bereiche lagen nicht im Erfassungsfeld des Laserscanners, zum Beispiel aufgrund von Abschattungen durch die Platte des Schreibtischs. Es ist deutlich zu erkennen, dass Bereiche unterhalb des Schreibtischs erst bei niedrigeren Positionen erfasst werden. Jedoch kommt es auch hier durch Rollcontainer und Schreibtischstuhl zu Abschattungen. Der unter dem Laserscanner bauartbedingt nicht aufgenommene Bereich verringert sich erwartungsgemäß mit einer niedrigeren Höhe.



Abbildung 4.11: Übersicht des Raums: Vorderansicht, Draufsicht (Projektpunktwolke des registrierten Gesamtscans).

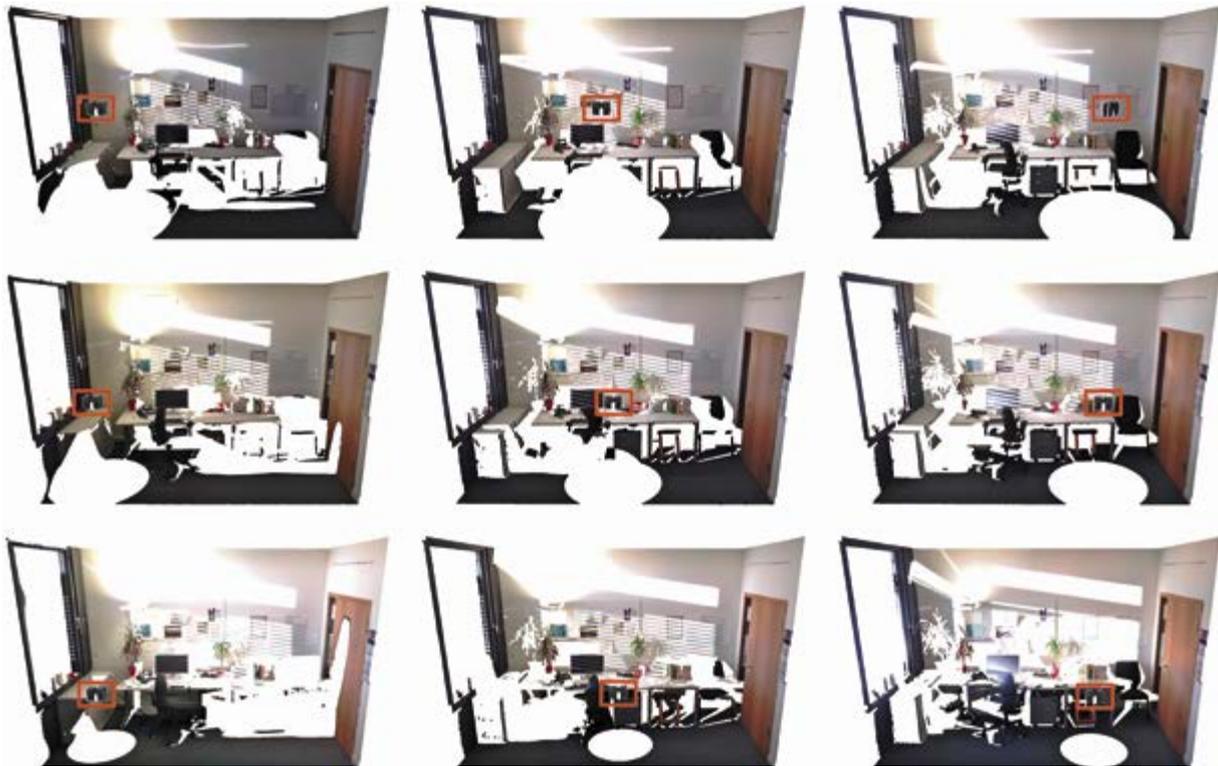


Abbildung 4.12: Vergleich verschiedener Positionen des Laserscanners (rote Markierungen).

