

Hochschule für Technik Stuttgart

Bachelor-Arbeit

Als PL nach der SPO-2018

Ausgeführt für die Bachelor-Prüfung im
Wintersemester 2021/22

Studiengang Vermessung und Geoinformatik

**Untersuchung zum Einsatz des iPhone 12 LiDAR-
Scanners in der Vermessung und Vergleich zu
Punktwolken aus weiteren Aufnahmeverfahren**

Christina Behrendt
Geboren am 15.02.1998
Matrikelnummer 424900

Erstprüfer und Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gülch
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Peter Javorsky (Vermessungsbüro Gräber + Javorsky)

Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Gefertigt:

Ort, Datum

(Christina Behrendt)

Gesehen:

Erstprüfer und Betreuer:

Datum

(Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gülch)

Zweitprüfer:

Datum

(Dipl.-Ing. Peter Javorsky)

Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass diese Arbeit inhaltsgleich der am 26.01.2022 um 14:08 Uhr hochgeladenen digitalen Version ist.

Gefertigt:

Ort, Datum

(Christina Behrendt)

Gesehen:

Erstprüfer und Betreuer:

Datum

(Prof. Dr.-Ing. Eberhard Gülch)

Zweitprüfer:

Datum

(Dipl.-Ing. Peter Javorsky)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Grundlagen und Stand der Forschung.....	10
2.1	Erfassung von dreidimensionalen Objekten	10
2.2	Funktionsweise LiDAR.....	12
2.3	Entfernungsmessung mit Smartphones	14
2.4	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL).....	14
2.5	Single-Photon Avalanche Diode (SPAD)	15
2.6	Photogrammetrie	15
2.7	Stand der Forschung	16
3	Ziele der Arbeit	17
4	Methodik.....	20
4.1	Messgeräte.....	21
4.1.1	iPhone 12 Pro mit LiDAR-Sensor und verwendeten Applikationen	21
4.1.2	Leica ScanStation P40.....	26
4.2	Software zur Auswertung.....	27
4.2.1	Leica Cyclone	27
4.2.2	Agisoft Metashape	28
4.2.3	Leica 3DReshaper	28
4.3	Empirische Untersuchung.....	29
4.3.1	Workflow	29
4.3.2	Messobjekte.....	30
4.3.3	Vorbereitung.....	33
4.3.4	Vorgehen Aufnahme mit TLS und LiDAR-Scanner des iPhones.....	34
4.3.5	Vorgehen photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone	36
4.3.6	Besonderheiten.....	37
4.4	Datenaufbereitung für die Auswertung.....	39
4.4.1	Übertragen der Daten.....	39
4.4.2	Kompatibilität mit der Auswertesoftware	40
4.4.3	Georeferenzierung der Punktwolken aus TLS und iPhone LiDAR-Scanner.....	40
4.4.4	Berechnen der Punktwolke aus der photogrammetrischen Aufnahme.....	43
5	Ergebnisse der Auswertung.....	44
5.1	Ergebnisse der Messung mit dem terrestrischen Laserscanner	44
5.2	Ergebnisse der Messung mit dem iPhone LiDAR-Scanner	46
5.3	Ergebnis der photogrammetrischen Aufnahme mit dem iPhone.....	50
6	Analyse und Vergleich.....	51
6.1	Datenvergleich TLS und iPhone LiDAR-Scanner	52
6.2	Datenvergleich TLS und photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone.....	59
6.3	Analyse Innenräume.....	60

6.4	Eignung untersuchter Applikationen in der Vermessung	62
6.5	Eignung photogrammetrischer Aufnahmen mit dem iPhone in der Vermessung.	65
7	Zusammenfassung und Ausblick	66
	Literaturverzeichnis	70
	Abbildungsverzeichnis.....	72
	Tabellenverzeichnis.....	74

Anlagen (digital)

Anlage A: Messprotokolle

- A1: Messobjekt Hochdorf Tachymeter
- A2: Messobjekt Hochdorf Tachymeter und GNSS
- A3: Messobjekt Neckargröningen Tachymeter
- A4: Messobjekt Neckargröningen Tachymeter und GNSS
- A5: Messobjekt Neckarrems Tachymeter
- A6: Messobjekt Neckarrems Tachymeter und GNSS

Anlage B: Übersicht der Passpunkte in Leica Cyclone

- B1: Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp
- B2: Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint
- B3: Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp
- B4: Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint
- B5: Messobjekt Neckarrems - Applikation 3DScannerApp
- B6: Messobjekt Neckarrems - Applikation EveryPoint

Anlage C: Übersicht der Fest- und Passpunkte

- C1: Messobjekt Hochdorf - Maßstab 1 : 350
- C2: Messobjekt Hochdorf - Maßstab 1 : 100
- C3: Messobjekt Neckargröningen - Maßstab 1 : 150
- C4: Messobjekt Neckargröningen - Maßstab 1 : 25
- C5: Messobjekt Neckarrems - Maßstab 1 : 200
- C6: Messobjekt Neckarrems - Maßstab 1 : 50

Anlage D: Koordinaten der Fest- und Passpunkte

- D1: Messobjekt Hochdorf
- D2: Messobjekt Neckargröningen
- D3: Messobjekt Neckarrems

Abstract

In der Vermessung werden ständig Möglichkeiten gesucht, bestehende Arbeitsabläufe zu verbessern und diese effektiver zu gestalten. Dazu trägt auch die Automatisierung der Messinstrumente bei. Jedoch ist dabei vor allem bei der tachymetrischen Messung immer noch eine aufwändige Feldbuchführung notwendig. Um hier eine zeitsparende und effiziente Alternative zu finden, wird in dieser Arbeit der Einsatz des iPhone 12 Pro LiDAR-Scanners in zwei Anwendungsbereichen der Vermessung untersucht. Außerdem sollen photogrammetrische Aufnahmen mit der Kamera des iPhones erstellt werden.

Ziel ist es, herauszufinden wie zuverlässig die beiden Aufnahmemethoden die Messobjekte erfassen und für welche Anwendungen die Genauigkeit der Ergebnisse ausreicht. Dafür werden die Applikationen 3DScannerApp und EveryPoint, sowie die Hauptkamera des iPhones getestet. Um die Punktwolken bewerten zu können, werden Aufnahmen der Objekte mit einem terrestrischen Laserscanner als Referenz für den Vergleich verwendet. Außerdem soll auf die Handhabung und Unterschiede der Applikationen eingegangen werden.

Als Messobjekte werden Treppenanlagen und kleinere Innenräume verwendet. Die Erfassung der Treppenanlagen erfolgt zunächst durch den LiDAR-Scanner des iPhones und dessen Applikationen. Anschließend werden die Referenzpunktwolken mit dem terrestrischen Laserscanner erzeugt. Diese erhalten durch Passpunktmessung einen Raumbezug zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Um auch die mit dem iPhone gemessenen Daten georeferenzieren zu können, erfolgt zudem die Messung von markanten Punkten der Treppenanlagen, die als Passpunkte für die mit dem LiDAR-Scanner des iPhones erzeugten Punktwolken verwendet werden. Außerdem werden photogrammetrische Aufnahmen einer der Treppenanlagen, ebenfalls mit zugehörigen Passpunkten in Form von Klebepunkten auf dem Objekt, erstellt. Nach der Georeferenzierung der erzeugten Punktwolken werden diese anhand einer Software miteinander verglichen und bewertet.

Die gewählten Innenräume werden ausschließlich mit dem LiDAR-Scanner des iPhones erfasst. Daher erfolgt hier kein Vergleich von Punktwolken, sondern lediglich die Bewertung der Geometrie der Räume in den Messergebnissen, sowie deren Qualität und Vollständigkeit.

Die Aufnahme und Georeferenzierung der Treppenanlagen liefert mit beiden getesteten Applikationen gute Ergebnisse, wobei die der EveryPoint App etwas geringere Abweichungen zur Referenzpunktwolke aufweist. Die größte Fehlerquelle liegt in der manuellen Markierung der Passpunkte in der Punktwolke. Die Handhabung beider Apps ist ähnlich und die Dauer der Messung ist deutlich geringer als bei der Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner. Die photogrammetrische Aufnahme liefert, aufgrund der besseren Möglichkeit zur Auswahl der Passpunkte, ein Ergebnis mit wesentlich geringeren Differenzen zur Referenzpunktwolke. Die Dauer der Aufnahme ist mit dem Zeitaufwand der Applikationen vergleichbar.

Die Messung der Innenräume zeigt nach der Auswertung unterschiedlich gute Ergebnisse. In dem Raum mit Holzverkleidung an den Wänden wurden bessere Daten erzielt als in dem Raum mit wenig strukturierten Wändflächen. Hier sind teilweise Wände doppelt und parallel versetzt dargestellt. Außerdem bestehen Versprünge in Boden und Decke. Die 3DScannerApp liefert in diesem Fall etwas bessere und vollständigere Ergebnisse. Um die Aufnahme weiter zu verbessern, müssten Kontraste und Strukturen an den Wänden geschaffen werden.

Damit ist der Einsatz des iPhones in der Vermessung sinnvoll, jedoch nicht für alle Anwendungsbereiche. Während die Treppenanlagen gut erfasst wurden, sind bei Innenräumen besondere Vorkehrungen für die Messung zu treffen. Außerdem ist die erforderliche Genauigkeit ein wichtiger Aspekt. Hier liefert die photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone bessere Ergebnisse. Das iPhone ersetzt den terrestrischen Laserscanner nicht, kann jedoch eine sinnvolle Ergänzung zu bisherigen Aufnahmemethoden sein. Einzig die Georeferenzierung der Daten aus dem iPhone LiDAR-Scanner bedarf Optimierung, was eine Genauigkeitssteigerung mit sich bringen würde.

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
E57	LiDAR Point Cloud Data Format
GK	Gauß-Krüger
GNSS	Global Navigation Satellite System
JPEG	Joint Photographic Experts Group
las	binäres Dateiformat zum Austausch von LiDAR-Daten
LiDAR	Light Detection and Ranging
ply	Polygon File Format (zur Speicherung dreidimensionaler Daten)
pts	Pro Tools Session
RADAR	Radio Detection and Ranging
SPAD	Single-Photon Avalanche Diode
TLS	Terrestrischer Laserscanner / Terrestrisches Laserscanning
UTM	Universal Transverse Mercator
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
xyz	ASCII-Datei mit X-, Y-, und Z-Koordinaten von Punkten

1 Einleitung

Die Abbildung von dreidimensionalen Objekten in zweidimensionalen Karten und Plänen stellt die Vermessung von Beginn an vor große Herausforderungen, für die in der Vergangenheit immer wieder neue Lösungsansätze entwickelt wurden. Dazu gehören auch verschiedene Messmethoden zum Erfassen von Objekten. Eine Methode ist der Einsatz von Laserscannern, welche häufig mit der LiDAR-Technologie arbeiten. LiDAR steht für Light Detection and Ranging, wobei Licht als Informationsquelle verwendet wird. Diese Technologie wurde zunächst für die Luft- und Raumfahrt, später auch zur Erfassung von Geodaten, in der Atmosphärenforschung, sowie in der Meteorologie eingesetzt. Die kurze Wellenlänge des Scanners ist dabei entscheidend für die Detektion kleinster Partikel und Objekte.

Heute kommt die LiDAR-Technologie auch in vielen weiteren Bereichen zum Einsatz. Ein aktuelles Beispiel ist das Detektieren von Objekten und Personen im Umfeld eines Fahrzeugs beim autonomen Fahren. Die Entwicklung der Sensoren schreitet immer weiter fort, sodass diese kompakter und kostengünstiger werden. Dadurch kann das System in vielen weiteren Anwendungen, wie unter anderem in Smartphones, eingesetzt werden.

Die Firma Apple verbaut seit dem Jahr 2020 Sensoren zur Nutzung eines LiDAR-Scanners in ihren mobilen Endgeräten. Zunächst erfolgte dies im iPad Pro 2020, dann auch in den zurzeit aktuellen iPhone-Modellen 12 Pro und 13 Pro. Daraus lässt sich schließen, dass die Sensorfunktion voraussichtlich auch in Zukunft Bestandteil des Smartphones sein wird. Ursprünglich wurde der LiDAR-Scanner zur Unterstützung der Kamerafunktion bei schlechten Lichtverhältnissen eingebaut. Seine Aufgabe ist dabei die Unterscheidung zwischen Objekt und Hintergrund zu ermöglichen und dadurch die Geschwindigkeit der Fokussierung des Bildes zu erhöhen. Da es sich bei der LiDAR-Technologie um ein aktives System handelt, es sendet also selbst Strahlen aus, kann es auch bei schwachem Lichteinfall Informationen erfassen.

Im Vergleich zu einem aktuell in der Vermessung gebräuchlichen terrestrischen Laserscanner, ist das iPhone mit verbautem LiDAR-Sensor ein sehr kompaktes und handliches Gerät, welches, falls es geeignete Daten liefert, beachtliche Vorteile in der Vermessung mit sich bringt. Aufgrund von Größe und Gewicht sind terrestrische Laserscanner häufig schwer zu positionieren, um alle erforderlichen Bereiche damit messtechnisch zu erfassen. Durch die höhere Mobilität entstehen durch das iPhone hier neue Möglichkeiten. Zu nennen sind, neben der Größe und dem Gewicht, auch die günstigeren Anschaffungskosten und somit die wesentlich bessere Verfügbarkeit eines Smartphones. Diese Verfügbarkeit ist bei einem terrestrischen Laserscanner nicht immer gewährleistet, da in der Regel, aufgrund der hohen Kosten, nur wenige Exemplare in Vermessungsbüros zur Verfügung stehen. Außerdem wirkt sich der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners, zum Beispiel nur für einen vergleichsweise kleinen Teil einer Bestandsaufnahme, negativ auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Aufnahme aus. Aus diesen Gründen können terrestrische Laserscanner nicht in

allen Situationen der täglichen Vermessung sinnvoll eingebunden werden. Durch die Verwendung anderer Aufnahmemethoden, wie der tachymetrischen Aufnahme, resultiert ein hoher Aufwand, zum einen durch die notwendige genaue Feldbuchführung bei der Aufnahme selbst, aber auch bei der anschließenden Auswertung mit einem CAD-Programm (Computer-Aided Design).

Es besteht der Bedarf, das Messen zu erleichtern und sinnvolle Alternativen zum bisherigen Vorgehen zu finden. In diesem Zusammenhang ist der LiDAR-Scanner des iPhones eine mögliche Option. Wie dabei vorzugehen ist und ob das iPhone in der alltäglichen Vermessung anwendbar ist, soll in dieser Arbeit untersucht werden.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

2.1 Erfassung von dreidimensionalen Objekten

Aktuell bestehen in der Vermessung verschiedene Möglichkeiten, um dreidimensionale Objekte zu erfassen. Je nach Genauigkeitsanforderungen und Größe des jeweiligen Objekts, wird eine Methode ausgewählt, um auch die Wirtschaftlichkeit der Messungen zu gewährleisten. Außerdem liefern die verschiedenen Messmethoden unterschiedliche Datensätze und Datenmengen als Ergebnis, was wiederum Einfluss auf den Auswerteaufwand hat. Es muss im Vorfeld entschieden werden, ob eine große Anzahl an Punkten im Messbereich benötigt wird, oder ob einzelne Punkte an markanten Stellen für die Aufgabe ausreichend sind.

Die Aufnahme einzelner Punkte ist unter anderem mit der tachymetrischen Messung möglich. Dabei werden Strecken und Richtungen vom Instrument zu dem jeweiligen Punkt des Objekts bestimmt. Die Entfernung wird durch das Aussenden elektromagnetischer Wellen gemessen. Es gibt zwei unterschiedliche Messverfahren, das Time-of-Flight- und das Phasenvergleichsverfahren. Das Time-of-Flight-Verfahren verwendet die Laufzeitmessung, also die Messung der Zeit, die die Welle vom Instrument bis zum Objekt und wieder zurück benötigt. Beim Phasenvergleichsverfahren wird die Phasenverschiebung einer elektromagnetischen Welle erfasst, die sie zwischen Aussendung und Empfang durch das Instrument erfährt. Bei beiden Methoden erfasst das Instrument auch Horizontal- und Vertikalrichtungen um, nach der Stationierung mit bekannten Punkten, die Koordinaten des Neupunktes berechnen zu können. Diese Messmethode ist vergleichsweise genau. Bei der Messung muss immer Sichtverbindung zwischen dem aufzunehmenden Punkt und dem Instrument bestehen. Wird dadurch eine erneute Stationierung des Messgeräts erforderlich, erhöht sich auch der Arbeitsaufwand zum Teil erheblich. Für das Aufstellen des Instruments wird ein stabiler Untergrund benötigt. Erschütterungen oder Einsinken der Stativbeine

verfälschen das Ergebnis der Messung. Eingesetzt wird diese Methode zum Beispiel für Bestandsaufnahmen oder Absteckungen im Bereich der Bauvermessung.

Die zweite Möglichkeit zur Erfassung einzelner Punkte, ist die Messung mit einem GNSS-Empfänger (Global Navigation Satellite System). Dieser empfängt Daten von Satelliten, um seine eigene Position zu bestimmen. Dabei sind, zur Berechnung der eigenen Position auf der Erde, die Positionen der Satelliten und die genaue Uhrzeit zum Zeitpunkt des Aussendens des Signals erforderlich. Durch Laufzeitmessung wird die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger ermittelt. Aus diesen Entfernungen werden kugelförmige Körper um den jeweiligen Satelliten gebildet, an deren Schnittpunkt sich die Position des GNSS-Empfängers befindet. Hierfür werden immer mindestens vier Satelliten benötigt, für x-, y- und z- Wert, sowie der Abweichung zwischen den Uhrzeiten im Satellit und im Empfänger. Die erforderliche Anzahl an Satelliten kann aufgrund von Abschattung durch Vegetation und Gebäuden nicht immer erreicht werden, sodass die Messmethode in manchen Umgebungen nicht anwendbar ist. Außerdem beeinflussen reflektierte Signale, zum Beispiel an spiegelnden Fassaden, die Messung und erforderliche Genauigkeiten können nicht erreicht werden. Mit Verwendung von entsprechenden Korrekturdatendiensten liegt die erreichbare Genauigkeit meist im Bereich von wenigen Zentimetern. Einsatzbereiche sind zum Beispiel Bestandsaufnahmen und das Abstecken von Punkten, bei denen eine geringere Genauigkeit erforderlich ist.

Ein Verfahren zur Erfassung von Punktwolken ist die Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner (im Folgenden als TLS bezeichnet). Hier werden im 360°-Winkel um das Instrument, oder nur für einen festgelegten Bereich, automatisch Punkte erfasst, die sich, je nach Reichweite des TLS und Größe des Messobjekts, auch nur über einen Teil des Messgebiets erstrecken können. Die entstandene Punktwolke kann für Vergleiche zu vorausgegangenen Messungen und der Darstellung von Fassaden oder, wenn gewünscht, für die Ableitung von einzelnen Punkten verwendet werden. Durch die Möglichkeit der zusätzlichen Aufnahme von Bildern im Anschluss an den Scan, ist außerdem der Erhalt von realen Farbinformationen zu jedem einzelnen erzeugten Punkt möglich.

Auch das Erstellen photogrammetrischer Aufnahmen ist eine Option, um dreidimensionale Modelle von Objekten zu erzeugen. Dafür werden Bilder von dem jeweiligen Objekt aus verschiedenen Richtungen und Entfernungen aufgenommen. Für die Erzeugung einer Punktwolke durch eine geeignete Software, müssen von jedem darzustellenden Objektpunkt mindestens zwei Bilder aus unterschiedlichen Richtungen vorhanden sein. Über Passpunkte am Objekt, die auf mehreren Bildern zu sehen sind, werden diese miteinander verknüpft und das erzeugte Modell erhält wiederum Farbinformationen aus den photographischen Aufnahmen. Diese Messmethode kann für den Fern- und Nahbereich eingesetzt werden und Genauigkeiten von wenigen Millimetern erreichen. Nähere Informationen zur Photogrammetrie sind in Kapitel 2.6 erläutert.

Die beschriebenen Methoden werden durch regelmäßige Neuerungen in der Technik laufend optimiert, wodurch eine zunehmende Automatisierung erfolgt und auch die Handlichkeit der Instrumente sich ständig verbessert.

2.2 Funktionsweise LiDAR

Die LiDAR-Technologie (Light Detection and Ranging) arbeitet, wie die Namensverwandtschaft vermuten lässt, ähnlich wie RADAR, verwendet allerdings Laserstrahlen, anstelle von Wellen im Radiofrequenzbereich. Die Laserstrahlen befinden sich im Bereich von Nano- bis Mikrometern, dabei werden Ultraviolett- oder Infrarotstrahlen, sowie Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts verwendet (siehe Abbildung 1). (vgl. Gotzig & Geduld, 2015)

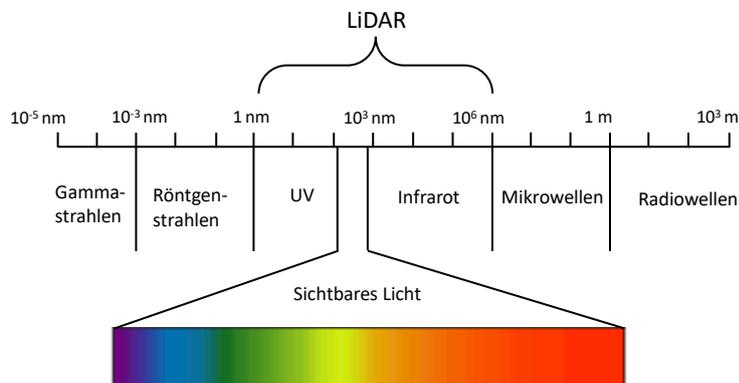


Abbildung 1: Spektrum elektromagnetischer Wellen 1

Der in regelmäßigen Abständen durch eine Laserdiode erzeugte und emittierte Lichtpuls projiziert ein Raster auf das Messobjekt. Die Strahlen werden reflektiert, abgelenkt oder gestreut und das zurückkommende Licht wird im Empfänger des Sensors auf einen Photodetektor fokussiert. Dort wird, aufgrund von Streuung an Molekülen und Partikeln, nur ein Teil des Lichts aufgenommen. Das aufgenommene Licht lässt, nach der elektronischen Auswertung im Sensor, Rückschlüsse auf Position und Beschaffenheit des Objekts zu. Dieser Vorgang wiederholt sich millionenfach pro Sekunde. (vgl. Niemeier, Thomsen, & Schäfer, 2002)

Um die Entfernung zum Objekt zu bestimmen, wird das Time-of-Flight-Verfahren angewandt, also die Messung der Zeit, die der Laserstrahl vom Instrument zum Objekt und zurück benötigt. Da bekannt ist, dass sich das ausgesandte Licht mit 300 000 km/s in der Luft bewegt und es die zu ermittelnde Strecke zweimal zurücklegt, kann die Entfernung mit folgender Formel berechnet werden:

$$Distanz = \frac{300000 \frac{km}{s} * Zeit}{2}$$

¹ Quelle: modifiziert nach <http://www.physicoro.de/umrechnungen/spektrum.php?lg=de>. Abgerufen am 03.01.2022

Das optische Messverfahren gilt als aktive Distanzmessung, zu der eine Laserquelle benötigt wird, was auch eine Messung bei Dunkelheit ermöglicht. Allerdings kommt die Technologie bei Umwelteinflüssen, wie zum Beispiel Nebel, an seine Grenzen. LiDAR-Systeme generieren schnell dichte Daten, welche aber nicht ohne Weiterverarbeitung verwendet werden können. (vgl. Gotzig & Geduld, 2015)

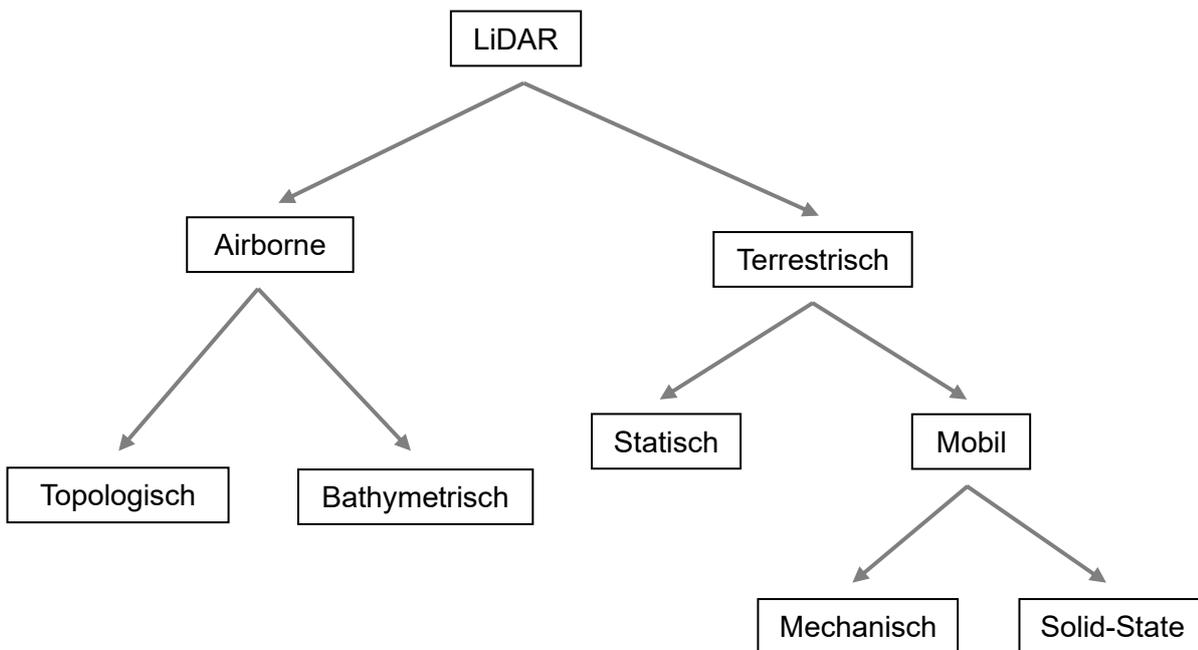


Abbildung 2: Übersicht LiDAR-Systeme

Der Beginn der LiDAR-Technologie liegt in den 1960er Jahren in der Luft- und Raumfahrt, zunächst für die Geländekartierung und für militärische Zwecke. Für den Einsatz in Flugzeugen, Hubschraubern und Satelliten, auch Airborne Laserscanning genannt, waren leistungsstarke Emitter notwendig, was komplizierte und teure Geräte erforderlich machte. Neben Geodaten können auch Informationen für die Meteorologie und Atmosphärenforschung gesammelt werden, da kurze Wellenlängen die Detektion kleinster Partikel ermöglichen. Außerdem ist durch bathymetrische Sensoren auch die topographische Aufnahme von Gewässerbetten möglich. (vgl. Petit, 2020 a)

Des Weiteren existieren terrestrische LiDAR-Scanner, die vom Boden aus die Umgebung mit Hilfe von Spiegeln in mehrere Richtungen abtasten. Diese erzielen eine hohe Präzision und Dichte der Daten und können in der Vermessung von Autobahnen und Zugstrecken, sowie dem Erstellen von 3D-Stadtmodellen eingesetzt werden.