4.3 Analyse und Diskussion

Zusammenfassend hat die beispielhafte Vermessung einer Büroumgebung gezeigt, dass 3D-Datenaufnahmen mit modernen Laserscannern eine gute Datenqualität bei vertretbarem Zeit- und Arbeitsaufwand liefern. Einschränkend ist festzuhalten, dass keine Referenzmessung zur Prüfung der geometrischen Genauigkeit zur Verfügung steht. Die zur Datenaufnahme benötigte Zeit lässt sich durch Wahl einer möglichst niedrigen Auflösung reduzieren. Möglichst niedrig meint hierbei eine dem Anwendungsfall noch angemessene Auflösung, welche Geometrien und wichtige Details der Umgebung ausreichend abbildet. Gleichzeitig reduziert dies auch die Größe der aufgenommenen Punktwolken, was Speicherbedarf und erforderliche Rechenleistung verringert. Mit welchem Aufwand die Nachbearbeitung und Registrierung der Punktwolken verbunden ist, hängt wesentlich vom Anteil der manuellen Eingriffe ab. So müssen beispielsweise Scans mit reflektierenden Objekten im Sichtfeld häufig manuell gesäubert werden. Die Anzahl und Ähnlichkeit der vermessenen Räume beziehungsweise deren Grundrisse bestimmt unter anderem, ob eine automatische Registrierung im Nachgang der Messungen erfolgreich ist. Unterstützend können hier Zielmarken verwendet werden, welche eine automatische Platzierung der Punktwolken ermöglichen. Außerdem ist zu prüfen, ob eine Registrierung im Feld vorzuziehen wäre, welche aufeinanderfolgende Scans bereits zueinander ausrichtet. Dies setzt jedoch einen leistungsfähigen Rechner vor Ort voraus. Ebenso ist zu prüfen, wie gut Lösungen anderer Hersteller diesbezüglich nutzbar sind. Bei diesen kommen verschiedene ergänzende Sensoren zum Einsatz, welche eine Vor-Registrierung im Feld vereinfachen. Bezüglich der Positionierung der Laserscanner ist zu beachten, dass Abschattungen gegebenenfalls wesentliche Elemente im Aufnahmebereich verdecken. Falls Bodenleisten oder Steckdosen im Scan enthalten sein sollen, ist bei möblierten Räumen eine dementsprechend niedrige Position des Laserscanners zu wählen.

5. Ergebnisse: Objekterkennung in 3D-Daten

Die Erstellung von BIM-Modellen oder die Modellierung auf Basis aufgenommener 3D-Daten ist ein zeitintensiver und weitestgehend manueller Prozess. Eine automatisierte Objekterkennung könnten manuelle Arbeitsschritte deutlich reduzieren. In diesem Abschnitt soll beispielhaft der aktuelle Stand der Objekterkennung in kommerziell erhältlicher Anwendungssoftware evaluiert werden. Als Szenario dient die Erkennung von Wänden, Türen und Fenstern in einer Punktwolke.

5.1 Methodisches Vorgehen

Als Software zur Erkennung von Objekten in 3D-Daten wurden insgesamt drei Programme getestet: Scalypso Modeler, FARO As-Built für Revit und Pointfuse. Die Auswahl erfolgte auf Basis einer vorbereitenden Online-Recherche. ClearEdge3D EdgeWise konnte mangels einer Testversion nicht evaluiert werden. Als Software für BIM-Autor*innen diente Autodesk Revit. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die verwendete Software inklusive Versionsnummern.

Tabelle 5.1: Übersicht der getesteten Software.

Software	Version	Anwendung
Autodesk Revit	2020	BIM-Software
Scalypso Modeler inkl. Revit Zusatzmodul	2020	Geometrien in Punktwolken finden mit Anbindung an Revit
FARO SCENE	2019.2	Verarbeitung von Punktwolken
FARO As-Built für Revit	2019.2	Zusatzfunktionen für Revit im Zusammenhang mit Punktwolken
Pointfuse	4.4.1	Erstellung und Klassifikation von Polygonnetzen

Zum Test der Programme wurde der registrierte Laserscan der vermessenen Büroräumung verwendet. Die Punktwolke wurde dazu als Recap-Format (für FARO As-Built) oder als Projektpunktwolke (für Pointfuse; für Scalypso Modeler nach Konvertierung durch Scalypso) exportiert.