Terrestrische Laserscanner werden weiter in statische und mobile Scanner eingeteilt. Statische Scanner sind zwar vollständig tragbar, dürfen jedoch während dem Scan nicht bewegt werden, da eine Bewegung die Messung verfälschen würde. Mobile Scanner können während der Messung bewegt werden, wodurch schnell eine hohe Datendichte entsteht. Dies

ermöglicht zum Beispiel beim autonomen Fahren das Erfassen von Personen und Objekten. Die mobilen Scanner werden wiederum in mechanisch - rotierende Sensoren, welche einen Antrieb benötigen und auf Halbleitertechnologie basierende, nicht rotierende Solid-State-Systeme unterteilt. Letztere sind deutlich günstiger, kompakter und aufgrund fehlender beweglicher Teile auch weniger störanfällig. (vgl. Petit, 2020 b)

2.3 Entfernungsmessung mit Smartphones

Nicht nur das iPhone der Firma Apple kann Entfernungen im Raum messen, auch andere Smartphone-Hersteller haben entsprechende Sensoren in ihren Geräten verbaut, die mit dem Time-of-Flight-Prinzip arbeiten. Diese verwenden einen einzelnen Infrarot-Lichtimpuls, der das Objekt erhellt und erfassen die davon zurückgesendeten Lichtreflexionen. Durch Algorithmen wird daraus ein ungefähres Abbild der Umgebung berechnet. Diese Modelle sind allerdings ungenau, da der Sensor auch mehrfach reflektiertes Licht aus verschiedenen Richtungen empfängt, was durch die Algorithmen nicht korrigiert werden kann.

Im iPhone wird anstatt eines einzelnen Lichtblitzes ein Lichtpunktegitter erzeugt, welches zu weniger indirekten Reflexionen und dadurch weniger Fehlern führt. Auch für die Gesichtserkennung per Face-ID zum Entsperren des Smartphones wird diese Technologie eingesetzt, allerdings mit einer deutlich höheren Punktdichte und somit einer höheren Auflösung. (vgl. Bezmalinovic, 2021)

2.4 Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)

Bei diesem im LiDAR-Sensor des iPhone verwendeten Laser, „handelt es sich um eine spezielle Struktur eines Halbleiterlasers“ (Lindemann, 2019). Grundsätzlich wandeln Halbleiterlaser elektrischen Strom direkt in Laserlicht um. Sie sind sehr klein und kompakt. Der Unterschied zu herkömmlichen Lasern besteht darin, dass der Laserübergang nicht zwischen zwei Energieniveaus erfolgt, sondern zwischen „Zuständen, die Energieverteilung aufweisen“ (Sigrist, 2018). Bei dem im iPhone verwendeten VCSEL wird die emittierte Laserstrahlung vertikal zur Oberfläche des Wafers ausgesendet. Das Licht wird also direkt von der Oberfläche abgestrahlt, was zu einem kreisförmigen Strahlprofil führt. VCSEL werden für verschiedene Wellenlängen hergestellt. Die vom iPhone Sensor verwendete Infrarotstrahlung liegt in einem Bereich zwischen 780 nm und 1 mm. Abbildung 3 zeigt den Aufbau eines VCSEL. (vgl. Sigrist, 2018)

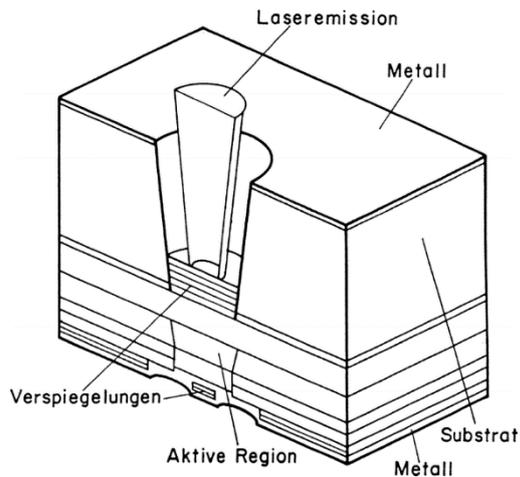


Abbildung 3: Aufbau eines VCSEL ²

2.5 Single-Photon Avalanche Diode (SPAD)

Bei Single-Photon Avalanche Dioden handelt es sich um Photodioden, die zum Empfang von Licht verwendet werden. Sie arbeiten mit der Methoden des pn-Übergangs, bei dem ein Elektronenüberschuss im n-Gebiet besteht. Aufgrund von Diffusion gelangen Elektronen in das p-Gebiet und Defektelektronen (Loch), also entgegengesetzt geladene Teilchen in das n-Gebiet, sodass sich eine Raumladungszone bildet. Bei Beleuchtung entstehen zusätzliche Elektronen-Loch-Paare und es kommt zu einem fließenden Strom, welcher sich proportional zur eingestrahlichten Lichtmenge verhält. Bei APDs, also Avalanche-Photodioden kommt es zu einer lawinenartigen Verstärkung der Feldstärke. Diese sind empfindlicher als herkömmliche Photodioden. SPADs sind sogenannte Photonenzähler, hier löst ein einzelnes Photoelektron den Lawinenimpuls aus. (vgl. Löffler-Mang, 2012)

2.6 Photogrammetrie

In der Photogrammetrie werden Informationen über ein Objekt durch Bildmessung und Bildinterpretation gewonnen. Dabei wird das Messobjekt photographisch aufgenommen. Anhand dieser Bilder kann ein dreidimensionales Modell erstellt werden. Die Messung findet an Abbildungen und nicht am Objekt direkt statt. Um Form und Lage darzustellen, müssen alle erforderlichen Bereiche in den Bildern dargestellt und nicht verdeckt sein.

Dieses Verfahren kann im Fern- und Nahbereich angewandt werden. In dieser Arbeit wird aufgrund der Dimension des Messobjekts und den geforderten Genauigkeiten die Nahbereichsphotogrammetrie angewandt. Der verwendete Sensor ist ein passiver Sensor, da er keine elektromagnetischen Wellen aussendet, sondern die reflektierte Strahlung des sichtbaren Lichts empfängt. Es handelt sich um ein berührungsloses Messverfahren, bei dem

² Quelle: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-57515-4_15#Sec9. Abgerufen am 03.01.2022

für jeden Punkt im Bild Informationen zu Intensitäts-, Grau- und Farbwerten, sowie seiner Lage vorhanden sind.

Für die Rekonstruktion des Objekts sind je Objektpunkt mindestens zwei Bilder erforderlich, bei der Mehrbildauswertung können jedoch beliebig viele Bilder aufgenommen werden. Mittels der Bündeltriangulation wird ein dreidimensionales Modell des Objekts erstellt. Weitere Ergebnisse sind Koordinaten von Objektpunkten, zweidimensionale Karten und Pläne oder Orthofotos. (vgl. Luhmann, 2018)

2.7 Stand der Forschung

Der Einbau von Sensoren zur Erfassung von LiDAR Daten in Smartphones der Firma Apple ist eine relativ neue Technologie, welche auf den ersten Blick sehr vielversprechend wirkt. Ähnliche Systeme wurden auch bereits von anderen Herstellern in mobilen Endgeräten verbaut, diese konnten sich jedoch nicht durchsetzen. Für die Anwendung im iPhone sind einige Applikationen verfügbar, die den LiDAR-Sensor verwenden. Auch verschiedene Unternehmen bieten bereits komplette Systemlösungen an, die mit dieser Technologie arbeiten. Um die Einsatzmöglichkeiten des iPhone LiDAR-Scanners aufzuzeigen, erfolgten Studien und Arbeiten in speziellen Anwendungsbereichen, von welchen drei im Folgenden beschrieben werden.

Im Jahr 2021 wurde eine Bachelorarbeit zum Thema „Leistungsuntersuchung 3D-Erfassung offener Gräben mit LiDAR Smartphones“ durchgeführt. Die Autorin Katja Müller untersucht darin den LiDAR-Scanner des iPhone 12 Pro auf seine Leistungsgrenzen unter verschiedenen Bedingungen. Es werden unterschiedliche Beleuchtungssituationen, Aufnahmedistanzen, sowie die Materialien Holz, Beton, Reflexmarken und PE-Kunststoff bei der Aufnahme mit der Applikation „Scaniverse“ getestet. Anschließend erfolgte die Erfassung von Leitungen zur Entwicklung eines Workflows und die Weiterverarbeitung der Daten in Leica Cyclone. Dabei fällt vor allem auf, dass die Aufnahmedistanz, welche bei maximal fünf Metern liegt und die Objektausdehnung einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse haben. Je größer das aufzunehmende Objekt ist, desto größer ist auch der Drift, der während der Messung entsteht, was das Ergebnis verschlechtert. Trotzdem sind die Daten ausreichend genau für die Anwendung im Leitungskataster. (vgl. Müller, 2021)

Ebenfalls im Jahr 2021 führten die Autoren Christoph Gollob, Tim Ritter, Ralf Kraßnitzer, Andreas Tockner und Arne Nothdurft eine Studie zum Thema „Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology“ durch. Das Ziel der Autoren war die Untersuchung des iPad LiDAR-Scanners bei der Erfassung des Waldbestandes als Alternative zu herkömmlichen Aufnahmemethoden und kostenintensiven Laserscanning-Systemen. Referenzdaten wurden dabei mit dem Personal Laser Scanner (PLS) GeoSLAM ZEB HORIZON erfasst und mit den Daten des iPad verglichen. Die Ergebnisse des PLS sind in den Punkten Erkennungsrate und mittlere quadratische

Abweichung zwar besser, jedoch gelangten die Autoren zu der Erkenntnis, dass die Messung mit dem iPad für diese Anwendung grundsätzlich möglich ist und eine genauere Darstellung und effizientere Erfassung im Vergleich zu herkömmlichen Ansätzen bietet. (vgl. Gollob, Ritter, Kraßnitzer, Tockner, & Nothdurft, 2021)

Auch die dritte Arbeit aus dem Jahr 2021 mit dem Titel „Comparison of iPad Pro's LiDAR and True Depth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution“ vergleicht Daten des LiDAR-Sensors im iPhone mit bisher angewendeten Aufnahmeverfahren. Die Autoren Maximilian Vogt, Adrian Rips und Claus Emmelmann erwarteten daraus Erkenntnisse zur möglichen Anwendung des LiDAR-Sensors in 3D-Scanning-Verfahren. Die Untersuchung erfolgte durch das Scannen verschiedener Legosteine mit dem iPad und einem industriellen 3D-Scanner. Die erfassten Daten wurden anhand Form und Position der Messobjekte miteinander verglichen und es wurden Abweichungen herausgearbeitet. Auch hier liefert der industrielle Scanner genauere und akkuratere Ergebnisse. Der Einsatz des iPad kann jedoch, je nach Anforderungen und Anwendung, ausreichend sein. (vgl. Vogt, Rips, & Emmelmann, 2021)

Für die Verwendung des LiDAR-Scanners in mobilen Endgeräten der Firma Apple wurden bereits einige Anwendungsbereiche erfolgreich untersucht. Um hier anzuknüpfen und neue Nutzungsmöglichkeiten aufzuzeigen, ist die weitere Forschung zu diesem Thema notwendig. In dieser Arbeit soll daher die Anwendung für die Aufnahme von kleineren Innenräumen und Teilen von Bestandsaufnahmen untersucht werden. Die aktuellen Weiterentwicklungen im Bereich LiDAR, auch im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren, geben Grund zur Annahme, dass die Technologie auch in Zukunft weiter optimiert wird und auch in Form von kleineren Geräten und Instrumenten in der Vermessung Anwendung finden wird.

3 Ziele der Arbeit

Die Arbeit in der Vermessung steht immer mehr im Spannungsfeld, die Messungen so genau wie nötig und so wirtschaftlich wie möglich, also mit möglichst geringem Zeit- und Personalaufwand durchzuführen. Mit zunehmender Automatisierung der Vermessungsinstrumente rückt dieses Ziel näher. In einigen Teilbereichen besteht aber die Möglichkeit zur weiteren Optimierung. Daher werden neu entwickelte Technologien und Geräte auf ihre Brauchbarkeit in der Vermessung untersucht.

Um geeignete Vermessungsaufgaben für die Untersuchung zu finden, werden Situationen in der praktischen Vermessung gesucht, bei denen Potenzial zur Verbesserung besteht. Dabei soll zum einen der Zeitaufwand verringert, aber auch die Qualität und Vollständigkeit der erfassten Daten verbessert werden.

Die Anwendungsgebiete, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind Teile von Bestandsaufnahmen und die Aufnahme von kleinen Innenräumen. Bestandsaufnahmen werden in der Praxis meist mit GNSS-Empfängern oder Tachymetern durchgeführt. Diese

Messungen können aufgrund von Handlichkeit und Automatisierung der Instrumente, zum Beispiel durch die Zielverfolgungsfunktion der Tachymeter, meist von einer einzigen Arbeitskraft ausgeführt werden. Allerdings bestehen hier immer wieder Schwierigkeiten, die Objekte mit diesen Instrumenten ausreichend zu erfassen.

Eine Alternative dazu ist die Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner. Da er aber nicht für alle Teile einer Bestandsaufnahme sinnvoll verwendet werden kann, ergibt sich daraus wiederum ein größerer Zeitaufwand, welcher die Messung erschwert und verteuert. Der Einsatz der teuren terrestrischen Laserscannern, ist aufgrund ihrer schwierigen Handhabung hinsichtlich Größe und Gewicht, nur mit mehreren Arbeitskräften realisierbar. Zudem ist er in einigen Fällen schwer zu positionieren. Dies führt wiederum zu einem größeren Arbeitsaufwand, höheren Kosten, sowie unflexiblen Einsatzmöglichkeiten. Außerdem gehören terrestrische Laserscanner nicht zu den Messinstrumenten, die bei der Planung des Außendienstes standardmäßig für Bestandsaufnahmen berücksichtigt werden.

Für die Aufnahme von Innenräumen wird mittlerweile häufig die Messung mit terrestrischen Laserscannern gewählt. Hier ist deren Anwendung sinnvoll und bereits praxiserprobt. In besonders verwinkelten Räumlichkeiten oder engen Treppenhäusern muss dabei jedoch mit einer großen Anzahl an Standpunkten gearbeitet werden, um das gesamte Objekt zu erfassen. Außerdem gibt es auch hier Fälle, in denen ein terrestrischer Laserscanner nicht oder nur schwer zu positionieren ist. Für diese Situationen wäre der Einsatz eines mobileren Messgeräts von Vorteil.

Hier ist der Ansatz meiner Arbeit, in der untersucht wird, ob einzelne kleinere Räume oder besonders aufwändig aufzunehmende Bereiche mit alternativen Messmethoden erfasst und anschließend in den Scan eingefügt werden können. Es wird eine Möglichkeit gesucht, schwierig zu erfassende Objekte möglichst genau, aber mit weniger Personal- und Zeitaufwand, sowie günstigeren Messmitteln als bisher aufzunehmen. Dabei ist das iPhone mit LiDAR-Sensor eine Option, die getestet werden soll.

Außerdem soll geprüft werden, ob anhand einer photogrammetrischen Aufnahme mit dem iPhone eine qualitativ ausreichende Punktwolke einer kleineren Treppenanlage erzeugt werden kann. Auch dies wäre eine Alternative, um die Messungen einfacher und zeitsparender zu gestalten.

Ein Ziel ist es herauszufinden, ob die Erfassung von den oben genannten Objekten mit dem iPhone in der Vermessung überhaupt praktikabel ist. Außerdem sind die Grenzen bezüglich der Größe von Messobjekten und das grundsätzliche Feststellen von Anwendungsbereichen dieser Messmethode von Interesse. Ein wesentlicher Faktor für die Grenzen der Anwendung des iPhones ist der Drift der verbauten Sensoren. Daraus kann abgeleitet werden, ob die untersuchten Methoden für Vermessungsbüros interessant sind.

Weiter sollen in der Arbeit verschiedene, im App-Store verfügbare Applikationen im Vermessungseinsatz getestet und nach Anwendbarkeit bewertet werden. Die aus den Apps entstandenen Punktwolken, sowie auch die mit dem TLS aufgenommenen Punktwolken, sollen mithilfe einer Software zur Herstellung eines Raumbezugs weiterverarbeitet werden. Dieser wird benötigt, um die Punktwolken miteinander zu vergleichen und dadurch Aussagen über die Brauchbarkeit der Daten zu treffen. Außerdem erfolgt die Untersuchung der Punktwolken auf Genauigkeit, Punktdichte und Vollständigkeit.

Folgende Fragen sollen im Rahmen dieser Arbeit behandelt werden:

- Ist das iPhone in der Vermessung praktisch anwendbar und wenn ja für welche Bereiche?
- Welche Vorteile bietet die Messung mit dem LiDAR-Scanner des iPhones gegenüber anderen Messmethoden?
- Welche Genauigkeit ist mit dem LiDAR-Scanner des iPhones möglich?
- Wie groß ist die maximale Reichweite des im iPhone verbauten LiDAR-Scanners und welche Faktoren haben darauf Einfluss?
- In welchen Größenordnungen können Objekte sinnvoll und ausreichend genau mit dem LiDAR-Scanner erfasst werden?
- Wie verhält sich die Punktdichte der entstandenen Punktwolken?
- Welche Applikationen können sinnvoll eingesetzt werden und wie unterscheiden sich diese voneinander?
- Welche Dateiformate für die Ausgabe der Scan-Daten werden von den Applikationen unterstützt und sind diese mit den verwendeten Softwares zur Punktwolkenbearbeitung kompatibel?
- Kann die mit dem iPhone aufgenommene Punktwolke in ein Koordinatensystem eingepasst werden und wie gut ist deren Qualität?
- Ist die aus der photogrammetrischen Aufnahme erzeugte Punktwolke qualitativ ausreichend und welche Genauigkeiten sind erreichbar?
- Wie gut sind die Ergebnisse im Vergleich zu einer mit einem TLS aufgenommenen Punktwolke?

4 Methodik

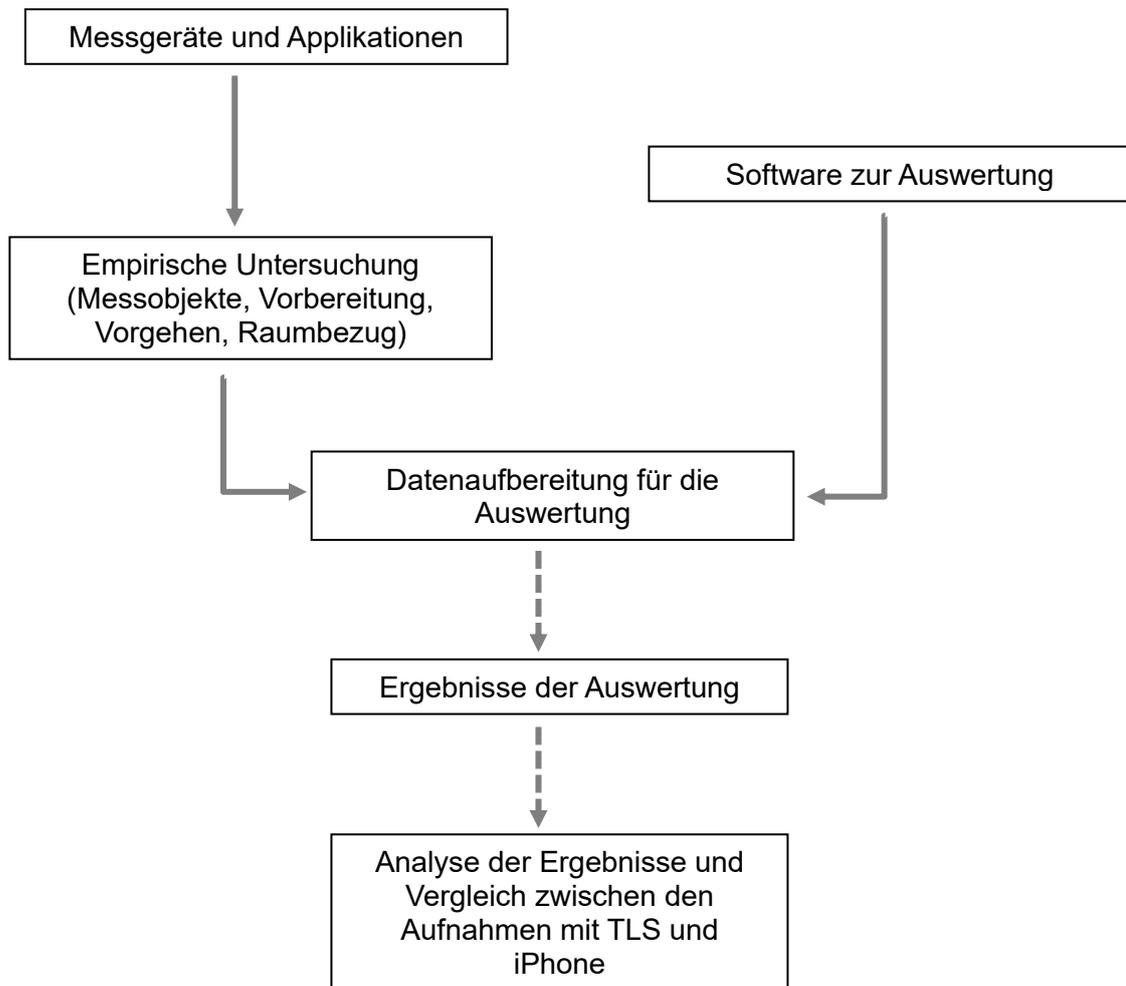


Abbildung 4: Graphische Übersicht über das methodische Vorgehen

Um die Verwendung des LiDAR Sensors im iPhone in der Vermessung zu untersuchen, sind realitätsnahe Messobjekte und Referenzdaten von praxiserprobten Vermessungsinstrumenten erforderlich. Da die Anwendung des iPhones die bisherigen Messungen erleichtern sollen, werden für die Untersuchung Objekte gesucht, deren Aufnahme mit dem Tachymeter schwierig ist. Dabei fiel die Wahl auf Treppenanlagen, da deren Vermessung, vor allem bei unregelmäßiger Form, aufwändiger sein kann. Außerdem können bei der anschließenden Auswertung, ohne exakte und zeitlich aufwändige Feldbuchführung, Fehler und Unstimmigkeiten auftreten, da die Punkte im CAD-Programm nicht der richtigen Lage zugeordnet werden können.

Des Weiteren soll die Aufnahmemethode in kleinen Innenräumen getestet werden. Auch diese sind häufig Gegenstand von Messaufträgen. Hier wird bisher aber, wenn möglich, die Messung mit dem terrestrischen Laserscanner gewählt.

Im Vorfeld der Messungen wurden verschiedene Applikationen, die den LiDAR-Sensor des iPhones verwenden, getestet. Dabei sind zwei Apps positiv aufgefallen, die in Handhabung und Ergebnissen den anderen überlegen waren. Diese werden im Weiteren näher beschrieben.

Für die Aufnahme der Referenzdaten wird der terrestrische Laserscanner ScanStation P40 der Firma Leica verwendet. Zusätzlich sollen die photogrammetrische Aufnahme mit der Kamera des iPhones und die daraus erzeugte Punktwolke untersucht werden. Hierfür werden testweise photographische Aufnahmen eines Messobjektes gemacht.

Für das Einpassen der Daten in ein Koordinatensystem, in diesem Fall ein Koordinatensystem nach Gauß-Krüger, sollen Passpunkte der jeweiligen Objekte mit den gemessenen, bekannten Punkten verknüpft werden. Für diesen Schritt wird die Software Cyclone der Firma Leica Geosystems eingesetzt. Um aus den Bilddaten ein 3D-Modell zu erstellen, wird die Software Metashape der Firma Agisoft verwendet. Abschließend werden die eingepassten Punktwolken von terrestrischem Laserscanner, vom iPhone LiDAR-Sensor und von der iPhone Kamera in der Software 3DReshaper der Firma Leica Geosystems verglichen und die Abweichungen analysiert.