Ziel ist es, Wände, Türen und Fenster in den Punktwolke-Daten automatisiert zu erkennen oder zumindest mittels Assistenzfunktionen anzugleichen.

5.2 Erkennung von Böden, Wänden und Türen

Der folgende Abschnitt dokumentiert die Ergebnisse der Objekterkennung, aufgeteilt nach Software.

FARO As-Built für Autodesk Revit

FARO bietet mit dem As-Built-Plugin für Revit eine Erweiterung an, die Revit mit umfangreichen Zusatzfunktionen für die Verarbeitung von Punktwolken ausstattet. Nach dem Laden einer Punktwolke als Autodesk Recap-Datei oder als FARO SCENE-Projekt (dieses wird dann konvertiert), stehen den Benutzer*innen verschiedene Funktionen zur Verfügung, die das Modellieren unterstützen. Für das Modellieren der Wände auf Basis der importierten Punktwolke wird von FARO empfohlen, die Sichtbarkeit der Wandkonturen zu erhöhen. Abbildung 5.1 zeigt den Status der Punktwolke nach Ausblenden der untersten Bodenpartien sowie nach Vorbereitung der Punktwolke durch das FARO-Plugin.

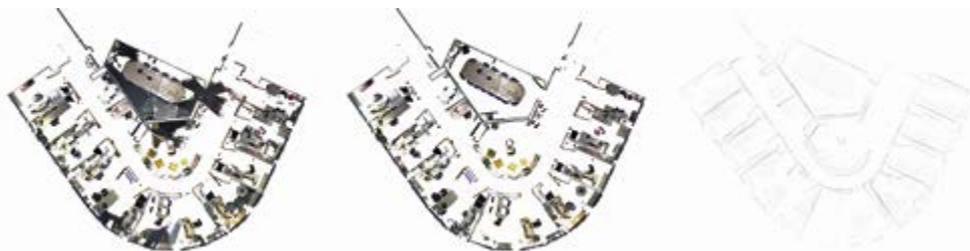


Abbildung 5.1: Herausarbeitung der Konturen in Autodesk Revit mithilfe von FARO As-Built (links: Schnitt bis Bodenebene, Mitte: Schnitt 10 cm über Bodenebene, rechts: Kontur [blass]).

Die hervorgehobenen Konturen erlauben es nun, einzelne Wände zu fitten. Hierzu geben die Benutzer*innen zwei Punkte auf jeder Wand an. Anschließend kann in einem Dialogfenster die passende Wandfamilie ausgewählt werden. Es erfolgt also eine direkte BIM-Modellierung, nicht nur eine Erfassung der Wandgeometrie. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Eine Erkennung von Türen und Fenstern direkt in Revit ist nicht möglich. Zunächst markieren die Benutzer*innen in FARO SCENE Eckpunkte der Wandöffnungen oder Punkte auf der Laibung innerhalb der Punktwolke. Die dabei beschriebenen Geometrien stehen dann in Revit zur Verfügung, um passende Modelle aus dem Katalog oder der erstellten Tür-/Fenster-Familien zu wählen. Sofern diese freie Parameter aufweisen, wird die Tür oder das Fenster geometrisch an die markierte Öffnung angepasst. Abbildung 5.2 zeigt das Ergebnis.



Abbildung 5.2: Einpassung von Wänden und Türen in Autodesk Revit mithilfe von FARO As-Built (Links: eingepasste Wände, Mitte: Auswahl der Tür-Eckpunkte in FARO SCENE, Rechts: BIM-Modell in Revit [Hinweis: Für die Modellierung standen keine exakt passenden Revit-Familien zur Verfügung.]).

Daneben bietet FARO über eine SCENE-APP unterschiedliche Funktionen zum Übertragen einzelner Punkte und Linien aus der Punktwolke nach Revit. Damit lassen sich auch komplexere Geometrien manuell übertragen.

Scalypso Modeler

Zur Arbeit mit dem Scalypso Modeler muss das Scan-Projekt als erstes in das von Scalypso genutzte Datenformat konvertiert werden. Hierzu wird ein entsprechendes Programm mit ausgeliefert. Die Arbeit mit dem Scalypso Modeler findet parallel zu Revit statt. Das Revit-Zusatzmodul bietet lediglich die Möglichkeit, den Datenempfang aus dem Scalypso Modeler zu aktivieren oder zu stoppen. Innerhalb des Modelers ist es möglich, Messpunkte, Linien, Ebenen oder Körper in der Punktwolke zu markieren und die markierten Geometrien nach Revit zu übertragen. Abbildung 5.3 zeigt markierte Ebenen neben den resultierenden geometrischen Modellen in Revit. Tür- oder Fensteröffnungen werden durch das Markieren von Eckpunkten erstellt. Eine direkte Modellierung von Wänden, Fenstern oder Türen ist damit allerdings nicht möglich.

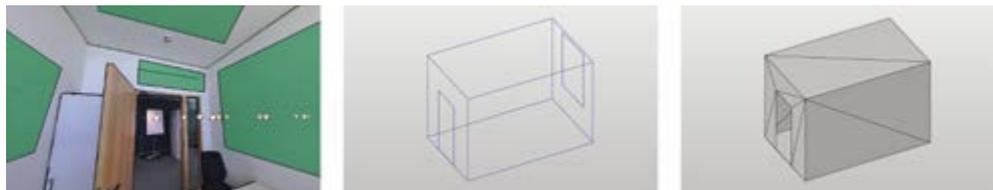


Abbildung 5.3: Generierung von Raumkonturen für Autodesk Revit mithilfe von Scalypso (links: Markierung von Wandebenen im Scalypso Modeler, Mitte: Konturen in Revit, rechts: Polygonnetz in Revit).

Pointfuse

Pointfuse ist ein Programm zum Erstellen von Polygonnetzen aus Punktwolken. Aufbauend auf dem Polygonnetzen bietet das Programm eine automatisierte Erkennung beziehungsweise Klassifikation von Ebenen an (Wände, Decken, Böden), die zur Erstellung von BIM-Modellen genutzt werden kann. Fenster und Türen müssen manuell im Polygonnetz markiert werden. Abbildung 5.4 stellt das Ergebnis einer automatisierten Erkennung dar. Es ist deutlich zu sehen, dass Tisch- und Schrankflächen fälschlicherweise als Böden und Wände klassifiziert wurden.

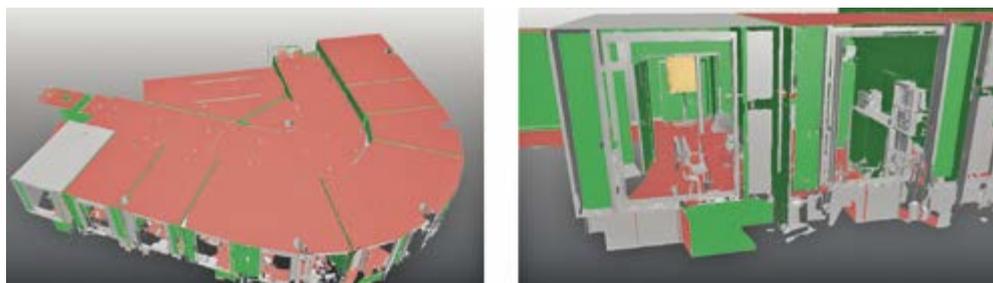


Abbildung 5.4: Klassifikation von Ebenen (Wände, Decken) in Pointfuse (links: Außenansicht des Polygonnetzes, rechts: Detailansicht des Polygonnetzes).