4.1 Messgeräte

4.1.1 iPhone 12 Pro mit LiDAR-Sensor und verwendeten Applikationen



Abbildung 5: Position des LiDAR-Sensors am iPhone ³

Der im iPhone 12 Pro verbaute und in Abbildung 5 dargestellte Sensor misst den Abstand zu Objekten mit einer Entfernung von bis zu 5 m. Dabei werden die LiDAR-Punkte mit Daten aus der Kamera und den Bewegungssensoren kombiniert (vgl. Apple Inc., 2020). Als Messmethode wird das Time-of-Flight-Prinzip verwendet, also die Messung der Zeit, die die ausgesendeten Laserstrahlen benötigen, um zum Objekt und zurück zu gelangen. Der Scanner arbeitet mit Infrarot-Laserstrahlen, die durch VCSEL (Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers) emittiert werden. Die Laserstrahlen sind nicht sichtbar und für das Auge ungefährlich. Die VCSEL sind günstig herzustellen und sehr kompakt. Gemeinsam mit der SPAD (Single-Photon Avalanche Diode), die die Reflexionen des Lasers empfängt, entsteht ein Chip, der Laserstrahlen

³ Quelle: <https://mixed.de/iphone-12-pro-was-den-lidar-scanner-besonders-macht/>. Abgerufen am 25.01.2022

aussenden und erfassen kann. Er hat keine komplexe Mechanik oder beweglichen Teile, was den Einbau in das iPhone ermöglicht. (vgl. Bezmalinovic, 2021)

Um das Scanmuster der im Infrarotbereich liegenden emittierten Laserstrahlen sichtbar zu machen, wurde eine Wildkamera der Firma Bearstep verwendet. Diese erfasst im Nachtbetrieb Infrarotstrahlung, wodurch Aufnahmen des Punktmusters möglich sind.

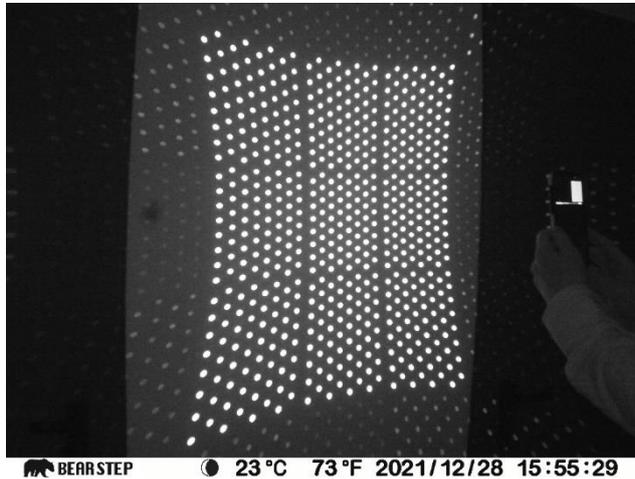


Abbildung 6: Vollständiges Scanmuster des LiDAR-Sensors des iPhone

Das in Abbildung 6 erkennbare Muster besteht aus 9 größeren Punktfeldern mit jeweils 64 Punkten, also einer Gesamtzahl von 576 Punkten für den gesamten Sensor. Der Sensor wird bei Öffnen der Kamera-Applikation (siehe Abbildung 7), sowie den verwendeten Scan-Applikationen, aktiviert. Er findet außerdem bei Anwendungen der Augmented Reality, der Platzierung digitaler Objekte im Raum und dem Messen von Größen von Objekten mit dem Smartphone Verwendung. (vgl. Luetzenburg, Kroon, & Bjørk, 2021)

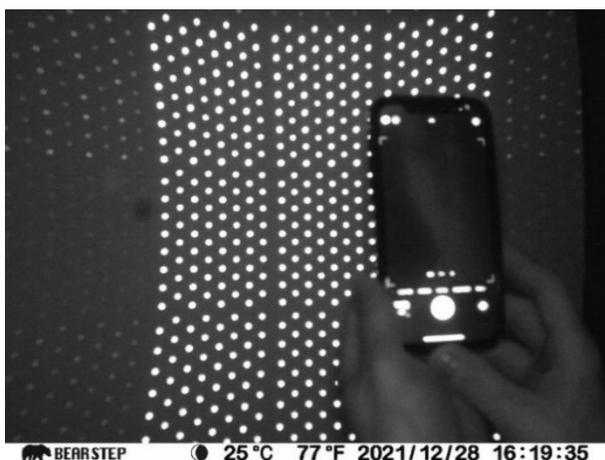


Abbildung 7: LiDAR-Punktmuster bei Verwendung der Kamera-App

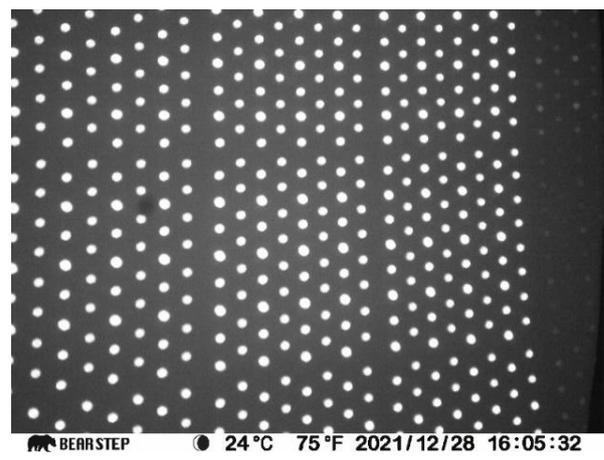


Abbildung 8: Nähere Aufnahme des Punktmusters des iPhone LiDAR-Scanners

Um den LiDAR-Sensor des iPhones als Scanner zu nutzen, sind separate Applikationen erforderlich. Dazu gibt es im App-Store der Firma Apple eine große Auswahl an Apps, allerdings sind nicht alle für die Vermessung geeignet. Viele wurden für den Bereich der Augmented Reality entwickelt, zum Beispiel um Objekte als 3D-Modell zu erfassen und diese in Computerspielen darzustellen.

Einige Applikationen wurden speziell für die Erfassung von Räumen oder Bauwerken entwickelt und liefern dem Nutzer Punktwolken in verschiedenen Dateiformaten. Mehrere dieser Apps wurden getestet und die Ergebnisse nach Brauchbarkeit beurteilt. Dies ist häufig direkt nach der Aufnahme möglich, da die meisten Apps ein 3D-Modell der in der Messung aufgenommenen Bereiche zur Verfügung stellen. Zwei kostenfreie Applikationen haben sich als für die Messungen geeignet hervorgetan. Sie werden im Folgenden näher beschrieben.

Die App „EveryPoint“ der gleichnamigen Firma ist simpel aufgebaut und einfach zu bedienen. Auf der Startseite können einige Einstellungen zu der Messung getroffen werden. Im „Scanning Mode“ sind die Optionen „EveryPoint Video + LiDAR Fusion“, „EveryPoint LiDAR Fusion“, „ARKit LiDAR Points“ und „ARKit LiDAR Mesh“ wählbar. Für die folgenden Aufnahmen wird der Modus „EveryPoint LiDAR Fusion“ verwendet, da dieser am besten geeignet ist.

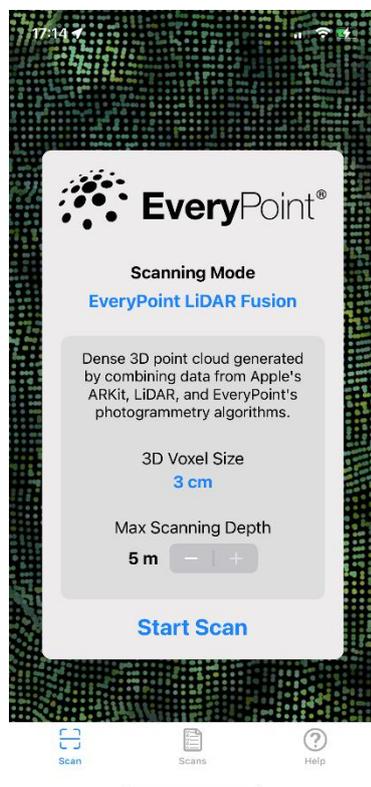


Abbildung 9: Startoberfläche der App EveryPoint

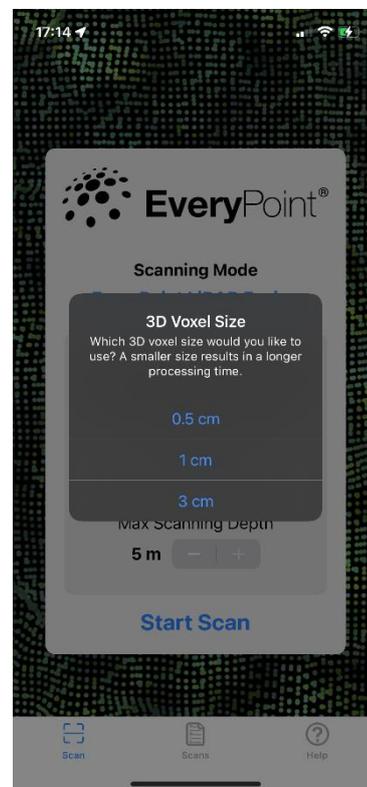
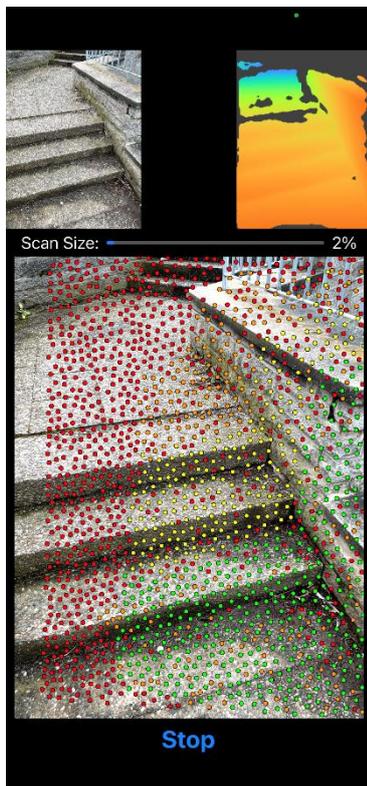


Abbildung 10: Auswahl der Voxel-Größe

Außerdem kann die „3D Voxel Size“, also die Größe des Punktes im dreidimensionalen Gitter, auf 0,5 cm, 1 cm oder 3 cm eingestellt werden. Dieser Parameter ist vergleichbar mit der Größe eines Pixels im zweidimensionalen Bereich.

Die maximale Scantiefe ist variabel in Meterschritten zwischen 1 m und 5 m verstellbar. Weitere Festlegungen können in dieser App vor der Messung nicht getroffen werden.

Nach dem Start des Scans öffnen sich drei Ansichten des Messbereichs und in der Mitte eine Anzeige, die in Prozent angibt, wie groß der momentane Scan im Verhältnis zur maximalen Scangröße ist. Die untere Ansicht in Abbildung 11 gibt den Fortschritt des Scans wieder. Sie zeigt Punkte mit farbiger Abstufung von Rot bis Grün, durch die für den Anwender erkennbar ist, wie gut der jeweilige Bereich erfasst ist. Somit kann bereits während der Aufnahme das Risiko für Lücken in den Datensätzen reduziert werden. Allerdings erscheinen diese Punkte nur, solange der Bereich im Bild ist, wird anschließend erneut dieselbe Stelle gescannt, erscheinen neue Punkte.



Ist die maximale Scangröße der App erreicht, wird die Aufnahme automatisch gestoppt, ansonsten muss sie manuell angehalten werden. Anschließend benötigt die App einige Sekunden für das Verarbeiten der Daten und zeigt dann das 3D-Modell des Scans an. In diesem kann unmittelbar nach der Messung die Punktwolke auf Vollständigkeit und grobe Richtigkeit überprüft werden, bevor der Nutzer entscheidet, ob das Ergebnis gespeichert werden soll. Zum Speichern sind die Dateiformate ply und E57 verfügbar. Zusätzlich werden Farbwerte zu jedem Punkt hinterlegt. Unter „Scans“ sind alle Aufnahmen aufgelistet und können als 3D-Modell betrachtet und exportiert werden. In dieser Arbeit wird die Version 2.9 der Applikation verwendet.

Abbildung 11: Ansicht während der Aufnahme

Auch die Firma LAAN LABS hat mit Beginn des Einbaus von LiDAR-Sensoren in Apple-Geräte einige Apps entwickelt, die diesen Sensor verwenden, darunter auch die 3DScannerApp. Diese ermöglicht 3D-Aufnahmen von Objekten und verwendet neben dem LiDAR-Sensor auch die Kamera, um ein strukturiertes dreidimensionales Netz zu erzeugen.

Auf der Startseite der Applikation sind zwei Grundeinstellungen wählbar, LOW RES oder HIGH RES. LOW RES steht für „low resolution“, also niedrige Auflösung. Diese Einstellung (siehe Abbildung 12) wird für die Aufnahme größerer Bereiche empfohlen. Eine höhere Auflösung in

dieser App kann im Anschluss an die Messung durch Verwendung der Refine-Funktion erzielt werden.

Die Einstellung HIGH RES (siehe Abbildung 13) steht für „high resolution“, also hohe Auflösung. Sie ist für kleinere Objekte geeignet. Hier gibt es weitere Parameter, die vor der Messung festgelegt werden können.

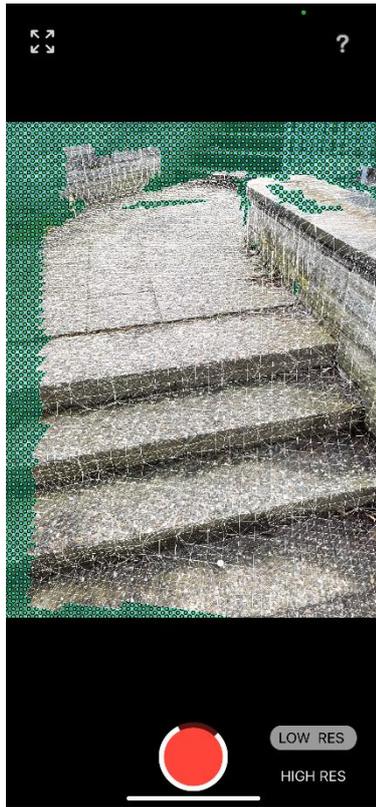
- Confidence: Die wählbaren Optionen sind Low, Medium und High. Dies entscheidet, welche Punktqualität verwendet wird und somit wie zuverlässig das Ergebnis ist. Bei „High“ werden zum Beispiel nur Punkte mit hoher Datenqualität und daher nicht alle erfassten Punkte verwendet.
- Range: Hier ist die maximale Reichweite der Messung einstellbar. Alle erfassten Daten außerhalb dieses Bereichs werden verworfen, dabei kann in 10 cm - Schritten zwischen 0,3 m und 5 m variiert werden.
- Masking: Es kann ausgewählt werden, welche Art von Objekt erfasst wird. Dabei versucht die App einzelne markante Gegenstände im Blickfeld zu isolieren.
- Resolution: Die Auflösung kann auf Werte zwischen 5 mm und 20 mm eingestellt werden. Je nach Auflösung werden mehr Punkte erfasst, allerdings ist auch die Scangröße begrenzt.



Abbildung 12: Einstellung LOW RES



Abbildung 13: Einstellung HIGH RES



Nach dem Start des Scans beginnt die Applikation mit der Aufnahme und legt ein Dreiecksnetz über die bereits erfassten Bereiche. Die noch nicht gescannten Teile werden mit einem grünen Punktmuster versehen, wie in Abbildung 14 zu sehen, sodass auch hier während der gesamten Messung erkennbar ist, welche Bereiche noch aufzunehmen sind. Nach dem manuellen Stoppen des Scans, benötigt auch diese App einige Sekunden zur Verarbeitung der Daten und stellt diese als 3D-Modell dar. Das Modell kann in der App weiterbearbeitet und exportiert werden. Für den Export stehen einige Dateiformate zur Verfügung, darunter auch Formate, um Punktwolken auszugeben, wie ply, E57, pts oder las. Unter „Scans“ sind alle Aufnahmen mit zusätzlichen Informationen zum Umfang der Daten aufgelistet. Zusätzlich zu den Punkten werden Bilder aufgenommen, sodass jedem Punkt ein Farbwert zugeordnet werden kann. In dieser Arbeit wird die Version 1.9.5 der Applikation verwendet. (vgl. Laan Labs)

Abbildung 14: Ansicht während der Aufnahme

4.1.2 Leica ScanStation P40

Um die Qualität der mit dem iPhone aufgenommenen Punktwolken zu vergleichen, wird mit der ScanStation P40 der Firma Leica Geosystems eine Referenzpunktwolke erzeugt. Laut Herstellerangaben beträgt die Reichweitengenauigkeit $1,2 \text{ mm} + 10 \text{ ppm}$ und die Winkelgenauigkeit liegt vertikal und horizontal bei jeweils $8''$. Als Distanzmessmethode wird das Impulsmessverfahren mit Laufzeitmessung mit einer Wellenlänge von 1550 nm verwendet. Der Scanner kann bis zu $1.000.000$ Punkte pro Sekunde bei einer Reichweite von maximal 270 m aufnehmen und besitzt zusätzlich eine Kamera, die im Anschluss an den Scan Farbbilder aufnimmt. Mit Abmessungen von ungefähr $24 \text{ cm} \times 36 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ und einem



Abbildung 15: Leica ScanStation P40

Gewicht von $12,25 \text{ kg}$ ist die ScanStation unhandlich. Die Steuerung erfolgt über ein Farbdisplay an der Seite des Geräts. Hier können Einstellungen zur Auflösung, Farbe und zum Bereich des Scans getroffen werden. Direkt im Anschluss an den Scan ist die Auswahl und Messung von Zielmarken möglich, die sich zur jeweiligen Aufnahme speichern lassen. (vgl. Walsh Ph.D., 2015)

4

⁴ Quelle: <https://www.directindustry.de/prod/leica-geosystems/product-14324-1682840.html>. Abgerufen am 07.12.2021

4.2 Software zur Auswertung

Zur Auswertung und Analyse der Punktwolken wird unterschiedliche Software benötigt. Zunächst muss die jeweilige Punktwolke über Passpunkte georeferenziert werden, um sie im nächsten Schritt mit den als Referenz genutzten Daten zu vergleichen. Außerdem soll eine Punktwolke aus photographischen Aufnahmen entstehen, wofür eine weitere geeignete Software benötigt wird.

4.2.1 Leica Cyclone

Die Software Cyclone der Firma Leica Geosystems findet Verwendung in der Punktwolkenverarbeitung und besteht aus mehreren Modulen. Eines davon, Cyclone Register, ermöglicht die Registrierung von Laserscandaten. Dabei bestehen verschiedene Optionen zur Einpassung der Punktwolke in das gewünschte Koordinatensystem. In diesem Fall wird dafür die Georeferenzierung über Zielmarken, beziehungsweise markante Passpunkte verwendet.

Beim Scan mit der Leica ScanStation sollen Zielmarken verwendet werden, die, wie bereits beschrieben, direkt im Anschluss an den jeweiligen Scan zu erfassen sind. Sie werden gemeinsam mit der Punktwolke an die Software übergeben und mit den bekannten Koordinaten der Zielmarken aus der tachymetrischen Aufnahme können die erzeugten Punktwolken in das jeweilige Koordinatensystem eingepasst werden. Die mit dem LiDAR-Sensor des iPhone erfassten Daten werden ähnlich registriert.

Nach der Registrierung können in der Constraint List (Abbildung 16) eventuelle Abweichungen angezeigt und somit die Ergebnisse bewertet werden. Der Anwender kann entscheiden, ob die Ergebnisse brauchbar sind und ob diese exportiert und verwendet werden sollen. (vgl. Leica Geosystems, a), (vgl. Leica Geosystems, b), (vgl. Leica Geosystems, c)

Constra...	ScanW...	ScanW...	Type	St...	Wei...	Error	Error Vector	Group...	Group Error ...	Group
102	Station-0...	Station-0...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
102	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
104	Station-0...	Station-0...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
104	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, -0.001, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
103	Station-0...	Station-0...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(0.000, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
103	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.002 m	(0.002, 0.001, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
101	Station-0...	Station-0...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(0.001, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
101	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(0.000, -0.001, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
104	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.002 m	(-0.001, -0.001, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
101	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, -0.001, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
102	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.001 m	(-0.001, 0.000, ...)	n/a	n/a	Ungrou...
103	Station-0...	SCANPU...	Coincident: Verte...	On	1.0000	0.003 m	(0.002, 0.002, ...)	n/a	n/a	Ungrou...

Abbildung 16: Übersicht über Scans und Genauigkeiten in Leica Cyclone

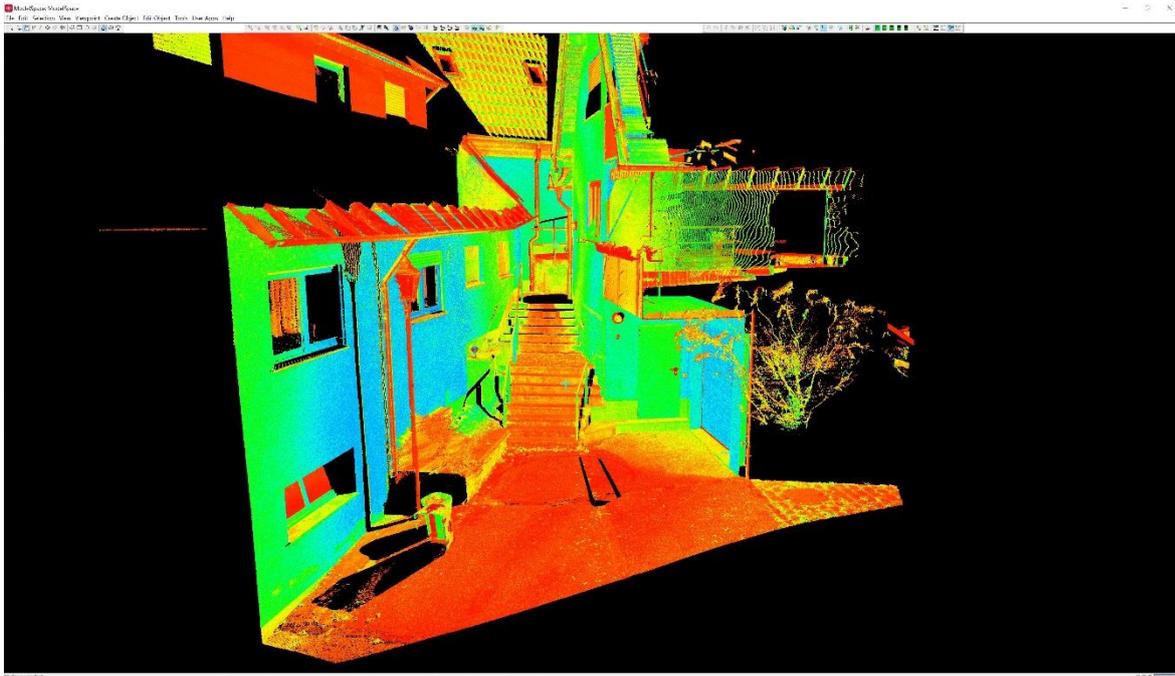


Abbildung 17: Darstellung des Scans mit Intensitätswerten in Leica Cyclone

4.2.2 Agisoft Metashape

Zusätzlich zur Aufnahme mit dem LiDAR-Sensor des iPhones soll auch aus photographischen Aufnahmen mit der Kamera des iPhones eine Punktwolke erzeugt werden. Hierfür eignet sich die Software Metashape der Firma Agisoft, welche Bilder aus RGB- (Rot Grün Blau) oder auch Multispektralkameras verarbeiten kann. Aus diesen Bildern können dichte Punktwolken generiert werden, deren Genauigkeit für Nahbereichsaufnahmen von den Entwicklern mit bis zu 1 mm angegeben wird.

Für die Herstellung einer Punktwolke werden Bilder des Objekts aus verschiedenen Perspektiven benötigt. Zusätzlich können auch hier wieder Passpunkte in den Bildern markiert werden, um die berechnete Punktwolke in ein Koordinatensystem einzupassen. Dafür werden die Koordinaten der jeweiligen Punkte benötigt. Auch hier erhält der Anwender Ergebnisse zu den Abweichungen der Passpunkte aus der Koordinatenliste und der in den Bildern markierten Punkte. (vgl. Agisoft LLC)

4.2.3 Leica 3DReshaper

Wenn die zu analysierenden Punktwolken vorbereitet und georeferenziert sind, werden sie im letzten Schritt miteinander verglichen. Dafür wird die Software 3DReshaper der Firma Leica Geosystems verwendet. Sie dient zur Verarbeitung von Punktwolken und stellt verschiedene Werkzeuge zur Modellierung und Analyse der 3D-Daten zur Verfügung. Die Punktwolken können bereinigt und segmentiert werden. Dadurch erfolgt das Entfernen von Datenteilen, die für den anschließenden Vergleich nicht benötigt werden. Im nächsten Schritt wird der Vergleich

in derselben Software durchgeführt. Dafür sind zwei Punktwolken notwendig, von welchen eine als Referenz dient, in diesem Fall die Daten der ScanStation. Anschließend wird die zu bewertende Punktwolke, je nach Abweichung zur Referenz, eingefärbt. Diese Farbgebung kann beliebig angepasst werden. (vgl. Leica Geosystems, d)

4.3 Empirische Untersuchung

4.3.1 Workflow

Die Funktion der ausgewählten Applikationen wird an verschiedenen Objekten getestet, die auch bei einem realen Auftrag gemessen werden könnten. Zunächst wird mit den Aufnahmen der ausgewählten Treppenanlagen mit dem LiDAR-Scanner des iPhones gestartet, um einen ersten Eindruck der Ergebnisse aus diesem Messverfahren zu erhalten. Anschließend erfolgt die Messung von Referenzpunktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner, welche dazu verwendet werden, die Qualität der iPhone-Punktwolken zu bewerten. Bei dieser Messung ist auch ein Tachymeter notwendig, um die Koordinaten der Zieltafelmitten zu erfassen. Für den Vergleich muss für die Punktwolken der iPhone-Messungen ein Bezug zum selben Koordinatensystem hergestellt werden, das auch für die Referenzpunktwolken verwendet wird. Die Georeferenzierung der Daten aus beiden Aufnahmeverfahren erfolgt in derselben Software, jedoch mit unterschiedlichen Punkten.

Testweise wird von einem der ausgewählten Treppenobjekte ebenfalls eine photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone erstellt und das Ergebnis wiederum mit der Referenzpunktwolke verglichen. Auch hierfür werden Passpunkte benötigt, die im Zuge der Aufnahme der Zieltafeln mit dem Tachymeter erzeugt werden. Nach Verarbeitung der Bilder mit der vorgestellten Software und dem Erstellen der Punktwolke, kann auch diese in den Vergleich miteinbezogen werden.

Für die Messung der Innenräume wird kein Bezug zu einem bestimmten Koordinatensystem hergestellt. Diese dient vorerst nur zur Beurteilung der äußeren Erscheinung der Ergebnisse. Daher wird für die Innenräume im Folgenden nur auf die Aufnahmen mit dem iPhone und, wie auch bei den anderen Messobjekten, auf Besonderheiten und Auffälligkeiten bei der Messung mit den jeweiligen Applikationen eingegangen.

4.3.2 Messobjekte

Als Messobjekte wurden, wie bereits erwähnt, zum einen Treppenanlagen ausgewählt, die so auch im Zuge einer Bestandsaufnahme gemessen werden könnten und auch kleinere Innenräume. Die Treppen befinden sich alle in Remseck am Neckar. Zwei Treppen sind Bestandteil von öffentlichen Wegen, die dritte befindet sich seitlich an einer Kirche. Die Messungen erfolgten mit Zustimmung der Eigentümer. Bei der Auswahl der Objekte wurde darauf geachtet, dass sie bei der dreidimensionalen Aufnahme mit dem Tachymeter schwierig zu erfassen sind, so wie es auch bei einem realen Auftrag der Fall wäre. Die Treppen sollten also möglichst unsymmetrisch aufgebaut sein und durch zusätzliche Mauern und Absätze eine ungleichmäßige Form haben.



Die erste Treppe im Stadtteil Hochdorf ist ein typisches Beispiel für ein Messobjekt, bei dem sich die Aufnahme mit dem Tachymeter schwierig gestaltet. Was zunächst auffällt, sind mehrere Absätze und Belagswechsel an den Seiten der Treppe. Außerdem läuft sie nach oben enger zu und die Stufen haben seitlich keine einheitliche und gerade Begrenzung. Ohne Feldbuchführung oder einem guten System bei der Aufnahme würde es hier schwerfallen, die aufgenommenen Punkte bei der anschließenden Auswertung im CAD-System der richtigen Stelle an der Treppe zuzuordnen.

Abbildung 18: Messobjekt Hochdorf (Treppe)



Abbildung 19: Messobjekt Neckargröningen (Treppe)

Beim zweiten Objekt handelt es sich um eine eher kleine Treppe an der Seite einer Kirche im Stadtteil Neckargröningen. Dabei war vor allem die Form interessant. Diese Treppe geht, wie in Abbildung 19 zu erkennen ist, nicht gerade von einer Ebene zur nächsten, sondern verläuft geschwungen um eine Kurve. Das hat zur Folge, dass die Stufen keine rechteckige Form haben und stattdessen zum inneren Bereich der Kurve schmaler werden. Auch in diesem Fall ist das Objekt durch herkömmliche Aufnahmeverfahren schwer zu erfassen, was durch die Messung einer Punktwolke mit dem Smartphone vereinfacht werden könnte.



Abbildung 20: Messobjekt Neckarrems (Treppe)

Die dritte und großräumigste Treppe befindet sich im Stadtteil Neckarrems. Hier ist die Aufnahme der angrenzenden Mauer interessant, da durch mehrere Ecken und Versprünge auf die verschiedenen Höhen und Ebenen der Mauerteile geachtet werden muss. Zusätzlich soll untersucht werden, wie sich die Aufnahme mit dem iPhone und den verschiedenen Applikationen verhält, wenn das Objekt größer und langgestreckter ist. Mögliche Abweichungen, Verschiebungen oder Verdrehungen der Punktwolke können sie für die spätere Auswertung unbrauchbar machen. Falls der LiDAR-Scanner in dieser Größenordnung bereits an Grenzen stößt, wäre dies für die Bewertung der Verwendung im Vermessungseinsatz relevant.

Des Weiteren wurden kleinere Innenräume für die Aufnahme mit dem iPhone gewählt. Diese befinden sich in einem mehrstöckigen Wohngebäude in Reutlingen, welches von innen und außen mit dem TLS gescannt wurde, um den Bestand zu erfassen. Zwei der Räume werden also zusätzlich auch mit dem iPhone erfasst. Da die Wohnungen, in denen sich die Räume befinden, zum Zeitpunkt der Aufnahme leer standen, konnten sie unter weitgehend optimalen Bedingungen, ohne störende Möbelstücke, erfasst werden.

Der erste Raum, im Folgenden als Innenraum 1 bezeichnet, befindet sich im Dachgeschoss des Gebäudes und hat aufgrund der Dachschräge einige nicht genau vertikale Wände. Decke und Wände sind komplett mit Holz verkleidet, was eine neue Oberfläche zum Testen der Anwendungen bietet. Außerdem beinhaltet der Raum einige schwerer zu erfassende Bereiche, die durch Stützen und Balken verdeckt sind. Der Raum ist eher klein mit einer niedrigen Decke, sodass die Reichweite des iPhones für die Messung ausreicht. Der Zugang zu dieser Wohnung ist nur über eine schmale, enge Treppe möglich, was den Transport eines terrestrischen Laserscanners hierher erschwert.



Abbildung 21: Messobjekt Innenraum 1



Ein weiterer kleiner Raum, im Folgenden als Innenraum 2 bezeichnet, befindet sich im selben Gebäude, allerdings ein Stockwerk tiefer. Trotzdem sind auch hier einige Dachschrägen vorhanden, die die Aufnahmen interessant gestalten. Die Decke des Raums ist ebenfalls mit Holz verkleidet, die Wände dagegen verputzt, was wiederum zu einer neuen, noch nicht getesteten Oberfläche führt. Einige Möbel in dem Raum verdecken Teile der Kanten und Ecken, der Großteil ist aber sichtbar.

Abbildung 22: Messobjekt Innenraum 2

4.3.3 Vorbereitung

Bevor mit den eigentlichen Messungen begonnen werden kann, müssen die gewählten Applikationen und deren Einstellungen getestet werden. Dafür wird eine gut zugängliche Treppenanlage verwendet, welche in den Außenmaßen mit dem größten der verwendeten Messobjekte vergleichbar ist. Um sinnvolle Einstellungen für die geplanten Messungen herauszufinden, werden die ausgewählten Apps genauer betrachtet. Die Reichweite wird aufgrund der Größe einiger Objekte bei der maximalen Einstellung von 5 m belassen, sodass eine möglichst gute Erfassung aller Bereiche garantiert ist. Der Abstand vom iPhone zum Objekt wird während der Messung variiert, beträgt aber an den meisten Stellen ungefähr einen Meter.

Für die Applikation „EveryPoint“ besteht die Möglichkeit, eine Änderung der Voxel Size vorzunehmen. Die Tests ergeben, dass 3 cm hier einen zu großen Abstand der Punkte darstellt, durch welchen nicht mehr genügend Details in der späteren Punktwolke erkennbar sind. Daher werden für die Messungen nur die Einstellungen 0,5 cm und 1 cm verwendet.

Bei der 3DScannerApp werden drei verschiedene Einstellungen gewählt. Zum einen „low res“, bei welchem keine weiteren Veränderungen vorgenommen werden können und „high res“ erneut mit 0,5 cm und 1 cm Auflösung. Bei Verwendung der Einstellung „high res“ wurde am Testobjekt festgestellt, dass die Erfassung nicht einwandfrei funktioniert und einige Lücken in der Punktwolke vorhanden sind. Daher ist im weiteren Vorgehen zu testen, ob dies an der Art des Objekts oder eventuell an dessen glatter Oberfläche liegt. Aus diesem Grund wird die Einstellung, trotz mangelhafter Ergebnisse, auch in der eigentlichen Messung verwendet. Außerdem wurde bei den Testmessungen festgestellt, dass optimale Ergebnisse nur erzielt werden, wenn am unteren Ende der Treppe begonnen und von rechts nach links in serpentinartigen Bewegungen nach oben gemessen wird, wie in Abbildung 23 dargestellt.

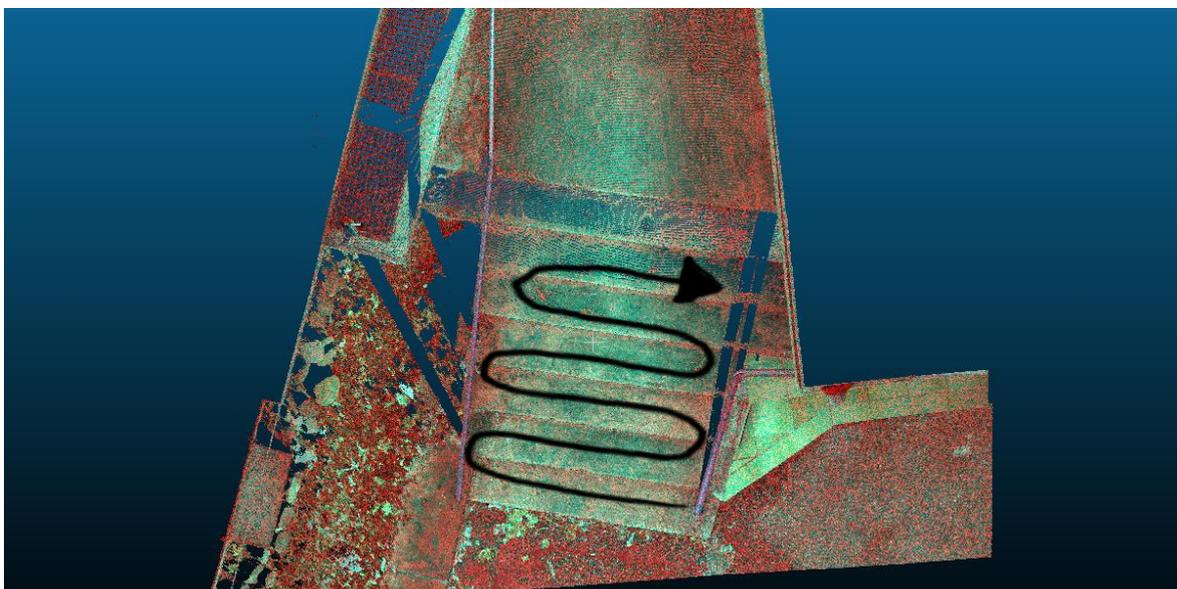


Abbildung 23: Vorgehen bei der Messung

Darüber hinaus wird im Vorfeld das Vorgehen bei der tachymetrischen Messung festgelegt, mit welcher die benötigten Passpunkte für alle Messmethoden geschaffen werden. Die Festpunktmessung erfolgt mittels GNSS-Empfänger, wofür bereits eine grobe Anordnung je Messgebiet festgelegt wird.

Für die Messung der Innenräume müssen keine besonderen Vorbereitungen getroffen werden. Hierbei wird lediglich die Aufnahme mit dem iPhone LiDAR-Scanner durchgeführt, da die Messung mit dem TLS bereits im Rahmen eines Auftrags des Hauseigentümers erfolgt.

Auch für die photogrammetrischen Aufnahmen sind wenige zusätzliche Maßnahmen im Vorfeld notwendig. Es können die für die Passpunktmessung von TLS und LiDAR-Scanner des iPhones erzeugten Festpunkte auch für diesen Teil der Aufnahme verwendet werden, einzig die Anordnung der Passpunkte muss festgelegt werden.

4.3.4 Vorgehen Aufnahme mit TLS und LiDAR-Scanner des iPhones

Zu Beginn der Messungen werden Aufnahmen mit dem LiDAR-Scanner des iPhone erstellt. Damit soll herausgefunden werden, ob das Gerät für den Vergleich brauchbare Daten liefert. Hierfür werden alle Treppenanlagen mit den zuvor ausgewählten Einstellungen der Applikationen erfasst. Die jeweilige Treppe wird in der zuvor beschriebenen Vorgehensweise gescannt und es wird darauf geachtet, dass alle gewünschten Bereiche erfasst sind. Teilweise müssen Objekte in mehreren Teilen aufgenommen werden, da die maximale Scangröße, vor allem bei größerer Punktdichte, nicht immer ausreicht, um das gesamte Objekt auf einmal zu erfassen. Dieses Problem tritt hauptsächlich bei der Applikation EveryPoint auf. Um trotzdem keine Lücken im Scan zu schaffen, muss darauf geachtet werden, einen Teil des zuvor aufgenommenen Bereichs auch im zweiten Teil der Messung zu erfassen. Da die Ergebnisse dieser Messung lediglich für eine erste grobe Beurteilung der Daten vorgesehen sind, wird noch kein Raumbezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem hergestellt. Im Anschluss an jede Messung erfolgt die Überprüfung der Punktwolken in den Applikationen, um bereits vor Ort Lücken auszuschließen oder Nachmessungen durchzuführen. Nach Übertragen der Daten auf ein externes Speichermedium werden diese zur genaueren Betrachtung in die Software 3DReshaper eingelesen und überprüft. Wie in Abbildung 24 beispielhaft zu sehen, liefern die Punktwolken alle eine gute Darstellung der Treppenanlagen und es können die Referenzmessungen mit dem terrestrischen Laserscanner vorgenommen werden.

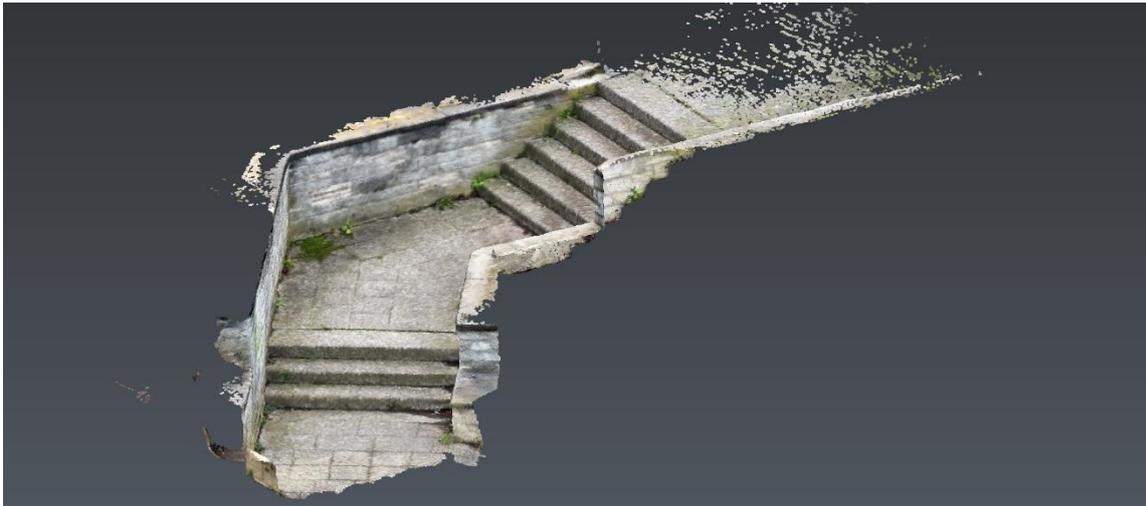


Abbildung 24: Messobjekt Neckarrems, aufgenommen mit der Applikation EveryPoint

Für die Messung mit dem terrestrischen Laserscanner sind im Vorfeld Zielmarken (siehe Abbildung 25) anzubringen und die Koordinaten der Marken mittels Tachymeter zu bestimmen. Dafür werden mit einem GNSS-Empfänger Festpunkte im Umfeld des Messbereichs geschaffen, welche UTM-Koordinaten erhalten. Über diese Punkte erfolgt die Stationierung des Tachymeters. Für ein genaues Ergebnis und um die Zieltafeln in zwei Lagen aufzunehmen, kann es erforderlich sein, weitere Festpunkte zu schaffen. Außerdem werden in diesem Zug die markanten Punkte aller Treppenanlagen erfasst, um sie für die spätere Referenzierung der Punktwolken aus der iPhone-Messung zu verwenden. Wenn diese Tätigkeiten durchgeführt sind, kann der TLS positioniert und der Scan gestartet werden. Die gewählte Auflösung des Scans beträgt 6,3 mm bei einer Entfernung von 10 m. Da die Farbe der Scanpunkte mit den Farben der Messobjekte übereinstimmen soll, müssen zusätzlich zum Scan durch den Laserscanner Fotos aufgenommen werden, was die Scanzeit um mehrere Minuten verlängert. Im Anschluss an den jeweiligen Scan werden alle sichtbaren Zieltafeln gesondert erfasst, um die Auswertung zu erleichtern. Dieses Vorgehen ist an allen Treppenobjekten gleich. Teilweise



muss von zwei Standpunkten aus mit dem TLS gemessen werden, um die gesamte Treppe zu erfassen. Die Messprotokolle und Pläne zur Anordnung von Fest- und Passpunkten, sowie Scanstandpunkten sind den Anlagen A und C zu entnehmen.

Abbildung 25: Zielmarke ⁵

⁵ Quelle: <https://www.mpsurvey.co.uk/product/black-and-white-tilt-and-turn-target/>. Aufgerufen am 25.01.2022

Um die Daten der Punktwolken aus der Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner mit denen des iPhones zu vergleichen und um zu prüfen, ob eine Messung mit dem iPhone in eine Bestandsaufnahme eingefügt werden kann, wird ein Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem wie Gauß-Krüger oder UTM benötigt. Da Zieltafeln von den Applikationen nicht selbstständig erkannt werden, sind zur Herstellung eines Raumbezugs markante Punkte im Objekt, wie Ecken der Treppen und Mauern, zu verwenden. Zu kleine Objekte wie Nägel oder auch das schwarz-weiß Muster von Zieltafeln sind aufgrund der Auflösung im Scan nicht immer zuverlässig erkennbar und somit nicht verwendbar. Die markanten Punkte sollen sich möglichst über das gesamte Objekt verteilen. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Bereiche bestmöglich inbegriffen sind. Durch die Erfassung der gesamten Treppe mit dem Tachymeter sind genügend Punkte vorhanden, die für das Einpassen in Frage kommen. In der späteren Anwendung würden hier, je nach Größe des Objekts, nur einige wenige Punkte genügen. Die Anordnung der Passpunkte je Messobjekt ist in den Anlagen B und C zu entnehmen.

Die vorgestellten Innenräume werden im Rahmen dieser Arbeit nur mit dem LiDAR-Scanner des iPhone erfasst, da hier eine photogrammetrische Aufnahme einen größeren Aufwand darstellen würde, der nicht zielführend ist. Die Messung aller Räume im gesamten Gebäude mit dem terrestrischen Laserscanner erfolgt im Rahmen eines realen Messauftrags. Die Wände werden mit dem iPhone in einem schlangenlinienartigen Muster von oben nach unten erfasst. Dabei wird das iPhone einmal durch den gesamten Raum bewegt. Am Schluss erfolgt die Aufnahme von Boden und Decke des Raumes. Es werden erneut alle Einstellungen getestet, die auch für die Treppenanlagen angewandt wurden. Für die Innenräume wurden keine zusätzlichen Passpunkte mit dem Tachymeter gemessen, hier soll zunächst nur beurteilt werden, ob die Applikationen die Räume ausreichend erfassen.

4.3.5 Vorgehen photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone

Vom kleinsten Messobjekt, der Treppe in Remseck-Neckargröningen, wurden zusätzlich Bilder mit dem iPhone aufgenommen. Das Smartphone besitzt drei Kameras auf der Rückseite, eine Ultraweitwinkelkamera, die Hauptkamera und eine Telekamera. Die Kameras haben jeweils eine Auflösung von 12 Megapixeln. Verwendet wird die Hauptkamera mit einer Brennweite von 26 mm.

Die aufgenommenen Bilder müssen sich gegenseitig überlappen, um das Berechnen einer Punktwolke zu ermöglichen. Das Smartphone wird von links nach rechts über die Treppe bewegt und es wird ungefähr alle 30 cm ein Bild aufgenommen. Gestartet wird am Fuß der Treppe, damit auch die vertikalen Flächen der Stufen erfasst sind. Am Ende der Treppe werden auch Bilder des Podests und erneut der Treppenflächen von oben aufgenommen. Daraus ergeben sich 93 Bilder, die mit dem iPhone innerhalb weniger Minuten erzeugt werden.

Die photogrammetrische Aufnahme mit der Kamera des iPhones wird über kleine Klebepunkte georeferenziert, die vor dem Erzeugen der Bilder angebracht werden. Dabei genügen, aufgrund der Größe des Messobjekts, vier Punkte über die Treppe verteilt, welche bei der tachymetrischen Messung erfasst werden. Die Klebepunkte sind auf den Bildern des iPhones gut zu erkennen und können daher bei der Auswertung relativ genau ausgewählt werden. Dies führt zu einer Optimierung des Ergebnisses und schließt Ungenauigkeiten, die bei der Verwendung von zum Beispiel Mauer- oder Treppenecken auftreten können, aus.



Abbildung 26: Photogrammetrische Aufnahme mit Klebepunkten (bei weißen Pfeilen)

4.3.6 Besonderheiten

Bei den Messungen mit dem LiDAR-Sensor des iPhones fällt auf, dass die Applikationen vor allem bei der Erfassung von großen, gleichmäßigen und einheitlichen Flächen Schwierigkeiten haben. Teilweise werden nicht genügend Punkte erzeugt, um den Bereich ausreichend darzustellen. Besser funktioniert es dagegen, wenn das Objekt viele strukturelle Unterschiede wie Kanten und Ecken aufweist. Daher ist schon während der Messung zu erkennen, dass die Treppen mit vielen Kanten deutlich besser und lückenloser erfasst werden als zum Beispiel die Innenräume mit vielen leeren und einheitlichen Wänden. Auch die verschiedenen Wandoberflächen führen zu Unterschieden in der Erzeugung von Punkten durch die Applikationen. An Wänden mit glatter Tapete werden von den Apps des iPhones fast keine Punkte gemessen, wohingegen eine raue und unebene Fläche mehr Messpunkte ergibt. Die Oberfläche benötigt also Textur oder auch farbliche Unterschiede, um von dem Sensor erfasst zu werden. Der Vergleich ist in den Abbildungen 27 und 28 sichtbar.

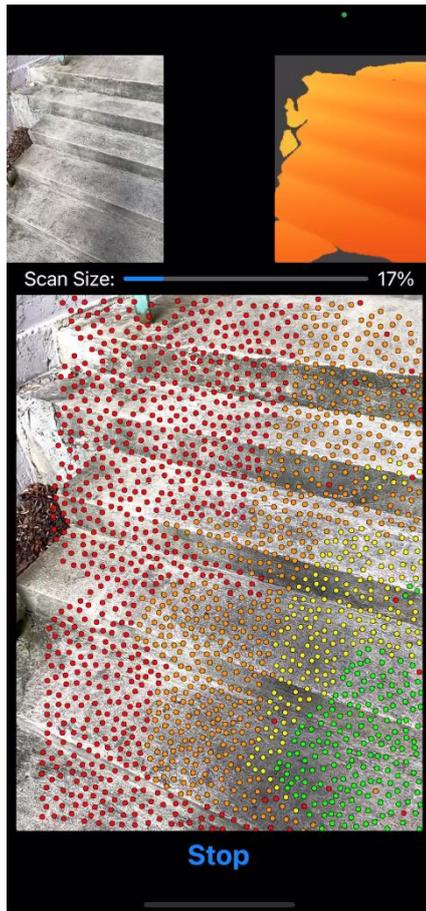


Abbildung 27: Punktdichte bei der Aufnahme einer Treppenanlage

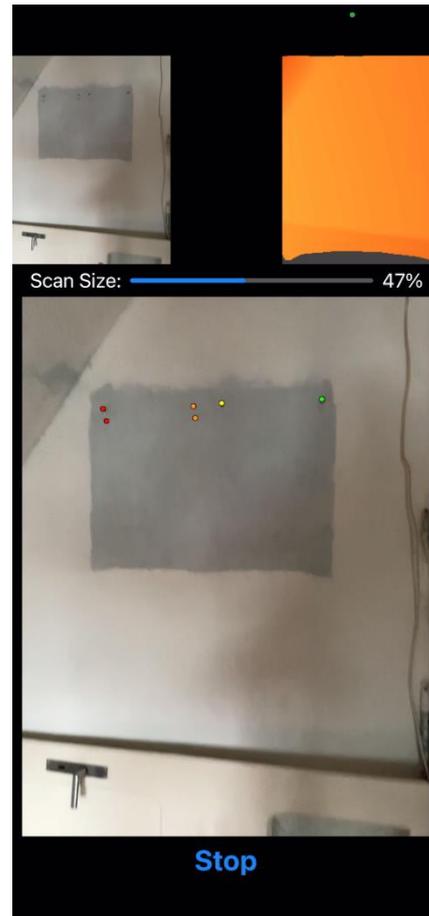


Abbildung 28: Punktdichte bei der Aufnahme einer Wandfläche

Bei einer Messung in Dunkelheit können überhaupt keine Scanpunkte durch die Applikationen erzeugt werden, selbst bei schwachem Lichteinfall werden keine guten Ergebnisse erzielt. Da LiDAR-Systeme die Fähigkeit besitzen, auch im Dunkeln zu messen, ist dies mit den Bildern, die die Applikationen zusätzlich aufnehmen, in Verbindung zu bringen. Bei der 3DScannerApp ist zudem aufgefallen, dass die Einstellung „high res“ bei der Erfassung von großen Objekten und Flächen keine guten und nur lückenhafte Ergebnisse liefert.