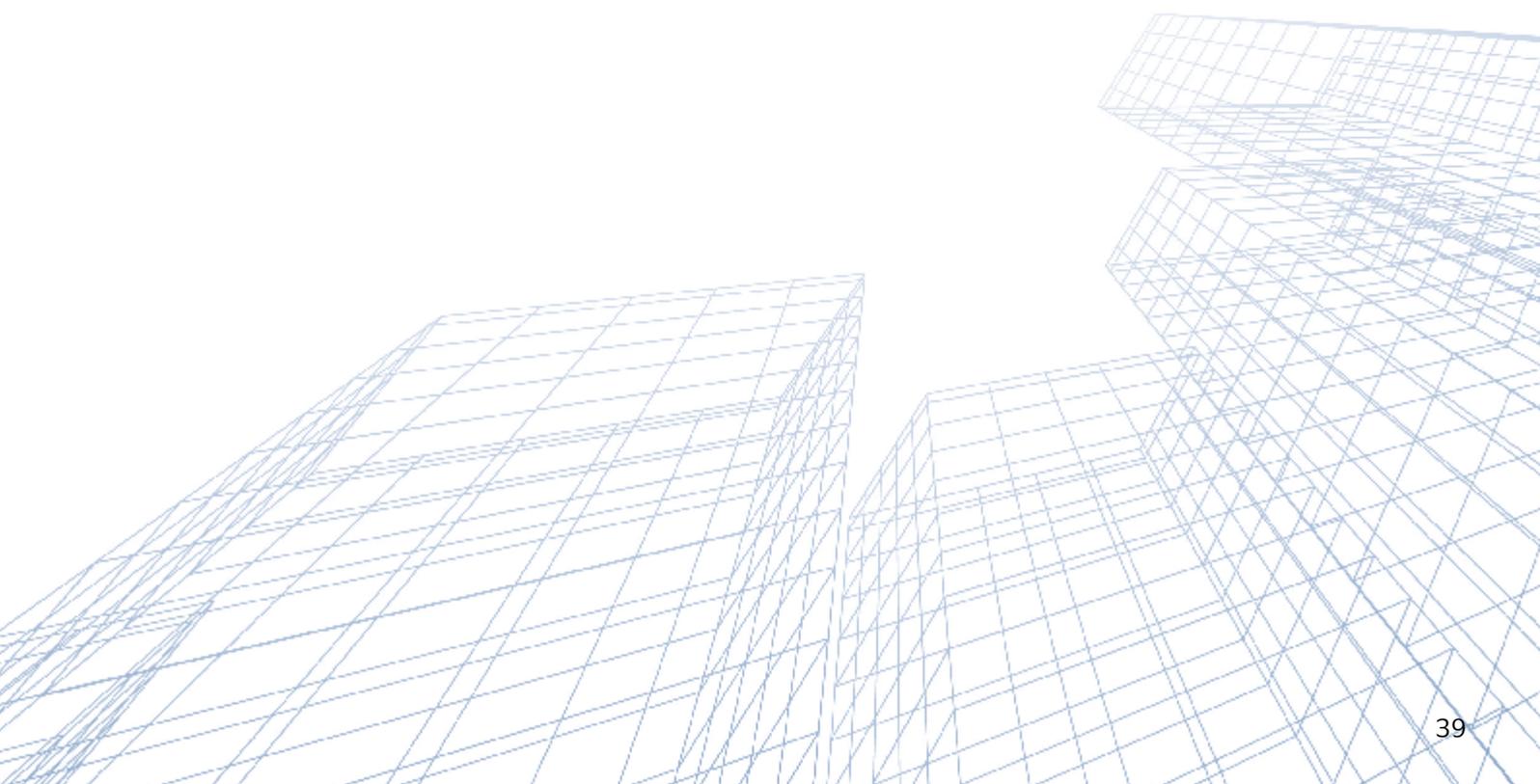
Für möblierte Gebäude sind demzufolge weitreichende manuelle Korrekturen durchzuführen. Vorteilhaft zeigt sich die Arbeit mit Polygonnetzen im Speicherbedarf. Dieser fällt deutlich geringer als bei Punktwolken aus.