Die Abbildungen 29 und 30 zeigen die schlechte Erfassung von Zielmarken mit den Applikationen des iPhones. Sie werden im Scan teilweise verschoben, doppelt oder an der falschen Position dargestellt.



Abbildung 29: Zielmarken erfasst mit 3DScannerApp, verschoben und an falscher Stelle dargestellt



Abbildung 30: Zielmarken erfasst mit 3DScannerApp

4.4 Datenaufbereitung für die Auswertung

Die gewonnenen Daten können nicht unbearbeitet für den Vergleich der Punktwolken verwendet werden und es bedarf einiger Schritte im Voraus. Dabei ist vor allem interessant, ob die in den Applikationen zur Verfügung gestellten Dateiformate direkt mit den jeweiligen Softwares kompatibel sind oder ob Zwischenschritte benötigt werden. Außerdem muss ein Weg gefunden werden, um alle Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem, bestenfalls das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, zu transformieren. Nur so kann anschließend der Vergleich zwischen der Aufnahme mit TLS und iPhone durchgeführt werden.

4.4.1 Übertragen der Daten

Das Übertragen der Daten von TLS auf den Computer erfolgt durch ein Netzkabel und eine kompatible Software der Firma Leica, welche bereits praxiserprobt ist und somit keine Schwierigkeiten aufweist. Die Übertragung vom iPhone auf einen Computer mit Windows Betriebssystem gestaltet sich allerdings schwieriger. Bei der Verbindung mit einem USB-Kabel ist lediglich der Zugriff auf aufgenommene Fotos und Videos möglich, nicht aber auf weitere auf dem Gerät gespeicherte Daten. Daher muss eine Möglichkeit gefunden werden, anderweitig den Export der Punktwolken vorzunehmen.

Eine Option ist die Speicherung der Daten in einer Cloud. Je nach Datenmenge und Scangröße, kann die Übertragung der Daten mit diesem Verfahren allerdings einige Zeit in Anspruch nehmen. Falls bisher keine Cloud verwendet wird, bedeutet dies eventuell auch zusätzliche Kosten für eine Firma, die vermieden werden sollen. Außerdem soll auch die Möglichkeit bestehen, die Daten im Feld zu übertragen, was bei schlechter oder fehlender Internetverbindung ein Problem darstellt.

Alternativ können die Daten, wie auch bei der Verwendung von Vermessungsinstrumenten, auf ein externes Speichermedium, wie einen USB-Stick, übertragen werden. Um das iPhone mit dem USB-Stick zu verbinden, wird ein Adapter benötigt, wofür der „Lightning auf USB 3 Kamera-Adapter“ von Apple verwendet wird. Dafür ist zusätzlich eine externe Energiequelle notwendig, da sonst nicht genügend Energie für die Übertragung vorhanden ist. Eine Möglichkeit ist die Verwendung einer Powerbank, sodass die Mobilität dieses Verfahrens erhalten bleibt. Damit können die Daten zuverlässig auf dem externen Speichermedium gesichert werden. In der jeweiligen Applikation kann über die Funktion „Save to Files“ der USB-Stick und der jeweilige Ordner als Speicherort ausgewählt werden. Anschließend folgt die Übertragung der Daten auf den Computer. Diese Vorgehensweise ist zwar aufwändiger, funktioniert aber ohne Schwierigkeiten.

Zum Ausgeben der aufgenommenen Bilder aus dem Smartphone kann, wie bereits erwähnt, das Lightning auf USB-Kabel verwendet werden. Hier muss lediglich vor Beginn der Aufnahme auf das Dateiformat geachtet werden, mit dem die Bilder gespeichert werden. Es wurde das

Format JPEG ausgewählt, da die meisten Betriebssysteme damit kompatibel sind. Diese Festlegungen sind in den Einstellungen des iPhone zu treffen.

4.4.2 Kompatibilität mit der Auswertesoftware

Die Kompatibilität der erfassten Punktwolke aus der Leica ScanStation ist bei den ersten Schritten der Auswertung mit Leica Cyclone einwandfrei. Bei den mit dem iPhone aufgenommenen Daten verläuft das Einlesen in die Software jedoch nicht reibungslos und es müssen einige Zwischenschritte vorgenommen werden. Die verwendeten Applikationen des iPhones stellen einige gängige Dateiformate für Punktwolken zur Verfügung, wie zum Beispiel E57 oder ply in der EveryPoint App oder xyz, ply, pts, las oder E57 in der 3DScannerApp. Für den Export aus beiden Apps wird jeweils ply gewählt, sodass das Format aller Punktwolken einheitlich ist.

Da zur weiteren Bewertung und für den Vergleich zu den Daten aus der Messung mit dem TLS ein einheitliches Koordinatensystem für alle Punktwolken notwendig ist, müssen diese nun verarbeitet werden. Für diesen Schritt muss wiederum mit der Software Leica Cyclone gearbeitet werden. Das Einlesen der ply-Dateien ist zwar zunächst möglich, nach Abschluss des Vorgangs erscheint allerdings eine Fehlermeldung und die Daten sind nicht in der Software vorhanden, können also nicht bearbeitet werden.

Die Lösung dieses Problems ist das Umwandeln der Dateiformate von ply in pts, in welchem auch die Punktwolken der Leica ScanStation ausgegeben werden. Die 3DScannerApp stellt dieses Format zur Verfügung, für die Daten der EveryPoint App ist jedoch eine Umwandlung erforderlich. Das kann erreicht werden, indem alle Dateien in 3DReshaper importiert und mit geänderter Dateiendung wieder exportiert werden. Dieser etwas umständliche Weg ermöglicht schließlich das Einlesen und die Bearbeitung der Daten in Leica Cyclone.

Bei der Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen wird das Format JPEG verwendet, welches kompatibel mit der Software Agisoft Metashape ist.

4.4.3 Georeferenzierung der Punktwolken aus TLS und iPhone LiDAR-Scanner

Das Referenzieren der gemessenen Punktwolken erfolgt durch die Verwendung von Passpunkten, wobei für TLS- und iPhone-Daten unterschiedliche Punkte verwendet werden. Die mit dem Tachymeter erfassten Punkte werden im UTM-Koordinatensystem (Universal Transverse Mercator) gemessen, da auch die durch den GNSS-Empfänger geschaffenen Festpunkte in diesem System festgelegt werden. Die Punktwolken werden mit dem Maßstab 1,0 gemessen, was keine nachträgliche Bearbeitung des Maßstabs möglich macht. Daher müssen die Koordinaten der Passpunkte vorab in das GK-Koordinatensystem transformiert werden, um Spannungen zwischen den Passpunkten zu vermeiden. Dies erfolgt durch

Einlesen der Punkte in die Software GEOgraf und Transformation des gesamten Projekts. Anschließend kann die Koordinatenliste ausgegeben und, nach der richtigen Anordnung der Koordinatenspalten, für die Georeferenzierung verwendet werden. Die Koordinaten der Passpunkte können Anlage D entnommen werden.

Für das Einpassen der TLS-Punktwolken werden vor jeder Messung Zielmarken angebracht, die in den Scans sichtbar sind. Da diese nach dem jeweiligen Scan noch einmal angezielt und genau aufgenommen werden, sind sie in Zusammenhang mit dem entsprechenden Scan gespeichert und werden beim Import der Daten in Leica Cyclone ebenfalls übergeben. So müssen sie bei der Auswertung nicht manuell ausgewählt werden, sondern werden automatisch erkannt und für die Berechnung verwendet. In der Software wird lediglich die Koordinatenliste der Passpunkte mit dem Scan verknüpft. Nach der Registrierung können mögliche Spannungen und Fehler der Zielmarken in der Constraint List eingesehen werden. Hier würden auch Fehler oder ein Vertauschen der Punktnummern auffallen. Sind die Abweichungen in einem erwarteten Bereich, wird der Scan „eingefroren“, sodass nichts mehr an der Registrierung verändert werden kann. Im letzten Schritt erzeugt man ein „Model Space“, in welchem die georeferenzierte Punktwolke zum Export zur Verfügung steht.

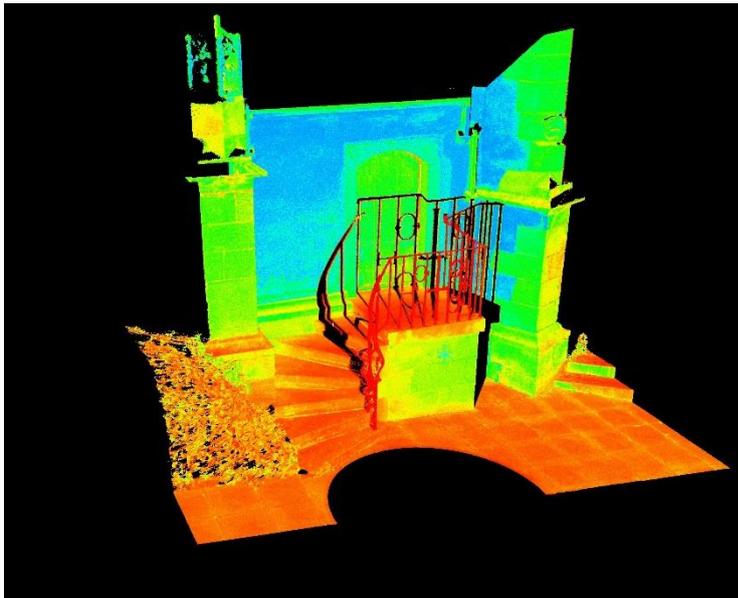


Abbildung 31: Ansicht Model Space in Leica Cyclone

Für die Punktwolken der Treppenanlagen, welche mit dem iPhone aufgenommen werden, wird ein ähnliches Verfahren angewandt, allerdings werden hier keine Zielmarken verwendet. Diese sind in der Aufnahme teilweise verschoben oder nicht klar genug erkennbar, sodass sie nicht für diese Zwecke verwendbar sind. Daher werden mit dem Tachymeter markante Ecken der jeweiligen Objekte aufgenommen und für das Einpassen der Scans verwendet.

Bei der Auswahl der Punkte wird darauf geachtet, welche Punkte auch in den Scans besonders gut erfasst und sichtbar sind, sodass eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Erneut werden

die Koordinatenliste und die Punktwolke in Leica Cyclone importiert. Dieses Mal ist jedoch keine automatische Erkennung der Passpunkte möglich, da diese in den Applikationen nicht hinterlegt werden können. Aus diesem Grund erfolgt die Auswahl der Punkte manuell im Model Space des jeweiligen Scans durch Setzen der Passpunkte an der richtigen Stelle und Hinzufügen der dazugehörigen Punktnummern. Die Auswahl gestaltet sich oft schwierig, da das Drehen der Punktwolke nicht in alle Richtungen einwandfrei möglich ist. Dies führt zu einem größeren Zeitaufwand, um die Passpunkte richtig und so genau wie möglich auszuwählen. Das weitere Vorgehen gleicht dem, welches bei der Auswertung der TLS-Punktwolke angewandt wurde.

Die Anordnung der Passpunkte aller Messobjekte ist in Anlage B dargestellt.

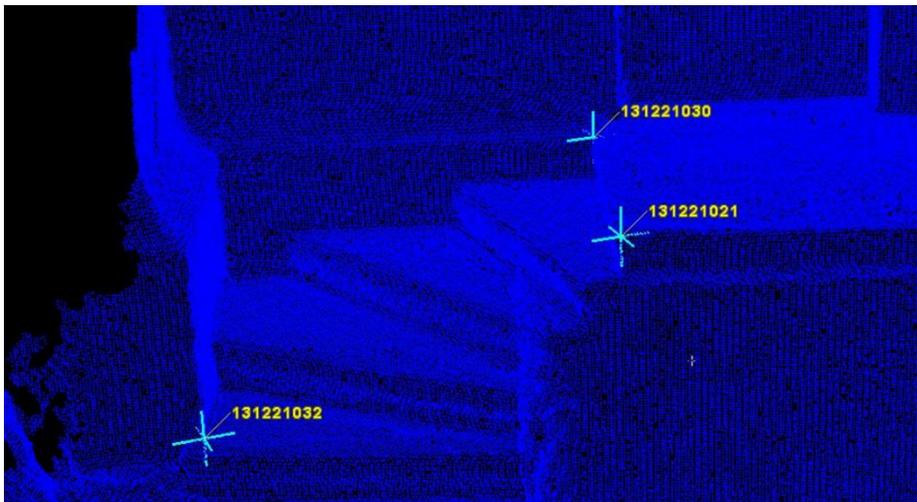


Abbildung 32: Model Space mit Passpunkten für das Messobjekt Neckargröningen

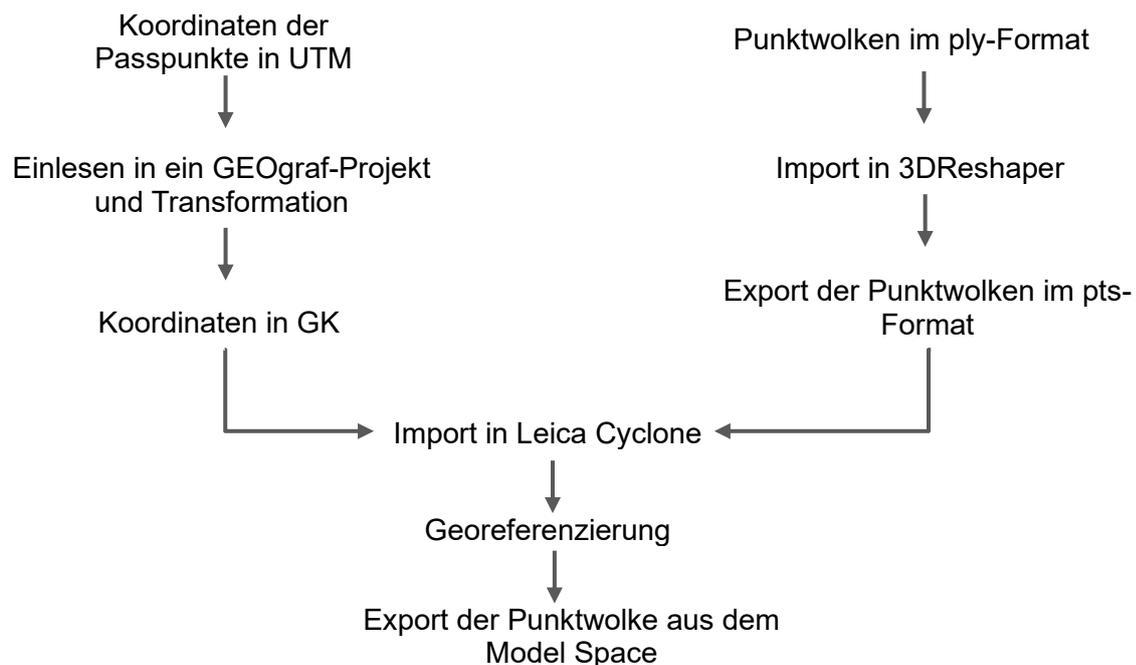


Abbildung 33: Vollständiger Weg zur georeferenzierten Punktwolke aus der Aufnahme mit dem iPhone LiDAR-Scanner

4.4.4 Berechnen der Punktwolke aus der photogrammetrischen Aufnahme

Für die Berechnung der Punktwolke wird die Software Agisoft Metashape verwendet. Zunächst müssen die aufgenommenen Fotos eingelesen werden. Daraufhin können sie über „Align Photos“, mittels erkannten Überlappungen, vorläufig angeordnet werden. Anschließend erfolgt das Anbringen von „Markern“ auf den bekannten Punkten der Bilder, also den zuvor angebrachten und aufgenommenen Passpunkten. Wenn einer dieser Punkte in einem Bild markiert ist, so wird er auch in allen weiteren verknüpften Bildern angezeigt. In diesen Bildern muss der jeweilige Marker nicht neu erzeugt, sondern lediglich korrigiert, beziehungsweise bestätigt oder gelöscht werden. Im nächsten Schritt wird den Markern die Punktnummer zugeordnet, welche mit der Nummer der tachymetrischen Aufnahme übereinstimmt. Da die Punkte im GK-Koordinatensystem vorliegen, muss in der Software „local“ als System festgelegt werden, da mit dem Maßstab 1,0 gerechnet werden soll. Im letzten Schritt wird die Punktliste importiert und mit den Aufnahmen verknüpft. Nach Beurteilung der Abweichungen und Fehler erfolgt die Berechnung der Dense Cloud.



Abbildung 34: Berechnete Dense Cloud mit Passpunkten

5 Ergebnisse der Auswertung

5.1 Ergebnisse der Messung mit dem terrestrischen Laserscanner

Nach dem Einpassen der Punktwolken in das Gauß-Krüger Koordinatensystem, sind in der Constraint List Daten abrufbar, die eine Bewertung der Georeferenzierung ermöglichen. Dabei wird je Passpunkt der Fehler zu der Koordinatenliste der Punkte berechnet. Falls das Objekt mit mehreren Standpunkten erfasst wurde, ist zudem eine Bewertung der Abweichungen der Scans untereinander möglich. Zu den Fehlerwerten ist der „Error Vector“ angegeben, der Auskunft über deren Zusammensetzung gibt. Zunächst werden die Ergebnisse der Messung mit terrestrischem Laserscanner je Messobjekt betrachtet, welche als Referenz für den Vergleich dienen.

Messobjekt Hochdorf

Punktnummer	Scan	Error [m]	Error Vector [m]
101	Scan 1 / Scan 2	0.001	0.001, 0.000, 0.000
101	Scan 1 / Scanpunkte	0.001	0.000, -0.001, 0.000
101	Scan 2 / Scanpunkte	0.001	-0.001, -0.001, 0.001
102	Scan 1 / Scan 2	0.001	0.000, 0.000, -0.001
102	Scan 1 / Scanpunkte	0.001	-0.001, 0.000, 0.000
102	Scan 2 / Scanpunkte	0.001	-0.001, 0.000, 0.001
103	Scan 1 / Scan 2	0.001	0.000, 0.000, 0.000
103	Scan 1 / Scanpunkte	0.002	0.002, 0.001, 0.000
103	Scan 2 / Scanpunkte	0.003	0.002, 0.002, 0.000
104	Scan 1 / Scan 2	0.001	0.000, 0.000, 0.001
104	Scan 1 / Scanpunkte	0.001	-0.001, -0.001, 0.000
104	Scan 2 / Scanpunkte	0.002	-0.001, -0.001, -0.001

Tabelle 1: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf, TLS

Für diesen Scan wurden vier Zieltafeln verwendet. Aufgrund der Größe der Treppenanlage waren, um das gesamte Messobjekt zu erfassen, zwei Standpunkte notwendig. Daher sind die Punktnummern jeweils drei Mal aufgeführt. Die Abweichungen liegen mit Werten zwischen 0 mm und 3 mm im zu erwartenden Bereich.

Messobjekt Neckargröningen

Punktnummer	Scan	Error [m]	Error Vector [m]
101	Scan 1 / Scanpunkte	0.001	-0.001, 0.001, -0.001
102	Scan 1 / Scanpunkte	0.001	0.001, -0.001, 0.001

Tabelle 2: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen, TLS

Bei dem kleinsten ausgewählten Messobjekt reichten zwei Zieltafeln und ein Standpunkt aus, um alle gewünschten Bereiche zu erfassen. Je Passpunkt ergibt sich ein Fehler von 1 mm, was ebenfalls in einem guten Bereich liegt.

Messobjekt Neckarrems

Punktnummer	Scan	Error [m]	Error Vector [m]
101	Scan 1 / Scanpunkte	0.002	0.000, 0.001, 0.001
101	Scan 1 / Scan 2	0.000	0.000, 0.000, 0.000
101	Scan 2 / Scanpunkte	0.002	0.000, 0.001, 0.001
102	Scan 1 / Scan 2	0.000	0.000, 0.000, 0.000
102	Scan 1 / Scanpunkte	0.002	0.000, -0.001, -0.001
102	Scan 2 / Scanpunkte	0.002	0.000, -0.001, -0.001

Tabelle 3: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, TLS

Die Messung des letzten Messobjekts erforderte wieder zwei Standpunkte, hier reichten aber zwei Zieltafeln für beide Messungen aus. Die Abweichungen befinden sich auch hier in einem zu erwartenden Bereich, es gibt keine Ausreißer oder Auffälligkeiten. Auch die beiden Scans untereinander weisen keine Abweichungen auf, sodass diese für die Analyse verwendbar sind.

Die Ergebnisse für alle drei Referenzpunktewolken sind wie erwartet gut und unauffällig. In diesem Schritt sind für die Messungen mit dem terrestrischen Laserscanner auch Intensitätswerte der Scans anzeigbar, aus denen hervorgeht, wie gut die jeweiligen Bereiche erfasst sind.

5.2 Ergebnisse der Messung mit dem iPhone LiDAR-Scanner

Da die Messungen mit verschiedenen Einstellungen der Applikationen getestet wurden, muss zunächst entschieden werden, welche der Punktwolken für den Vergleich verwendet werden soll. Bei der 3DScannerApp ist bereits bei der Messung aufgefallen, dass die Einstellung „high res“ keine guten Messdaten liefert, daher fällt hier die Wahl auf die Messdaten, die mit „low res“ erfasst wurden. Bei der EveryPoint App wurde die 3D Voxel Size zwischen 0,5 cm und 1 cm variiert. Die Einstellung 0,5 cm liefert grundsätzlich dichtere Daten, jedoch müssen die Objekte, da die Scangröße nicht ausreichte, häufig in zwei Teilen aufgenommen werden. In diesem Fall ist die Punktdichte der Daten mit der Voxel Size von 1 cm ausreichend, daher werden diese Punktwolken für den Vergleich verwendet. Die Ergebnisse sind im Folgenden nach Messobjekt und Applikation unterteilt. Da die Innenräume nicht in ein Koordinatensystem eingepasst werden, sind hierzu keine Daten vorhanden.

Messobjekt Hochdorf – Applikation 3DScannerApp

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221001	0.009	-0.003, -0.006, -0.006
131221031	0.016	0.008, -0.014, -0.001
131221041	0.025	-0.017, 0.016, 0.010
131221042	0.013	0.012, 0.003, -0.003

Tabelle 4: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp

Messobjekt Hochdorf – Applikation EveryPoint

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221001	0.043	0.006, 0.032, 0.009
131221031	0.020	0.000, 0.016, 0.012
131221041	0.013	-0.007, -0.011, 0.001
131221042	0.043	0.002, -0.036, -0.022

Tabelle 5: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint

Wie aus den Tabellen hervorgeht, sind die Ergebnisse der 3DScannerApp im Vergleich zu denen der EveryPoint App deutlich besser. Der maximale Fehler der 3DScannerApp liegt bei 2,5 cm, wohingegen die EveryPoint App in zwei Punkten bis zu 4,3 cm abweicht. Um die größere Abweichung der EveryPoint App zu referenzieren, müssen im Folgenden die Messergebnisse der anderen Objekte betrachtet werden, da die Fehler auch aus der manuellen Auswahl der Passpunkte resultieren können. Die Punktwolke sieht in beiden Applikationen ähnlich aus, wobei sich die Daten der EveryPoint App dichter und deckender darstellen.



Abbildung 35: Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerapp



Abbildung 36: Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint

Messobjekt Neckargröningen – Applikation 3DScannerApp

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221021	0.035	-0.017, -0.030, -0.003
131221030	0.035	0.012, 0.033, 0.000
131221032	0.007	0.006, -0.003, 0.003

Tabelle 6: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp

Messobjekt Neckargröningen – Applikation EveryPoint

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221021	0.019	-0.005, -0.019, 0.001
131221030	0.016	-0.003, 0.015, -0.004
131221032	0.009	0.008, 0.003, 0.003

Tabelle 7: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint

Bei den Ergebnissen des Messobjekts Neckargröningen sind wieder Unterschiede zwischen den Applikationen zu sehen, dieses Mal jedoch umgekehrt. Der maximale Fehler der EveryPoint App ist mit 1,9 cm geringer als der der 3DScannerApp, welcher bei 3,5 cm liegt. Somit ist an dieser Stelle noch keine Aussage über die Qualität der jeweiligen Applikationen möglich. Die Abweichungen sind wahrscheinlich eine Auswirkung der Passpunktauswahl in der Punktwolke. Auch bei diesem Objekt erscheinen die Punktwolken der EveryPoint App im Vergleich dichter und flächiger.



Abbildung 37: Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp



Abbildung 38: Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint

Messobjekt Neckarrems – Applikation 3DScannerApp

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221010	0.018	0.016, 0.005, -0.006
131221016	0.022	-0.002, 0.022, 0.000
131221067	0.019	-0.016, 0.002, 0.011
131221070	0.030	0.001, -0.029, -0.005

Tabelle 8: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, 3DScannerApp

Messobjekt Neckarrems – Applikation EveryPoint

Punktnummer	Error [m]	Error Vector [m]
131221010	0.023	0.017, 0.008, 0.014
131221016	0.021	-0.016, -0.010, -0.010
131221067	0.015	-0.010, 0.008, -0.006
131221070	0.012	0.009, -0.006, 0.003

Tabelle 9: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, EveryPoint

Ähnliche Ergebnisse sind auch beim Messobjekt Neckarrems zu sehen, jedoch sind die Unterschiede der Abweichungen zwischen den Applikationen insgesamt geringer. Die 3DScannerApp zeigt mit maximal 3,0 cm etwas höhere Fehler auf als die Applikation EveryPoint mit maximal 2,3 cm.

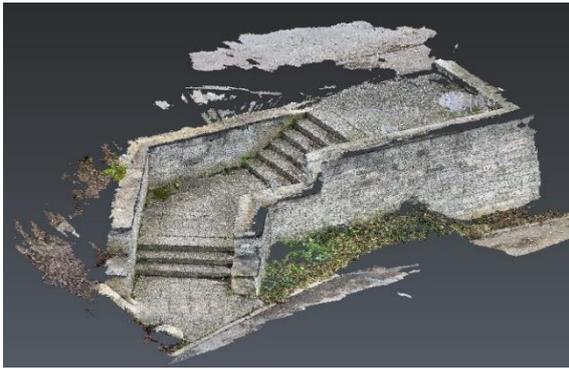


Abbildung 39: Messobjekt Neckarremms - Applikation 3DScannerApp

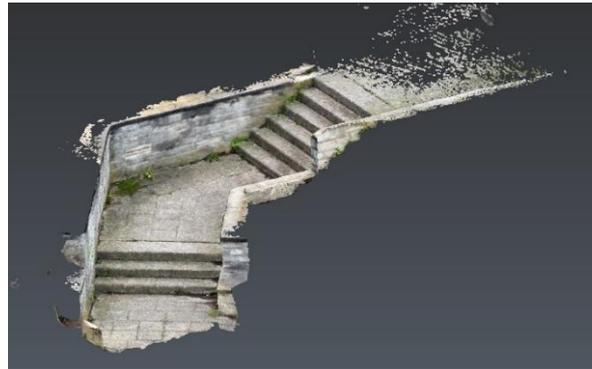


Abbildung 40: Messobjekt Neckarremms - Applikation EveryPoint

Die Ergebnisse des LiDAR-Scanners des iPhones sind im Allgemeinen nicht so gut wie die des terrestrischen Laserscanners, das war aufgrund verschiedener Faktoren jedoch zu erwarten. Zum einen sind die Passpunkte bei der iPhone-Aufnahme viel ungenauer und zum anderen ist die Qualität des Scans schlechter. Trotzdem sind die Ergebnisse verwendbar. Zunächst gibt es keine Anzeichen, dass eines der Messobjekte zum Beispiel aufgrund seiner Größe oder Beschaffenheit schlechtere Messdaten liefert.

Da die mit dem LiDAR-Scanner des iPhones aufgenommenen Innenräume nicht in ein bestimmtes Koordinatensystem überführt werden, erfolgt lediglich die Beurteilung der Punktwolken. Bei der ersten Betrachtung fällt auf, dass die Räume unterschiedlich gut erfasst sind. Innenraum 1 scheint geometrisch richtig dargestellt zu sein, wohingegen bei Innenraum 2 einige Versprünge im Boden und an den Wänden zu erkennen sind. Außerdem sind vor allem der Boden und die Decke der Räume von der 3DScannerApp deutlich besser und lückenloser erfasst. Weitere Untersuchungen hierzu folgen in der Analyse in Kapitel 6.



Abbildung 41: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation 3DScannerApp



Abbildung 42: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation EveryPoint

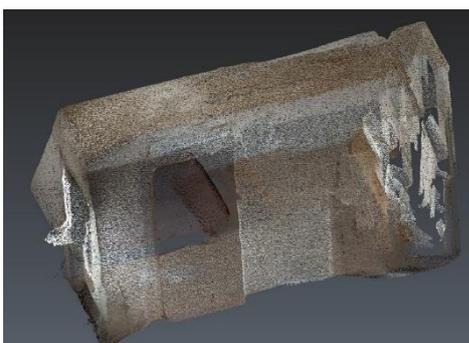


Abbildung 43: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp



Abbildung 44: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint

5.3 Ergebnis der photogrammetrischen Aufnahme mit dem iPhone

Die Berechnung der Punktwolke aus der photogrammetrischen Aufnahme des kleinsten Messobjekts, der Treppe in Neckargröningen, liefert deutlich geringere Abweichungen zu den Passpunkten als die Ergebnisse der Aufnahme mit dem LiDAR-Scanner des iPhones. Der maximale Fehler beträgt rund 0,2 cm und liegt somit eher im Bereich der Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner. Das liegt auch daran, dass die Passpunkte durch die Verwendung der roten Klebpunkte bei der Auswertung genauer ausgewählt werden konnten. Hierdurch wird die Genauigkeit gesteigert.

Messobjekt Neckargröningen – Photogrammetrische Aufnahme

Punktnummer	Error [m]	Error Vector X, Y, Z [m]
5101	0.001620	-0.001067, -0.001020, -0.000668
5102	0.001530	-0.000609, 0.001399, 0.000109
5103	0.002189	0.002120, 0.000361, 0.000408
5104	0.000876	-0.000444, -0.000740, 0.000151

Tabelle 10: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme



Abbildung 45: Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme

6 Analyse und Vergleich

Im Vorfeld der Ergebnisanalyse werden die Punktwolken bereinigt und alle nicht benötigten Bereiche entfernt, da diese das Ergebnis des Vergleichs verfälschen würden. Außerdem muss eine sinnvolle Darstellung und aussagekräftige Farbeinteilung gewählt werden. Um die Qualität der Messungen untereinander vergleichen zu können, sind alle Vergleiche mit derselben Farbdarstellung versehen. Die Werte sind dabei in Metern angegeben.

Der maximal hervorzuhebende Abstand der Punktwolken beträgt 9 cm. Dieser Wert wird beim folgenden Vergleich zum Teil überschritten, allerdings nur an Randbereichen der Messungen, die nicht ausreichend gut erfasst sind oder an Stellen, an denen keine Daten der Referenzpunktwolke aus dem terrestrischen Laserscanner vorhanden sind. Hier berechnet die Software sehr große Unterschiede zwischen den Punktwolken, obwohl diese nicht vorhanden sind. Da zudem Punktwolken mit Abweichungen von über 9 cm ohnehin nicht für eine Bestandsaufnahme verwendbar sind, wird diese Begrenzung gewählt.

Der grüne Bereich, zwischen 0 cm und 1,5 cm stellt eine geringe Abweichung dar, Daten in diesen Bereichen können bedenkenlos in eine Bestandsaufnahme integriert werden. Auch Punkte im gelben und orangenen Bereich, also mit Abweichungen von bis zu 4,5 cm sind in diesem Zusammenhang verwendbar, da auch mit anderen Messinstrumenten, wie GNSS Empfänger, für diese Anwendung teilweise keine besseren Genauigkeiten möglich sind.

Außerdem sind Objekte und Gelände häufig sehr uneben, sodass auf kleinstem Raum einige Zentimeter Unterschied bestehen können. Die roten Bereiche, von 4,5 cm bis 9 cm, stellen zu große Abweichungen dar. Punktwolken, deren Großteil der Punkte nach dem Vergleich in diesem Farbbereich liegen, sind für die weitere Verwendung unbrauchbar. Neben der graphischen Darstellung in der Software 3DReshaper, sind auch Aussagen über den Anteil der Punkte in den jeweiligen Abschnitten möglich. Zur besseren Erkennbarkeit werden diese auf den folgenden Seiten in Tabellen dargestellt.

0.000 - 0.015
0.015 - 0.030
0.030 - 0.045
0.045 - 0.060
0.060 - 0.075
0.075 - 0.090

6.1 Datenvergleich TLS und iPhone LiDAR-Scanner

In diesem Kapitel werden die mit beiden Applikationen des iPhones aufgenommenen Punktwolken aller Treppenanlagen mit den Referenzpunktwolken aus den Messungen mit dem terrestrischen Laserscanner verglichen und bewertet. Dafür wird die beschriebene Farbskala verwendet. Der Vergleich erfolgt in der Software 3DReshaper, in der die Referenz ausgewählt und die Farbeinteilung festgelegt werden kann.

Messobjekt Hochdorf – Applikation 3DScannerApp

Anteil	Beginn	Ende
48.4 %	0.000	0.015
29.8 %	0.015	0.030
13.7 %	0.030	0.045
5.7 %	0.045	0.060
1.7 %	0.060	0.075
0.7 %	0.075	0.090

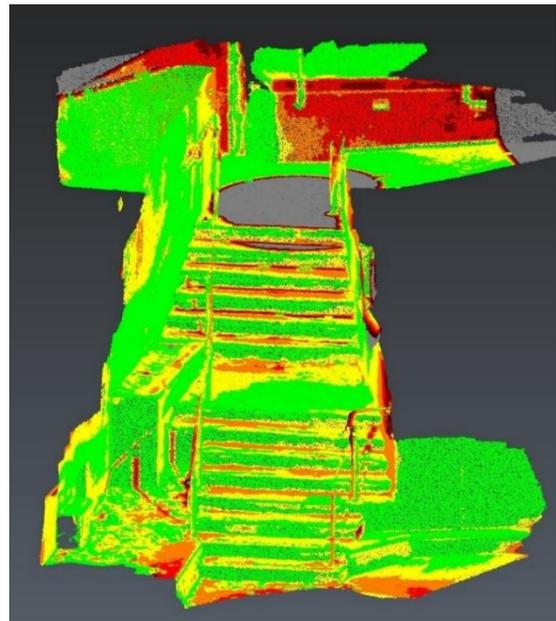


Abbildung 46: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp, Ansicht vorne

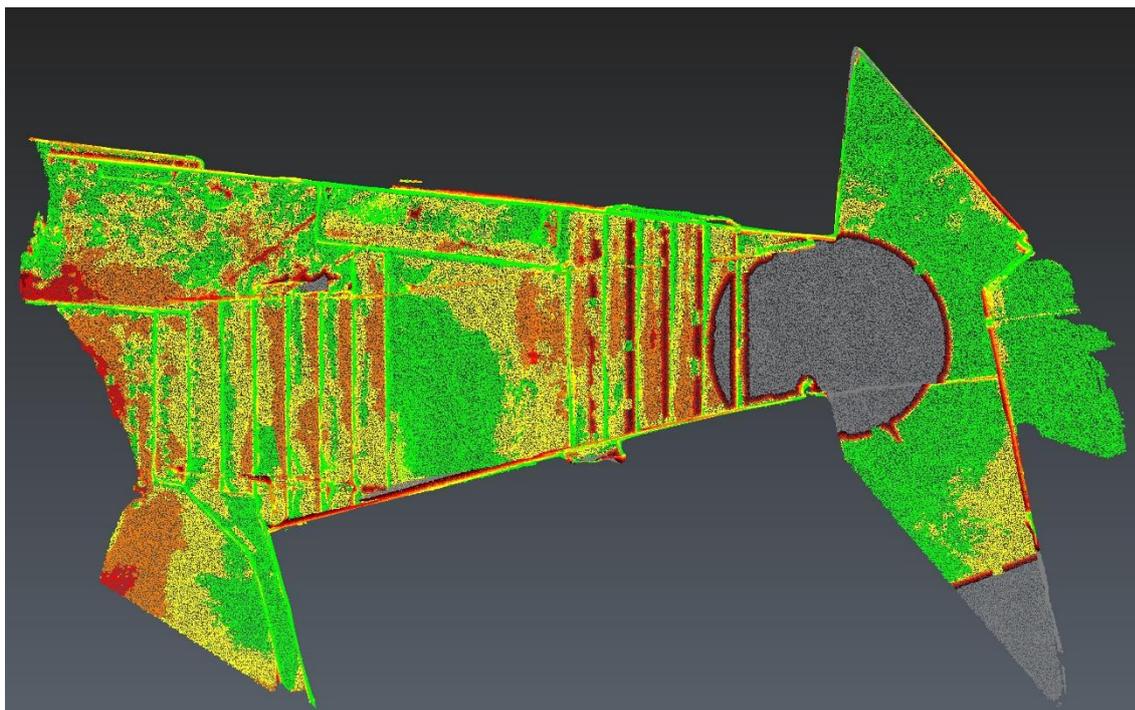


Abbildung 47: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp, Ansicht oben

Der erste Vergleich der Treppenanlage in Hochdorf, welche zunächst mit der 3DScannerApp aufgenommen wurde, zeigt, dass fast die Hälfte der erfassten Punkte im grünen Bereich liegen, also höchstens 1,5 cm von der Referenzpunktwolke abweichen. 43,5 % und damit ein weiterer großer Teil liegt im gelben (29,8 %) und orangenen (13,7 %) Bereich bis 4,5 cm, vor allem auf der Oberseite der Stufen und Mauern. Allerdings liegen auch bei einem nicht zu vernachlässigenden Teil der Punkte (8,1 %) größere Abweichungen vor, sodass diese Punkte für den Zweck einer Bestandsaufnahme nicht zu gebrauchen sind. Auch das Gelände ist nicht oder nur schlecht dargestellt.

Der graue Kreis im oberen Bereich der Treppe bildet den Scanstandpunkt ab. Hier wurden keine Daten zum Vergleich erfasst. Durch Schattenwurf um diesen Kreis und an den inneren Kanten der angrenzenden Stufen, konnten auch dort keine oder nur ungenügende Daten durch den terrestrischen Laserscanner gesammelt werden.

Weitere beachtliche Teile der Punktwolke an den seitlichen Wänden sind rot gefärbt. Da der Fokus aber auf den Kanten der Treppenanlage und nicht auf den seitlichen Wänden liegt, beeinflussen diese roten Stellen die Bewertung nicht.

Das Ergebnis ist unregelmäßig, da nicht an jeder Stelle mit Sicherheit Punkte in der erforderlichen Toleranz entnommen werden können. Vor dem Hintergrund, dass die Daten jedoch mit einem Smartphone erfasst wurden, sind sie durchaus als gut einzustufen. Für die Verwendung in der Vermessung sind sie in diesem Fall nicht bedenkenlos verwendbar.

Messobjekt Hochdorf – Applikation EveryPoint

Anteil	Beginn	Ende
63.2 %	0.000	0.015
27.7 %	0.015	0.030
6.3 %	0.030	0.045
1.7 %	0.045	0.060
0.6 %	0.060	0.075
0.4 %	0.075	0.090

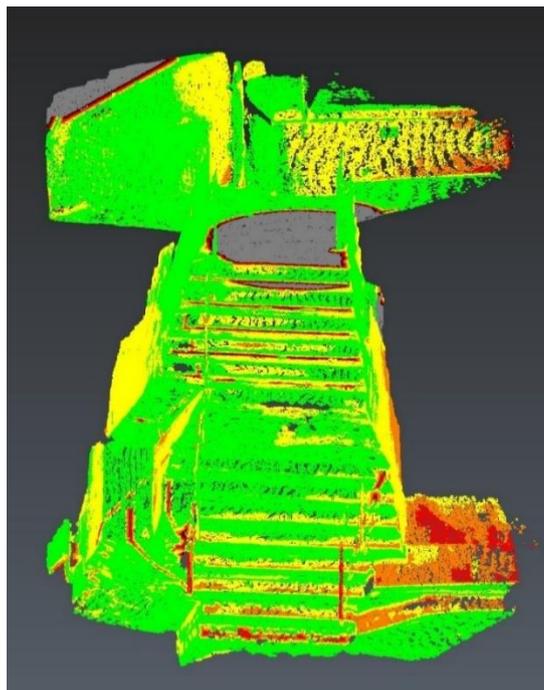


Abbildung 48: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint, Ansicht vorne

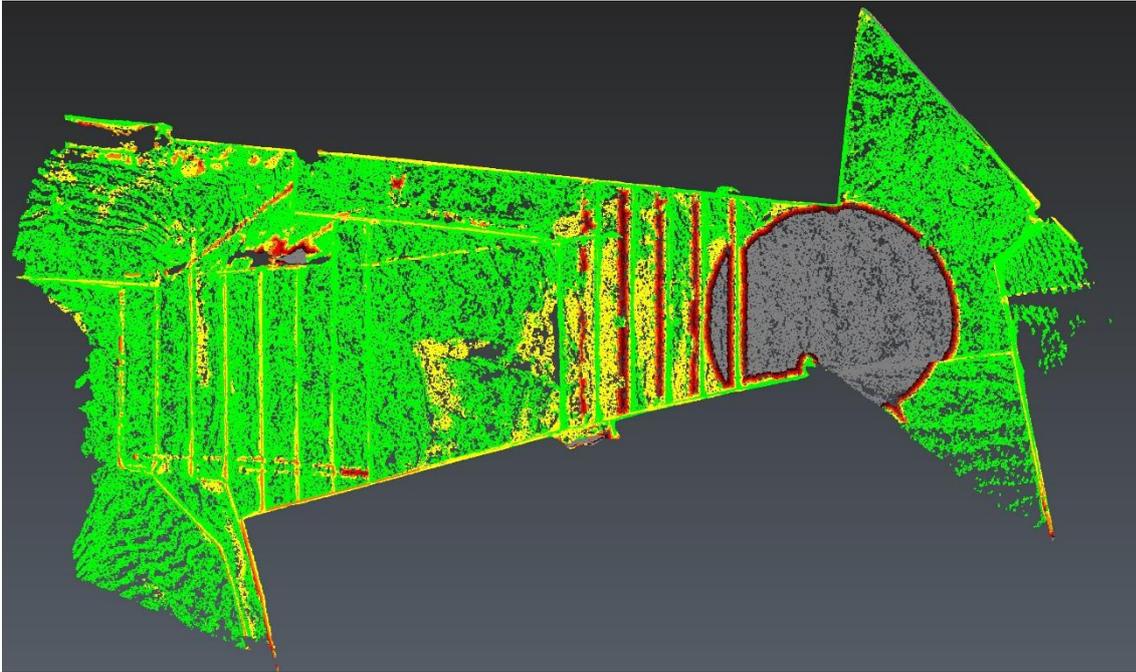


Abbildung 49: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint, Ansicht oben

Im Vergleich sind bei der EveryPoint App deutlich mehr grüne Bereiche sichtbar. Fast zwei Drittel (63,2 %) der Punkte weichen höchstens 1,5 cm von der Referenzpunktcloud ab, das sind 14,8 % mehr als bei der 3DScannerApp. Zusammen mit den gelb eingefärbten Bereichen ist bei fast 90 % aller Punkte mit einer Abweichung von 3 cm oder weniger zu rechnen. Die wenigen roten Bereiche (2,7 %) sind erneut auf den Standpunkt des terrestrischen Laserscanners und den Schattenwurf zurückzuführen. Die seitlichen Geländer sind auch hier nicht oder nur schlecht erfasst. Die Punktwolke erscheint allgemein weniger gleichmäßig und mit mehr Lücken versehen, vor allem auf Mauern und Podesten. Außerdem sind mehrere größere Abweichungen in der Ansicht von vorne sichtbar, also an den vertikalen Teilen der Stufen.

Grundsätzlich stellt die Punktwolke der EveryPoint App ein sehr gutes Ergebnis dar. Die Kanten der Treppenanlagen sind alle gut und richtig dargestellt. Diese Daten können so in eine Bestandsaufnahme integriert werden.

Messobjekt Neckargröningen – Applikation 3DScannerApp

Anteil	Beginn	Ende
43.7 %	0.000	0.015
32.0 %	0.015	0.030
12.9 %	0.030	0.045
6.4 %	0.045	0.060
3.6 %	0.060	0.075
1.4 %	0.075	0.090

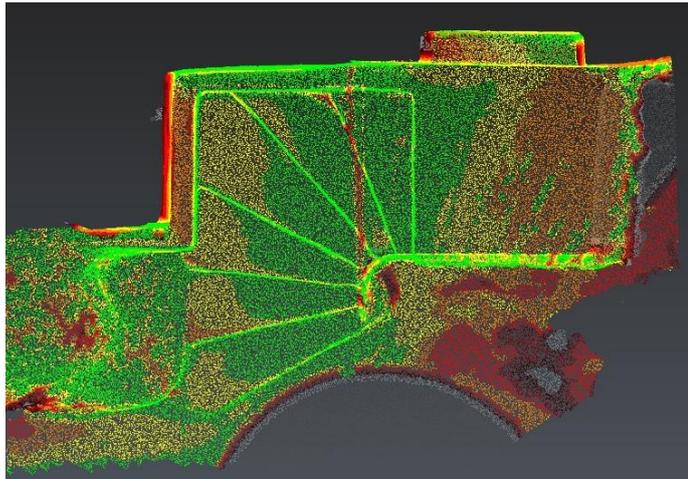


Abbildung 50: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp, Ansicht oben

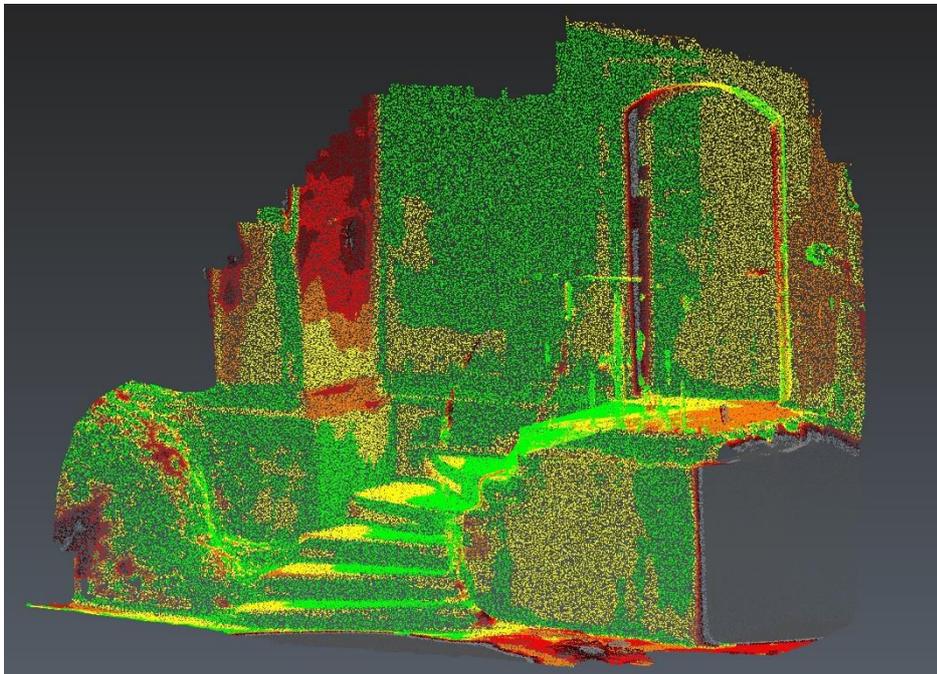


Abbildung 51: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp, Ansicht vorne

Auch bei diesem kleineren Messobjekt sind mit 11,4 % nach dem Vergleich einige Stellen rot eingefärbt. Diese befinden sich vor allem am Boden, der Tür und an Teilen der Wand. Die Stufen sind dagegen größtenteils gut erfasst, die Abweichungen betragen hier maximal 4,5 cm und das auch nur an wenigen kleinen Stellen. Das schmale rote Band über den Stufen entstand aufgrund des Geländers. Hier konnte der terrestrische Laserscanner keine Daten erfassen. Auch auf dem Podest am oberen Ende der Treppe sind die Werte etwas schlechter, aber immer noch verwendbar. Die Wandflächen wurden nicht explizit bei der Messung mit dem iPhone erfasst, weshalb die Abweichungen an diesen Stellen nicht bewertet werden dürfen. Damit liegt der Anteil der Punkte, die in Rottönen gefärbt sind, für die gesamte Punktwolke höher als in der für die Bewertung der eigentlichen Treppe notwendigen Wolke. Die Treppe ist nach diesem Vergleich gut und brauchbar erfasst.