Ausblick: ClearEdge3D EdgeWise

Ergänzend soll die Software EdgeWise des Herstellers ClearEdge3D erwähnt werden. Die Firma ClearEdge3D wirbt mit einer automatischen Erkennung von Wänden und Fenstern in Punktwolken. Zum Test der Software stand keine Lizenz zur Verfügung, daher muss an dieser Stelle auf zukünftige Tests verwiesen werden.

5.3 Analyse und Diskussion

Eine komplett automatisierte Erkennung wird nur von wenigen Softwareherstellern beworben. Die getestete Software von Pointfuse zeigte bei der Klassifikation von Ebenen in 3D-Daten möblierter Räume eine große Anzahl falscher Klassifikationen. Abseits davon zielen die erhältlichen Programme vielfach darauf ab, die Modellierung zu vereinfachen und effizienter zu gestalten. Funktionen zur Übertragung von Messdaten aus der Punktwolke in die BIM-Software beschleunigen die Erstellung der Gebäude- und Raumgeometrien. Weitergehende Assistenzfunktionen bieten auf Basis markierter Messpunkte bereits vorausgewählte Modelle aus Modellkatalogen an. Ganz ohne Eingaben der Benutzer*innen kommen aber auch diese Systeme nicht aus. Dies setzt aber voraus, dass umfangreiche Modellkataloge bereits vorhanden sind. Bezüglich der automatisierten Klassifikation von Wänden und Böden sind mit Daten leerstehender Räume bessere Ergebnisse zu erwarten, was im Rahmen dieser Kurzstudie aber nicht getestet werden konnte.



6. Handlungsempfehlungen

Die Durchführung von 3D-Vermessungen stellt eine geeignete Methode dar, den aktuellen Zustand von Gebäuden und Baustellen, inklusive ergänzender Farbaufnahmen, zu erfassen. Dabei aufgenommenen Punktwolken vereinfachen die Erstellung und Anpassung von BIM-Modellen deutlich. Die Nachbearbeitung der aufgenommenen Daten sowie die eigentliche Modellierung in einer Software für BIM-Autor*innen stellen jedoch zeitaufwändige und weiterhin zum größten Teil manuelle Prozesse dar. Außerdem sind mit der Anschaffung der Messgeräte aktuell hohe Kosten verbunden. Daher scheint ein Einsatz in der Breite zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll.

Wege zu einer effizienten und kostengünstigen Nutzung in der Zukunft liegen insbesondere in den Bereichen Hardware / Sensorik sowie Software / Objekterkennung. Im Bereich Hardware / Sensorik werden kostengünstige Messgeräte benötigt, die einfach zu bedienen sind und in kurzer Zeit das detaillierte Vermessen großer Flächen erlauben, möglichst ohne Abschattungen. Die Herstellerdemonstrationen am Institut haben gezeigt, dass sowohl in die Richtungen Bedienbarkeit / effizientes Scannen als auch Datenaufnahme abseits des terrestrischen Laserscannings interessante Entwicklungen zu verzeichnen sind. Auch im Bereich der Software / Objekterkennung wird weitreichend an Algorithmen zur automatisierten Detektion von Objekten in 3D-Daten geforscht. Neben der Erkennung von wesentlichen Merkmalen eines Gebäudes (Wände, Fenster, Türen) oder verschiedener Gegenstände der Inneneinrichtung könnten auch Forschungsarbeiten aus dem weiten Feld des automatisierten Fahrens hier von Interesse sein. Insofern ist davon auszugehen, dass die angesprochenen Hemmnisse zukünftig sukzessiv behoben werden.

Es wird empfohlen, Hard- und Softwareentwicklungen weiter zu beobachten und regelmäßig den Stand der Technik zu prüfen. Interessante Entwicklungen finden sich beispielsweise im Bereich des Mobile Mappings bei kompakten, handgeführten Geräten. Auch Smartphones und Tablets mit zusätzlicher 3D-Sensorik werden seit einigen Jahren vereinzelt angeboten, beispielhaft ein Tablet mit LiDAR-Sensor durch Apple. Es wird weiterhin empfohlen, neu auf dem Markt verfügbare Messgeräte oder Anwendungssoftware im Feld zu erproben und zu bewerten. Erst abseits einfacher Demonstrationsfälle können Stärken und Schwächen der Technologien aufgezeigt werden. Außerdem ist zu prüfen, ob gezielt Entwicklungs- und Forschungsarbeiten gefördert werden können.