Messobjekt Neckargröningen – Applikation EveryPoint

Anteil	Beginn	Ende
63.6 %	0.000	0.015
29.3 %	0.015	0.030
5.6 %	0.030	0.045
0.6 %	0.045	0.060
0.5 %	0.060	0.075
0.4 %	0.075	0.090

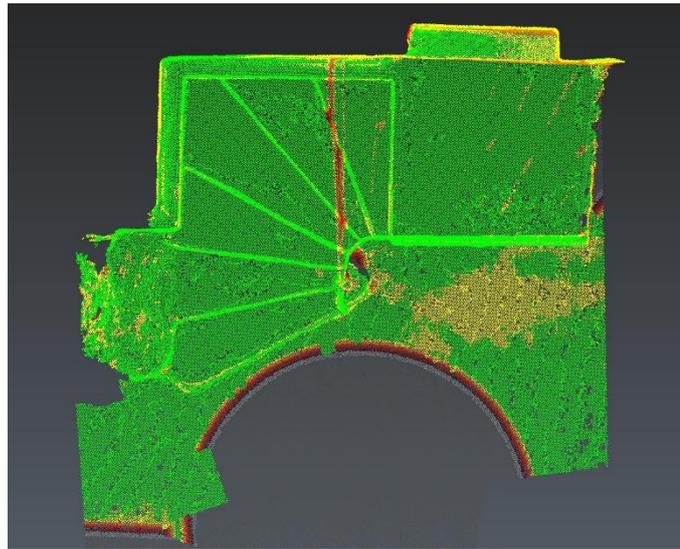


Abbildung 52: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint, Ansicht oben

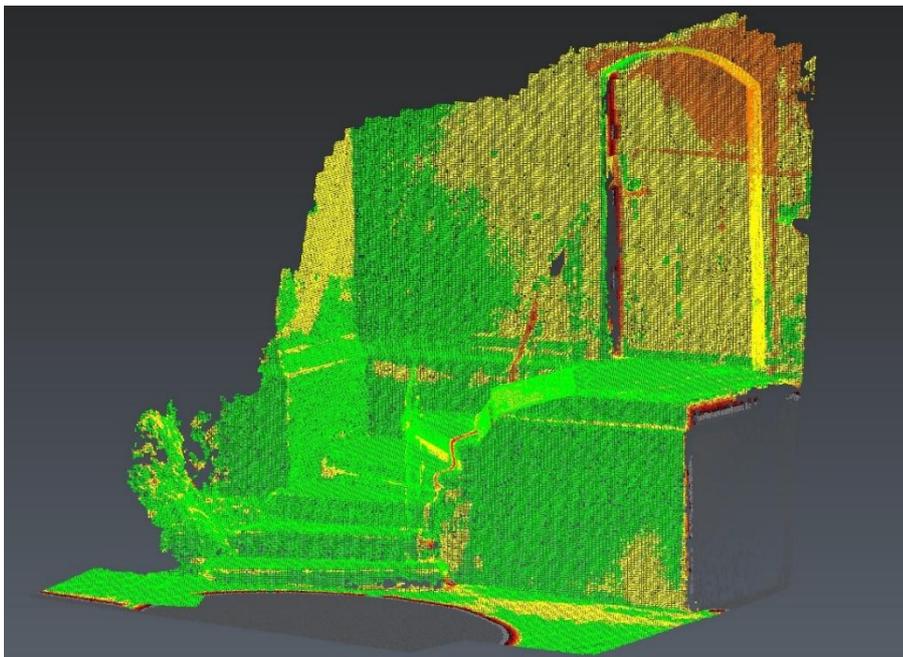


Abbildung 53: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint, Ansicht vorne

Die Aufnahme mit der EveryPoint App zeigt dagegen fast keine roten Flächen (nur 1,5 %), lediglich die schlecht erfasste Innenseite der zurückgesetzten Tür und erneut der Schatten des Geländers sind als Bereiche mit größeren Abweichungen gekennzeichnet. An der Tür hatte die App bei der Messung Schwierigkeiten Punkte zu erfassen. Daher sind hier nur wenige oder schlechte Daten vorhanden, was zu den gelben und orangenen Einfärbungen führt. Der Großteil der Punkte, vor allem an den Stufen selbst, weichen höchstens 1,5 cm von der Referenzpunktswolke ab und wieder sind fast zwei Drittel (63,6 %) aller Punkte in diesem Bereich. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis und auch hier ist die weitere Verwendung möglich.

Messobjekt Neckarrems – Applikation 3DScannerApp

Anteil	Beginn	Ende
44.1 %	0.000	0.015
37.1 %	0.015	0.030
14.2 %	0.030	0.045
3.8 %	0.045	0.060
0.4 %	0.060	0.075
0.3 %	0.075	0.090

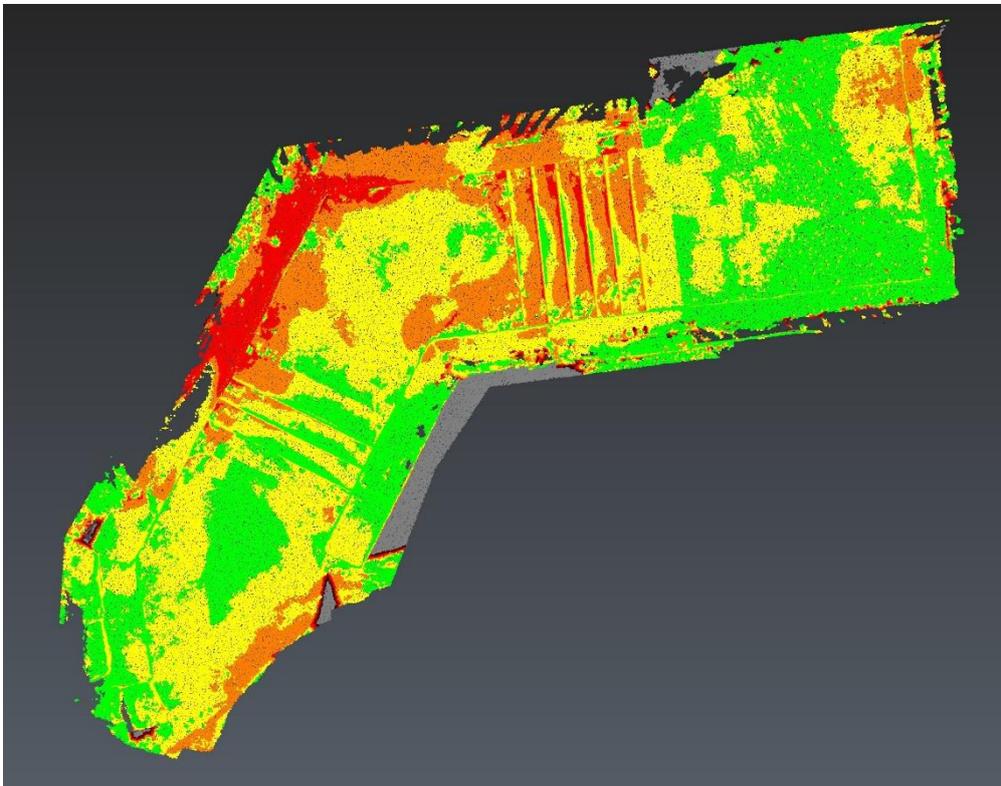


Abbildung 54: Vergleich Messobjekt Neckarrems - Applikation 3DScannerApp

Auch bei diesem Vergleich ist ein ähnlich gutes Ergebnis wie bei den vorausgegangenen Messobjekten zu beobachten. Ein großer Teil (95,4 %) liegt mit Abweichungen bis maximal 4,5 cm in dem in dem als verwendbar angenommen Bereich. Allerdings sind einige Stellen zu sehen, die rot eingefärbt sind und somit zu sehr abweichen. Diese befinden sich auf der seitlichen Mauer der Treppenanlage, aber auch auf den Stufen selbst. Daher kann nicht an jeder Stelle der Treppe davon ausgegangen werden, dass die Stufen korrekt erfasst wurden.

Messobjekt Neckarrems – Applikation EveryPoint

Anteil	Beginn	Ende
59.1 %	0.000	0.015
35.6 %	0.015	0.030
4.9 %	0.030	0.045
0.2 %	0.045	0.060
0.1 %	0.060	0.075
0.1 %	0.075	0.090

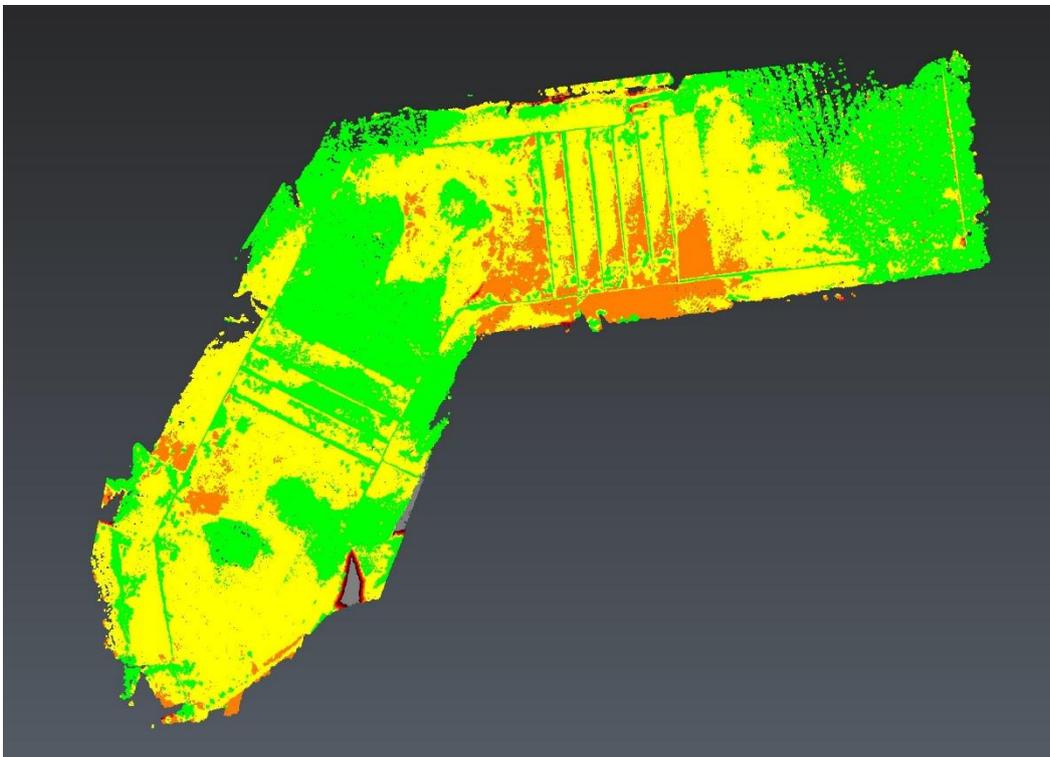


Abbildung 55: Vergleich Messobjekt Neckarrems - Applikation EveryPoint

Erneut zeigt der Vergleich der Aufnahme der EveryPoint App ein besseres Ergebnis. Fast alle Punkte (99,6 %) befinden sich im Bereich bis 4,5 cm, über die Hälfte (59,1 %) sogar bis 1,5 cm. Somit besteht auch hier ein verlässliches Ergebnis, das die Treppenanlage und die angrenzenden Mauern gut und größtenteils richtig darstellt. Bei dieser Ansicht fällt auf, dass vor allem die Maueroberseiten einige Lücken aufweisen. Hier muss bei der Aufnahme auf eine vollständige Erfassung geachtet werden.

6.2 Datenvergleich TLS und photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone

Messobjekt Neckargröningen – Photogrammetrische Aufnahme

Anteil	Beginn	Ende
81.5 %	0.000	0.015
9.6 %	0.015	0.030
4.6 %	0.030	0.045
2.0 %	0.045	0.060
1.3 %	0.060	0.075
1.0 %	0.075	0.090

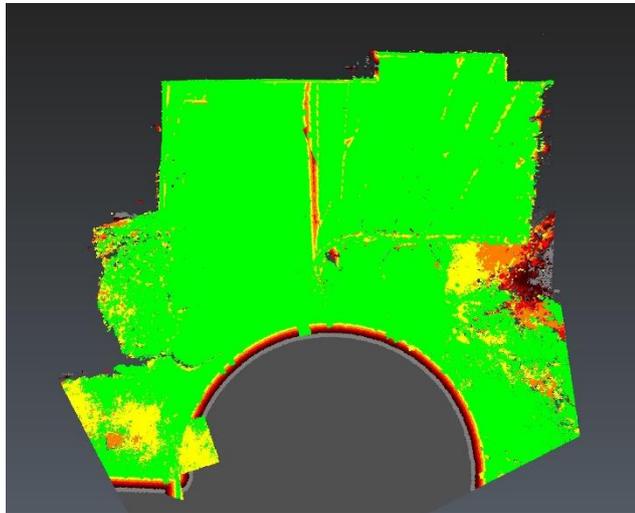


Abbildung 56: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme, Ansicht oben

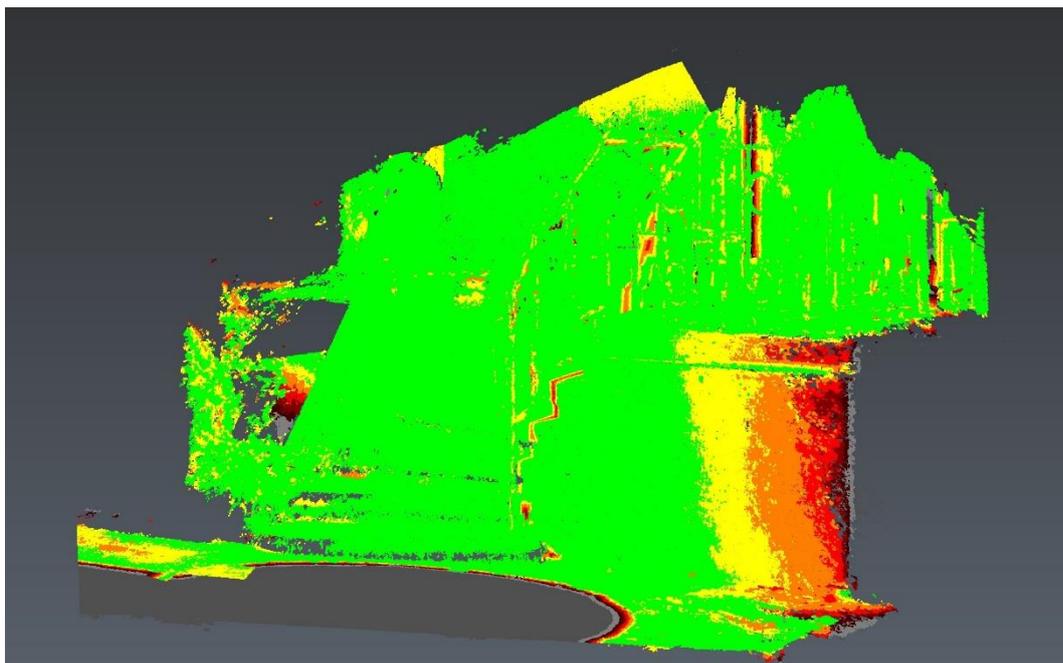


Abbildung 57: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme, Ansicht vorne

Beim Vergleich der photogrammetrischen Aufnahme mit der des terrestrischen Laserscanners ist zu sehen, dass die Abweichungen bei über 80 % der Punkte maximal nur 1,5 cm betragen. Der Bereich an der rechten Seite des Podests, welcher gelb, orange und rot eingefärbt ist, wurde bei der photogrammetrischen Aufnahme nicht explizit erfasst und liefert daher dieses schlechte Ergebnis, welches bei der Bewertung aber nicht beachtet werden muss. Für diesen Bereich wäre die Aufnahme von zusätzlichen Bildern für eine bessere Qualität der Daten

notwendig. Auch der rot gefärbte Bereich auf den Stufen fließt nicht in die Bewertung ein, da auch hier aufgrund des Geländers keine Daten des TLS vorliegen.

An der vertikalen Seite der Stufen sind bei diesem Vergleich einige Lücken erkennbar. An diesen Stellen fehlen weitere Bilder, um die Flächen optimal abzubilden. Trotzdem ist durch die photogrammetrische Aufnahme das beste Ergebnis in Bezug auf die Abweichungen zur Referenzpunktvolke in diesen Untersuchungen erzielt worden.

6.3 Analyse Innenräume

Für die Analyse der Innenräume werden Schnitte durch die Punktwolken geführt, sodass der Grundriss und verschiedene Ebenen im Raum genauer betrachtet werden können. Der Innenraum 1 wurde durch die Applikationen 3DScannerApp und EveryPoint, welche den LiDAR-Scanner des iPhones verwenden, gut erfasst. Die Abbildungen 58 und 59 zeigen den Grundriss des Raums in den beiden Appvarianten. Alle Ecken sind dargestellt und die Geometrie ist deckungsgleich. Auffällig ist, dass die 3DScannerApp Boden und Decke deutlich besser erfasst hat als die EveryPoint App, welche große Lücken aufweist. Dies deckt sich mit den Eindrücken, die bei den Messungen gemacht wurden. Auch die Wandflächen sind mit der 3DScannerApp zuverlässiger erfasst. Beide Punktwolken sind aber so gut, dass der Grundriss des Raums ausreichend erkennbar ist und daraus rekonstruiert werden kann.



Abbildung 58: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation 3DScannerApp, Grundriss



Abbildung 59: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation EveryPoint, Grundriss

Der kleinere Innenraum 2 weist, trotz gleicher Vorgehensweise bei der Messung, in beiden Applikationen ein schlechteres Ergebnis auf. In den Grundrissen (Abbildung 60 und 61) sind die Kanten des Raumes verschoben, teilweise doppelt und parallel zur eigentlichen Lage dargestellt. Auch hier hat die 3DScannerApp die Bodenfläche deutlich besser und nahezu lückenlos erfasst. Bei der App EveryPoint fehlen erneut große Teile der Fläche. Aufgrund des schlechten Ergebnisses ist der Vergleich zu einer Referenzpunktvolke nicht sinnvoll.



Abbildung 60: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Grundriss



Abbildung 61: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Grundriss

Um die Anordnung der Wände besser zu erkennen, werden in zwei Richtungen Schnitte durch den Raum erzeugt. Schnitt 1 verläuft auf dem Grundriss in den Abbildungen 60 und 61 von rechts nach links auf Höhe des unteren Drittels. Dabei ist zu sehen, dass beide Applikationen die jeweils andere Wandseite doppelt darstellen (siehe Abbildung 62 und 63). Außerdem zeigt vor allem die Aufnahme mit der EveryPoint App Versprünge an der Decke des Raums und keine durchgehende Kante. Deutlich ist auch, dass die Geometrie des Innenraums falsch erfasst wurde. Die Ergebnisse sind somit nicht für die Weiterverarbeitung geeignet.

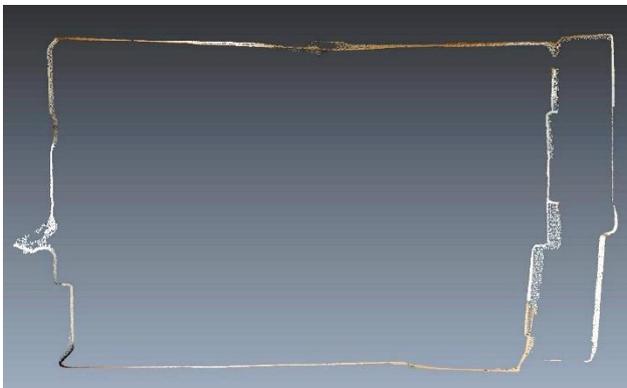


Abbildung 62: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Schnitt 1

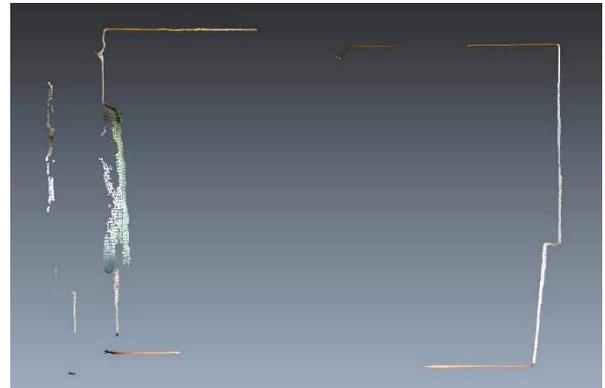


Abbildung 63: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Schnitt 1

Auch im zweiten Schnitt durch den Raum, orthogonal zu Schnitt 1 auf Höhe der Mitte des Raums, sind Stellen mit falschen Darstellungen des Raums zu sehen. Wieder ist vor allem die Aufnahme mit der EveryPoint App sehr fehlerbehaftet. Wie in Abbildung 65 zu sehen, sind die gesamte abgeschrägte Wandseite und die Decke mehrfach abgebildet. Auch bei der durch die 3DScannerApp aufgenommene Punktwolke ist im unteren Bereich eine zweite, in der Realität nicht vorhandene Wand erkennbar. Die Ergebnisse liefern insgesamt keine zuverlässige und realitätsnahe Darstellung der Räumlichkeit. Hier sind Optimierungen notwendig, um verwendbare Daten zu erzeugen.

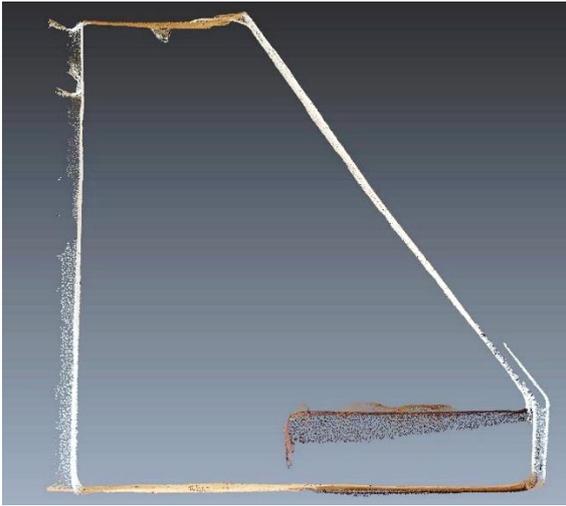


Abbildung 64: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Schnitt 2

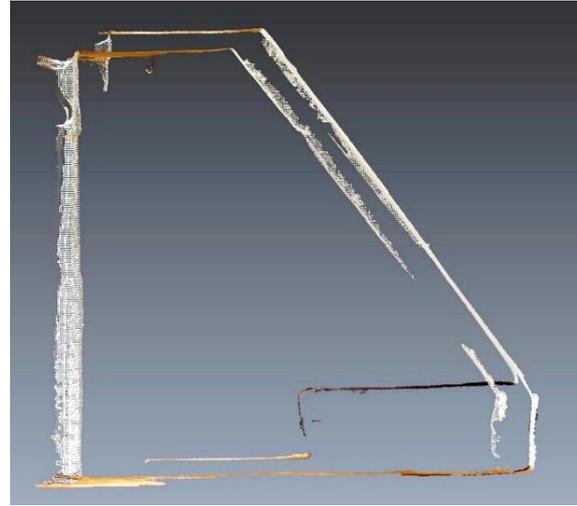


Abbildung 65: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Schnitt 2

Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Apps und zwischen den Messobjekten spiegeln auch die Beobachtungen während der Messung wider. Die EveryPoint App hatte grundsätzlich größere Probleme bei der Erfassung der Wandflächen als die 3DScannerApp. Dies zeigt sich deutlich in den erzeugten Punktwolken.

Der Unterschied in der Aufnahmequalität der Räume entsteht vor allem durch die jeweiligen Wandtexturen. Im Innenraum 1 ist durch eine Holzverkleidung eine unebene Textur vorhanden, die von den Applikationen besser erfasst werden kann. Dagegen fehlen an den kahlen und vergleichsweise glatten Wänden in Innenraum 2 Punkte zur Orientierung. Hier könnte zum Beispiel durch das Anbringen von unterschiedlichen Plakaten an den Wänden Abhilfe geschaffen werden. Grundsätzlich ist also die Aufnahme von Innenräumen durch den iPhone LiDAR-Scanner möglich, es muss jedoch die Beschaffenheit der Räume berücksichtigt werden.

6.4 Eignung untersuchter Applikationen in der Vermessung

Beide verwendeten Applikationen zeigen beim Vergleich der Treppenanlagen keine gravierenden Abweichungen zur TLS-Messung. Die Differenzen der Punktwolken liegen größtenteils in einem Bereich, der für eine Bestandsaufnahme ausreicht. Teilweise zeigen die Messungen auch sehr gute Ergebnisse. Bei der Auswertung konnte festgestellt werden, dass bei den Messungen mit der Applikation EveryPoint ein größerer Anteil der Punkte im grünen Bereich (Abweichungen bis maximal 1,5 cm) liegt als bei den Punktwolken der Applikation 3DScannerApp. Für ein deutlicheres Bild werden die jeweiligen Anteile der Apps in einem Diagramm in Abbildung 66 dargestellt.