7. Zusammenfassung und Fazit

Ziel dieser Kurzstudie war es, Geräte für eine 3D-Vermessung von Baustellen und Gebäuden zu evaluieren und an einem praktischen Beispiel exemplarisch zu erproben. Weiterhin wurde das Ziel verfolgt, den Status der automatisierten Erkennung von Objekten im BIM-Kontext beispielhaft zu untersuchen.

Als relevante Messgeräte haben sich besonders terrestrische Laserscanner herausgestellt, da diese eine hohe Datenqualität bei ausreichender Flexibilität der Messung liefern. Verschiedene Hersteller*innen bieten solche Geräte kommerziell an, deren Unterschiede insbesondere bei der Messrate (Geschwindigkeit der Datenaufnahme), der maximal verfügbaren Auflösung, der Reichweite, dem Kaufpreis sowie dem Umfang von Zusatzfunktionen liegen (wie zum Beispiel Vor-Ort-Registrierung durch Positionsverfolgung, Bereichsmessungen). Die Güte der Messdaten kann in allen Fällen als für BIM-Zwecke ausreichend betrachtet werden. Geräte zum kinematischen Laserscanning beziehungsweise Mobile Mapping sind ebenfalls kommerziell verfügbar, stehen den terrestrischen Laserscannern aber noch im Preis oder der Auflösung und Genauigkeit nach.

Für die praktische Erprobung wurde eine möblierte Büroumgebung mithilfe eines FARO Focus S 350 Laserscanners vermessen. Es konnte gezeigt werden, dass Messungen mit unter vier Minuten pro Scan-Position eine hinreichend detaillierte 3D-Aufnahme gestatten. Auch eine automatisierte Registrierung ist erfolgreich, sofern entlang der Scan-Positionen sequenziell registriert wird oder die vermessenen Grundrisse sich nicht zu sehr ähneln. Andernfalls kann die Verwendung von Zielmarken die automatisierte Registrierung unterstützen. Die Bereinigung der Scan-Daten hat allerdings noch manuell zu erfolgen. Abschattungen der Grundrisse sind gerade bei kleinen, möblierten Räumen nicht zu vermeiden. Bei der Auswahl der Scan-Position ist daher darauf zu achten, dass alle für die spätere Datennutzung relevanten Bereiche erfasst werden können.

Um den Stand erhältlicher Software zur Objekterkennung zu untersuchen, wurde als Szenario die Erkennung von Wänden, Türen und Fenstern gewählt. Diese Aufgabe ist zentraler Bestandteil einer BIM-Modellierung. Die getesteten Lösungen erlauben das Übertragen von Konturen aus der Punktwolke, das automatisierte Fitten von Flächen/Wänden oder das assistierte Einfügen von Fenstern und Türen. Eine erfolgreiche Extraktion von Wänden, Böden und Decken ist mit den getesteten Lösungen noch nicht möglich. Dem wirken unter anderem die in den Räumen befindlichen Tische und Schränke entgegen, welche horizontale Ebenen zwischen Böden und Decken bilden. Auch an den Wänden befestigte Objekte, wie beispielsweise Bildschirme, stören die Erkennung. Manuelles Modellieren wird also assistiert, jedoch bei weitem noch nicht ersetzt.

Wege zu einer effizienteren und damit auch kostengünstigeren Datenaufnahme werden bereits von vielen Herstellern verfolgt und wurden während der Demonstrationen am Institut für Technische Logistik vorgestellt. Auch die Entwicklung und Verfeinerung von Algorithmen zur Objekterkennung stellt ein wichtiges Forschungsfeld dar, welches fortlaufend neue Ansätze hervorbringt. Insgesamt ist ein Einsatz in der Breite zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund des nötigen Zeit- und Arbeitsaufwands sowie der verbundenen Kosten noch nicht zu empfehlen. Das Fernziel der kontinuierlichen Dokumentation jeglicher Anpassungen an Gebäuden sowie eine einfache digitale Pflege verknüpfter Modelle scheint aber zukünftig denkbar.

Wir bedanken uns bei den Unternehmen Artec 3D (vertreten durch KLIB Knut Lehmann IngenieurBüro), Faro, Leica und Zoller + Fröhlich für die Durchführung der Demonstrationen in der Versuchshalle des Institut für Technische Logistik der TU Hamburg. Weiterhin bedanken wir uns bei Faro für die Bereitstellung des Laserscanners für die praktische Erprobung.

Literaturverzeichnis

Apple Inc. (2020): iPad Pro. Online verfügbar unter <https://www.apple.com/de/ipad-pro/>, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

Artec 3D (o. J.): Artec Ray Datenblatt.

Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (Hg.) (2015): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Vieweg (VDI-Buch).

DotProduct LLC (2020): REAL-TIME 3D FOR YOUR INDUSTRY. Online verfügbar unter <https://www.dotproduct3d.com/>, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

FARO Europe GmbH & Co. KG (2019): FARO Focus Laser Scanner. Leistungsspezifikationen.

Gankhuyag, Uuganbayar; Han, Ji-Hyeong (2020): Automatic 2D Floorplan CAD Generation from 3D Point Clouds. In: Applied Sciences 10 (8), S. 2817. DOI: 10.3390/app10082817.

GeoSLAM (o. J.a): ZEB HORIZON Datasheet.

GeoSLAM (o. J.b): ZEB REVO RT Datasheet.

Han, Lei; Zheng, Tian; Xu, Lan; Fang, Lu (2020): OccuSeg: Occupancy-aware 3D Instance Segmentation. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2003.06537.pdf>, zuletzt geprüft am 30.04.2020.

Leica Geosystems AG (2018): Leica RTC360 Technische Daten.

Lenovo (2017): Phab 2 Pro. Das erste Smartphone der Welt mit Google Tango. Online verfügbar unter <https://www.lenovo.com/de/de/smart-devices/smartphones-and-watches/lenovo/phab-series/Lenovo-PB2-690M/p/ZZITZTPPB4M>, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

Mettenleiter, Markus; Hartleb, Franz; Kresser, Simon; Fröhlich, Christoph (2015): Laser-scanning. Phasenbasierte Lasermesstechnik für die hochpräzise und schnelle dreidimensionale Umgebungserfassung. München: Verlag Moderne Industrie (Die Bibliothek der Technik, Band 371).

NavVis GmbH (o. J.): NavVis M6-4. Product Specification.

Paracosm (2020): WALK. SCAN. DELIVER. Online verfügbar unter <https://paracosm.io/>, zuletzt geprüft am 18.05.2020.

S. Murali; P. Speciale; M. R. Oswald; M. Pollefeys (2017): Indoor Scan2BIM: Building information models of house interiors. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 6126–6133.

Schwarz, Willfried (Hg.) (2017): Ingenieurgeodäsie. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freedен und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften).

Zoller + Fröhlich GmbH (o. J.): Z+F IMAGER 5016 Datenblatt.

Impressum

Herausgeberin:

Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen
Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg
Webseite: www.hamburg.de/bsw



Technische Universität Hamburg
Institut für Technische Logistik
Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg
Webseite: www.tuhh.de/itl
E-Mail: itl@tuhh.de



V.i.S.d.P. Christian Carstensen, Pressestelle, Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen

Autoren:

Marko Thiel, Philipp Wojtkowiak, Dr. Johannes Hinckeldeyn,
Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt

ISBN 978-3-00-066744-2

Gestaltung:

Freie und Hansestadt Hamburg
Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung

Bildnachweis:

Grafiken: ©AdobeStock: Sofikova

Auflage: 150

ISBN 978-3-00-066744-2



9 783000 667442 >