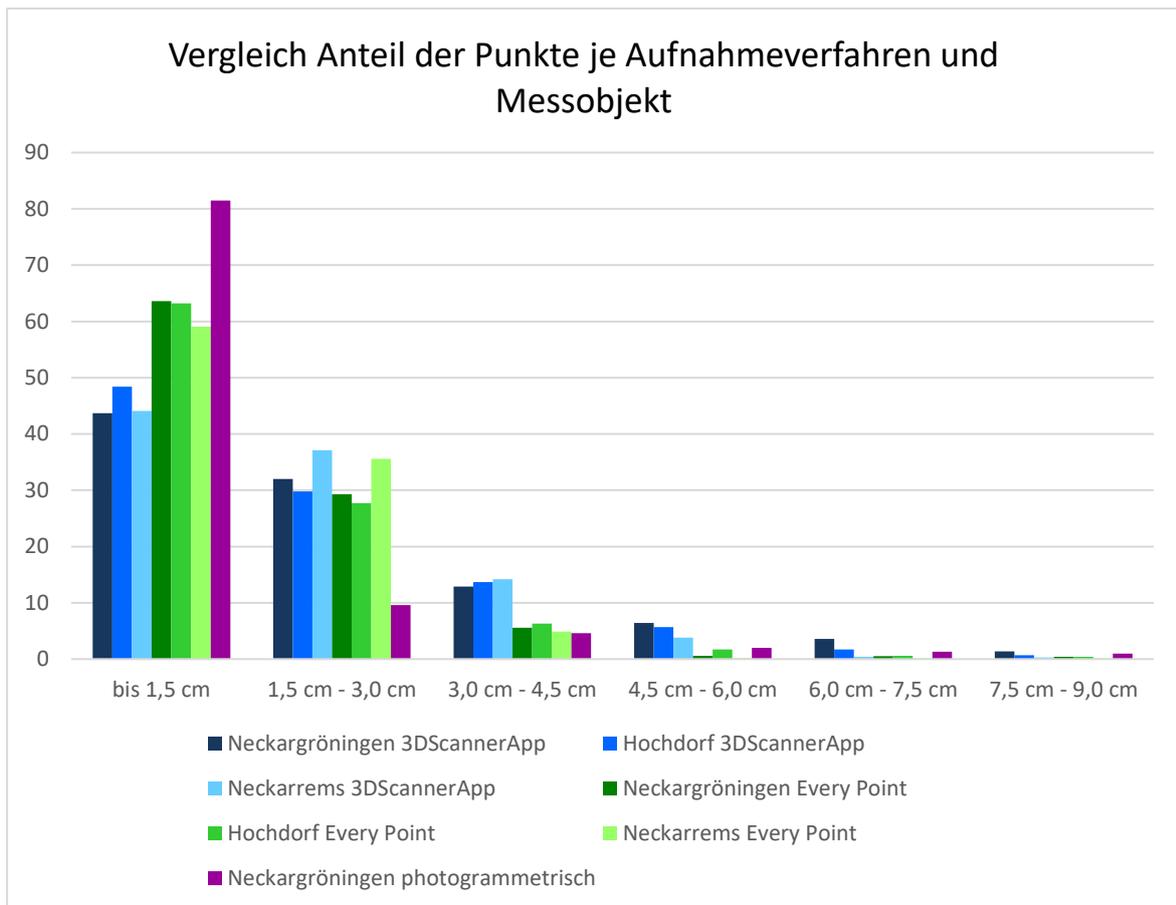


Abbildung 66: Diagramm

Die Darstellung im Diagramm bestätigt diese Feststellung. Es ist zu sehen, dass bei den Daten der 3DScannerApp (in Blautönen dargestellt) ein größerer Anteil an Punkten mit höheren Abweichungen vorhanden ist als bei der EveryPoint App (in Grüntönen dargestellt). Grundsätzlich sind aufgrund dieser Daten beide Applikationen in der Vermessung verwendbar.

Des Weiteren wurden die in Tabelle 11 dargestellten Kriterien festgelegt, anhand welcher eine zusätzliche Bewertung der Applikationen und auch ein Vergleich zum terrestrischen Laserscanner erfolgt.

Kriterium	3DScannerApp	EveryPoint	TLS
Reichweite	5 m	5 m	bis zu 270 m
Mögliche Einstellungen	im verwendeten Modus keine weiteren Einstellungen	Voxel Size, verschiedene Scan-Modi, Reichweite	Echtfarbe, Auflösung, Sensitivity, Aufnahmebereich
Dauer der Messung	je nach Größe des Objekts 1 min bis 1 min 30 s	je nach Größe des Objekts 1 min bis 1 min 30 s	9 min 11 s bei den in dieser Arbeit verwendeten Einstellungen
Objektgrößen	alle getesteten Objektgrößen möglich (bis ca. 12 m)	alle getesteten Objektgrößen möglich (bis ca. 12 m)	je nach Anwendung
Scangröße begrenzt	nein	ja	nein
Genauigkeiten, Abweichungen, Qualität der Aufnahme	Treppenanlagen: gute Ergebnisse, einige Bereiche mit zu großen Abweichungen Innenräume: nicht immer korrekt wiedergegeben, Abweichungen jedoch geringer	Treppenanlagen: Großteil der Punkte mit geringen Abweichungen Innenräume: unterschiedlich, teilweise Wände und Decke falsch dargestellt	1,2 mm + 10 ppm
Kompatibilität, Dateiformate	viele Dateiformate verfügbar, darunter auch pts, welches mit der Auswertesoftware kompatibel ist	ply und E57, Zwischenschritte vor der Weiterverarbeitung notwendig	standardmäßig mit der Software kompatibles Format

Tabelle 11: Vergleich der Aufnahmemethoden

Das erste Kriterium Reichweite ist bei beiden Applikationen gleich, da diese vom verbauten Sensor im iPhone abhängt, hier liegt der TLS deutlich vorn, jedoch sind 270 m Reichweite für viele Anwendungen nicht notwendig. Die vor der Messung festlegbaren Einstellungen unterscheiden sich bei den Applikationen. Die EveryPoint App lässt Optionen zu Voxel Size, Scan-Modi und Reichweite zu, während bei der 3DScannerApp, zumindest bei der Erfassung großer Objekte, keine weiteren Festlegungen getroffen werden können. Der TLS hält hier einige Optionen bereit, liegt aber bei der Scandauer deutlich hinter den Applikationen. Das Instrument benötigt über 9 Minuten für den Scan und die Aufnahme von Bildern, wohingegen die iPhone-Applikationen meist nur eine Minute oder, je nach Größe des Objekts, höchstens eineinhalb Minuten benötigen. Die Ausdehnung spielt in der Größenordnung der ausgewählten Objekte keine Rolle bei der Bewertung der Eignung der Apps. Ein weiterer Punkt ist die verfügbare Scangröße. Während mit der 3DScannerApp und dem TLS das gesamte Objekt

erfasst werden kann, bricht die EveryPoint App bei Erreichen der maximalen Scangröße die Aufnahme frühzeitig ab.

Die Genauigkeit der iPhone-Messungen an den Treppenanlagen reicht natürlich nicht an die des TLS heran, sind jedoch für den Zweck einer Bestandsaufnahme weitestgehend ausreichend. Aus den Punktwolken können die Eckpunkte der Treppen ausgegeben und in die Bestandsaufnahme integriert werden. Teilweise entstehen die Abweichungen der Applikationen durch eine ungenaue Passpunkteauswahl. Dieses Problem ist bei Messungen mit dem TLS nicht vorhanden. Hier besteht noch Bedarf zur softwareseitigen Optimierung der Apps, sodass auch diese Fehlerquelle reduziert werden kann.

Die Aufnahme der Innenräume brachte dagegen für beide Applikationen größere Probleme, was jedoch vor allem mit der Oberflächenbeschaffenheit der Wände in Verbindung gebracht werden kann. Daher sind für solch eine Messung Vorkehrungen zu treffen, die die Flächen differenzierter gestalten. Damit wird den Applikationen eine bessere Erfassung ermöglicht.

Beim Export stellt die 3DScannerApp wesentlich mehr Dateiformate zur Verfügung, als die EveryPoint App, darunter auch einige, die mit der Auswertesoftware Leica Cyclone kompatibel sind. Mit der EveryPoint App erreicht man auch ein kompatibles Format, allerdings nur über Umwege und Zwischenschritte.

Die Auswertung und Georeferenzierung der App-Punktwolken gestaltet sich aufwändiger als bei der Messung mit dem TLS. Da aufgrund schlechter Erkennbarkeit keine Zielmarken verwendet werden können, muss das häufig mühsame Einpassen über markante Eckpunkte des Objekts erfolgen.

Die Applikationen können in der Vermessung verwendet werden. Die Punktwolken der EveryPoint App liefert im Fall der Treppenanlagen qualitativ bessere Ergebnisse. Die 3DScannerApp zeigt bei der Erfassung der Innenräume und bei den Themen Komptabilität und Dateiformate, sowie der maximalen Scangröße Vorteile. Hervorzuheben ist auch die kürzere Scandauer der Applikationen im Vergleich zum TLS. Um einen besseren Workflow zu gewährleisten, sind aber noch einige Optimierungen, wie zum Beispiel das Integrieren von Zielmarken in die Messung notwendig.

6.5 Eignung photogrammetrischer Aufnahmen mit dem iPhone in der Vermessung

Die photogrammetrische Aufnahme des Messobjekts ergibt eine sehr gute Punktwolke, die auch im Vergleich mit der Referenzpunktwolke die besten Ergebnisse erzielt. Dabei erfolgt die Aufnahme ähnlich schnell, wie mit den getesteten Applikationen. Die Genauigkeitssteigerung durch Verwendung von Passpunkten ist ein wichtiger Aspekt, vor allem, da dieser Vorgang sehr simpel und in kurzer Zeit durchgeführt werden kann. Man benötigt kein zusätzliches, teures Equipment, denn einfache Klebepunkte sind ausreichend. Auch das Einmessen der

Punkte ist schnell und unkompliziert und kann in die eigentliche Aufnahme integriert werden. Außerdem gibt es keine speziellen technischen Voraussetzungen für die Aufnahme. Es wird lediglich die Kamera eines Smartphones, unabhängig von Betriebssystem und Hersteller, benötigt. Die Qualität der entstandenen Punktwolke ist im Diagramm in Abbildung 66 auf Seite 63 in violett dargestellt. Die Punkte haben im Vergleich zu allen weiteren Aufnahmen die geringsten Abweichungen zur Referenzpunktwolke. Allerdings ist für die Auswertung eine spezielle Software notwendig. Wenn diese nicht sowieso vorhanden und für andere Zwecke in Verwendung ist, könnte deren Anschaffung die Messung bei geringer Einsatzmöglichkeit unrentabel machen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ein Hauptziel dieser Arbeit ist es, den untersuchten LiDAR-Scanner des iPhone 12 Pro im Hinblick auf Vermessungsaufgaben zu testen, bei denen der Bedarf einer zeitsparenden Durchführung und des Erhalts zuverlässiger Ergebnisse besteht. Dafür wurden Messungen mit zwei Applikationen an Objekten verschiedener Art und Größe durchgeführt. Die Applikationen wurden im Vorfeld getestet und nach Feststellung der Eignung ausgewählt. Außerdem wurde die photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone an einem Messobjekt getestet. Im Anschluss an die Messung fand die Georeferenzierung und, zur weiteren Beurteilung, der Vergleich der Daten mit einer Referenzpunktwolke aus der Messung mit einem TLS statt.

Die Bedienung der Applikationen während der Messung ist unkompliziert und größtenteils selbsterklärend, sodass keine Schulung zur Verwendung der Apps notwendig ist. Auch die photogrammetrische Aufnahme ist einfach durchzuführen. Lediglich das Vorgehen bei der Aufnahme der Bilder muss für ein optimales Ergebnis vorab durchdacht werden. Der Zeitaufwand zur Erfassung der Objekte mit allen getesteten Aufnahmemethoden ist um ein Vielfaches geringer als der, mit dem TLS. Die gewählten Messobjekte konnten alle, unabhängig von deren Größe, zufriedenstellend erfasst werden.

Bereits bei der Messung selbst wurden Unterschiede zwischen den erfassten Messobjekten festgestellt. Auf den Treppenanlagen, welche aus vielen unterschiedlichen Flächen und Kanten bestehen, können deutlich mehr Punkte durch die Apps erzeugt werden als auf den einheitlichen Wänden der Innenräume. Daher ist auch die Dauer der Messung der Innenräume etwas höher.

Auch in der anschließenden Auswertung setzt sich diese Beobachtung fort. Bei den ausgewählten Treppenanlagen erzielen die Applikationen deutlich bessere Ergebnisse als bei den aufgenommenen Innenräumen. Während die Treppenanlagen bis auf wenige Lücken vollständig und richtig erfasst werden, haben die Apps Schwierigkeiten bei den gemessenen Innenräumen. Hier fehlen zum Teil Daten von Boden und Decke. Verschiedene Wände werden

falsch oder mehrfach dargestellt. Daraus erfolgt die Schlussfolgerung, dass Objekte mit gut strukturierter Oberfläche und vielen Kanten besser erfasst werden als gleichmäßige, große Flächen.

Die verwendeten Applikationen 3DScannerApp und EveryPoint weisen, sowohl bei der Messung als auch bei der anschließenden Auswertung, sowie der Qualität der Punktwolken, Unterschiede auf. Während der Messung ist die maximale Scangröße ein wichtiger Punkt, diese ist bei der EveryPoint App begrenzt. Außerdem bestehen, wie schon vorher erwähnt, größere Probleme bei der Erfassung von Innenräumen. Hier weisen die Daten größere Lücken auf und darüber hinaus wird die Geometrie der Räume falsch dargestellt.

Hervorzuheben ist jedoch, dass die Applikation EveryPoint bei der Aufnahme der Treppenanlagen die besseren Ergebnisse hinsichtlich der Punktdichte liefert. Auch der Vergleich der Treppenanlagen zur Referenzpunktwolke ergibt gegenüber der getesteten 3DScannerApp einen geringeren Anteil an Punkten mit zu großen Abweichungen und damit eine höhere Genauigkeit.

Die Punktwolken der 3DScannerApp sind dagegen bei der Erfassung der Innenräume deutlich zuverlässiger. Es werden mehr Punkte an Boden und Decke erzeugt und auch die Geometrie der Räume ist wirklichkeitsgetreuer wiedergegeben. Außerdem sind beim Export der Daten mehr Dateiformate verfügbar, sodass zur Weiterverarbeitung der Punktwolken keine Zwischenschritte notwendig sind.

Ein Nachteil der 3DScannerApp ist jedoch, dass für die Aufnahme von großen Objekten keine Einstellungen hinsichtlich Punktdichte oder Reichweite getroffen werden können. Außerdem ergibt der Vergleich zur Referenzpunktwolke eine größere Anzahl an Punkten mit zu großen Abweichungen als bei der weiteren getesteten App. Trotzdem befindet sich ein Großteil der Punkte in einem Bereich, der für die untersuchten Zwecke ausreicht.

Die photogrammetrische Aufnahme mit der Hauptkamera des iPhones liefert im Vergleich mit der Referenzpunktwolke die besten Ergebnisse. Es bestehen nur geringe Abweichungen, was auch mit der genaueren Bestimmung der Passpunkte zusammenhängt. Mit dieser Methode wird in dieser Arbeit nur das Messobjekt Neckargröningen erfasst, daher können keine weiteren Aussagen zur Abhängigkeit der Genauigkeit von Größe oder Beschaffenheit des Objekts getroffen werden.

Der größte Genauigkeitsverlust bei der Aufnahme mit den Applikationen EveryPoint und 3DScannerApp besteht bei der Georeferenzierung der Daten. Hier müssen Passpunkte ausgewählt werden, welche markante Punkte in den Objekten darstellen. Die manuelle Auswahl ist zeitaufwändig und es wird gegebenenfalls nicht immer der exakt richtige Punkt ausgewählt. Dies wird auch durch eine geringere Punktdichte der durch die Applikationen erzeugten Punktwolken begünstigt. Hier ist die photogrammetrische Aufnahme im Vorteil, bei der genaue, markierte Passpunkte verwendet werden, die auf den Bildern erkennbar sind.

Es bestehen also vor allem bei der Georeferenzierung und bei der Verwendung von Passpunkten in Zusammenhang mit den LiDAR-Scanner-Applikationen des iPhones Möglichkeiten zur Optimierung des Systems. Zwar sind die erzielten Ergebnisse bereits gut und verwendbar, jedoch wäre das Erfassen von Passpunkten durch die Applikationen selbst eine weitere Verbesserung und Vereinfachung der Messung. An diesen Stellen können wesentliche Genauigkeitssteigerungen erzielt werden, durch welche sich das aktuell untersuchte Anwendungsgebiet der Aufnahmemethode erweitern könnte.

Für die in dieser Arbeit untersuchte Anwendung der Bestandsaufnahme ist ein Einsatz des iPhone LiDAR-Scanners durchaus denkbar. Die in dieser Untersuchung erzielten Genauigkeiten beider getesteten Applikationen sind ausreichend. Die Messmethode stellt eine zeitliche und qualitative Verbesserung des bisherigen Vorgehens dar, da in kurzer Zeit eine Vielzahl an Punkten des Messobjekts erfasst werden kann. Durch die unkomplizierte Handhabung und große Mobilität ermöglicht das Gerät die Aufnahme von Stellen an den Objekten, die sonst nur schwer gemessen werden können.

Die Innenräume sind durch die Messung der Applikationen jedoch teilweise unzureichend dargestellt. Da nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass die Räume wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden, ist von der Aufnahme ganzer Räume ohne zusätzliche Möglichkeit zur Überprüfung der Richtigkeit abzusehen. Hier ist nur der Einsatz für kleine Teilbereiche sinnvoll, die der TLS nicht erfassen kann.

Auch die untersuchte photogrammetrische Aufnahme mit dem iPhone ist eine gute Alternative zur Erfassung schwieriger Messobjekte. Sie sticht vor allem durch sehr gute Ergebnisse und eine hohe Genauigkeit bei der Auswertung heraus. Außerdem ist die Aufnahme unabhängig vom Betriebssystem des Smartphones und es werden keine zusätzlichen Applikationen benötigt. So kann bei einer Messung flexibel auf diese Methode zurückgegriffen werden. Einzig die zusätzlich benötigte Auswertesoftware stellt einen Nachteil dar.

Der LiDAR-Scanner des iPhone 12 Pro ersetzt einen terrestrischen Laserscanner hinsichtlich Genauigkeit und Menge der erfassten Daten bei Weitem nicht. Allerdings steht die Verwendung der Technologie in Smartphones noch am Anfang der Entwicklung, sodass noch kein ausgereiftes System zur Erfassung einwandfreier Punktwolken zur Verfügung steht. Mit fortschreitender Entwicklung in dem Bereich der verbauten Sensoren, wie VCSEL und SPAD, können auch hier bessere Ergebnisse und eine höhere Qualität erzielt werden. Auch eine Weiterentwicklung der Applikationen ist zu erwarten. Diese könnten durch die Möglichkeit zur Erkennung von Zielmarken oder Ähnlichem die Genauigkeit der Ergebnisse steigern und die Georeferenzierung verbessern.

Doch auch mit dem jetzigen Stand der Technik wurden im Rahmen dieser Arbeit gute Ergebnisse erzielt. Bei den Messobjekten muss jedoch darauf geachtet werden, dass keine zu großen, einheitlichen Flächen vorhanden sind, sodass nicht jedes Objekt ohne weitere

vorbereitende Maßnahmen aufgenommen werden kann. Trotzdem stellt es eine gute Ergänzung, vor allem im Bereich der Bestandsaufnahmen, dar, um schwer zu erfassende Objekte zuverlässig darzustellen.

Literaturverzeichnis

- Agisoft LLC. (kein Datum). *Intelligent photogrammetry*. Abgerufen am 25. Dezember 2021 von https://www.agisoft.com/pdf/metashape_presentation.pdf.
- Apple Inc. (18. März 2020). *Apple stellt neues iPad Pro mit fortschrittlichem LiDAR Scanner vor und bringt Trackpad-Unterstützung für iPadOS*. Abgerufen am 28. Dezember 2021 von <https://www.apple.com/at/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>.
- Bezmalinovic, T. (7. März 2021). *MIXED.de*. Abgerufen am 28. Dezember 2021 von <https://mixed.de/iphone-12-pro-was-den-lidar-scanner-besonders-macht/>.
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology.
- Gotzig, H., & Geduld, G. (2015). LIDAR-Sensorik. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz, & C. Singer (Hrsg.), *Handbuch Fahrerassistenzsysteme* (S. 317-334). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Laan Labs. (kein Datum). *3DScannerApp*. Abgerufen am 3. Januar 2022 von <https://3dscannerapp.com/help/>.
- Leica Geosystems. (a). *Leica Cyclone Register*. Abgerufen am 25. Dezember 2021 von <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register>.
- Leica Geosystems. (b). *Leica Cyclone Verarbeitungssoftware für 3D-Punktwolken*. Abgerufen am 25. Dezember 2021 von <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>.
- Leica Geosystems. (c). *Leica Cyclone REGISTER*. Abgerufen am 25. Dezember 2021 von <https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica-cyclone-register-ds-755765-0221-en-lr.ashx?la=de-de&hash=0DA6C4F1E609B40A3A75EA9CBF1F9BD8>.
- Leica Geosystems. (d). *3DReshaper Punktwolken-Verarbeitungssoftware*. Abgerufen am 25. Dezember 2021 von <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/3dreshaper>.
- Lindemann, M. (2019). *Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Löffler-Mang, M. (2012). *Optische Sensorik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1. Auflage.
- Luetzenburg, G., Kroon, A., & Bjørk, A. A. (15. November 2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. (S. Nature, Hrsg.) *scientific reports*. Abgerufen am 28. Dezember 2021 von <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01763-9>.
- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen - Methoden - Beispiele*. Berlin: Wichmann Verlag.
- Müller, K. (2021). Leistungsuntersuchung 3D-Erfassung offener Gräben mit LiDAR Smartphones. Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik.

- Niemeier, W., Thomsen, S., & Schäfer, M. (2002). 3D-Geometrieerfassung mit terrestrischen Laserscannern. In T. Luhmann, *Photogrammetrie und Laserscanning* (S. 15-26). Heidelberg: Wichmann Verlag, 1. Auflage.
- Petit, F. (2020 a). Die Entwicklung von LiDAR im Wandel der Zeit. *Blickfeld Blog*. Abgerufen am 10. November 2021 von <https://www.blickfeld.com/de/blog/entwicklung-von-lidar/>.
- Petit, F. (2020 b). Entmystifizierung von LiDAR – Ein Überblick über die LiDAR-Technologie. *Blickfeld Blog*. Abgerufen am 9. November 2021 von <https://www.blickfeld.com/de/blog/was-ist-lidar/>.
- Sigrist, M. W. (2018). *Laser: Theorie, Typen und Anwendungen*. Zürich, Schweiz: Springer-Verlag, 8. Auflage.
- Vogt, M., Rips, A., & Emmelmann, C. (2021). Comparison of iPad Pro's LiDAR and True Depth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution.
- Walsh Ph.D., G. (Juli 2015). *Leica ScanStation White Paper* (Leica Geosystems AG, Hrsg.). Abgerufen am 7. Dezember 2021 von https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/leica_scanstation_p-series_details_that_matter_wp.ashx?la=de-de&hash=98C4CA4B25A5F88F89A47F240AC260AA.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektrum elektromagnetischer Wellen.....	12
Abbildung 2: Übersicht LiDAR-Systeme	13
Abbildung 3: Aufbau eines VCSEL	15
Abbildung 4: Graphische Übersicht über das methodische Vorgehen.....	20
Abbildung 5: Position des LiDAR-Sensors am iPhone.....	21
Abbildung 6: Vollständiges Scanmuster des LiDAR-Sensors des iPhone	22
Abbildung 7: LiDAR-Punktmuster bei Verwendung der Kamera-App.....	22
Abbildung 8: Nähere Aufnahme des Punktmusters des iPhone LiDAR-Scanners.....	22
Abbildung 9: Startoberfläche der App EveryPoint	23
Abbildung 10: Auswahl der Voxel-Größe	23
Abbildung 11: Ansicht während der Aufnahme.....	24
Abbildung 12: Einstellung LOW RES.....	25
Abbildung 13: Einstellung HIGH RES.....	25
Abbildung 14: Ansicht während der Aufnahme	26
Abbildung 15: Leica ScanStation P40.....	26
Abbildung 16: Übersicht über Scans und Genauigkeiten in Leica Cyclone	27
Abbildung 17: Darstellung des Scans mit Intensitätswerten in Leica Cyclone.....	28
Abbildung 18: Messobjekt Hochdorf (Treppe).....	30
Abbildung 19: Messobjekt Neckargröningen (Treppe)	31
Abbildung 20: Messobjekt Neckarrems (Treppe).....	31
Abbildung 21: Messobjekt Innenraum 1.....	32
Abbildung 22: Messobjekt Innenraum 2.....	32
Abbildung 23: Vorgehen bei der Messung	33
Abbildung 24: Messobjekt Neckarrems, aufgenommen mit der Applikation EveryPoint	35
Abbildung 25: Zielmarke.....	35
Abbildung 26: Photogrammetrische Aufnahme mit Klebepunkten (bei weißen Pfeilen).....	37
Abbildung 27: Punktdichte bei der Aufnahme einer Treppenanlage.....	38
Abbildung 28: Punktdichte bei der Aufnahme einer Wandfläche.....	38
Abbildung 29: Zielmarken erfasst mit 3DScannerApp, verschoben und an falscher Stelle dargestellt.....	38
Abbildung 30: Zielmarken erfasst mit 3DScannerApp.....	38
Abbildung 31: Ansicht Model Space in Leica Cyclone	41
Abbildung 32: Model Space mit Passpunkten für das Messobjekt Neckargröningen	42
Abbildung 33: Vollständiger Weg zur georeferenzierten Punktwolke aus der Aufnahme mit dem iPhone LiDAR-Scanner.....	42
Abbildung 34: Berechnete Dense Cloud mit Passpunkten.....	43

Abbildung 35: Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerapp	47
Abbildung 36: Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint.....	47
Abbildung 37: Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp	48
Abbildung 38: Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint	48
Abbildung 39: Messobjekt Neckarremms - Applikation 3DScannerApp	49
Abbildung 40: Messobjekt Neckarremms - Applikation EveryPoint	49
Abbildung 41: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation 3DScannerApp.....	49
Abbildung 42: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation EveryPoint	49
Abbildung 43: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp.....	49
Abbildung 44: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint	49
Abbildung 45: Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme	50
Abbildung 46: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp, Ansicht vorne .	52
Abbildung 47: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp, Ansicht oben ..	52
Abbildung 48: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint, Ansicht vorne	53
Abbildung 49: Vergleich Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint, Ansicht oben	54
Abbildung 50: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp, Ansicht oben	55
Abbildung 51: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation 3DScannerApp, Ansicht vorne	55
Abbildung 52: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint, Ansicht oben	56
Abbildung 53: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Applikation EveryPoint, Ansicht vorne	56
Abbildung 54: Vergleich Messobjekt Neckarremms - Applikation 3DScannerApp.....	57
Abbildung 55: Vergleich Messobjekt Neckarremms - Applikation EveryPoint.....	58
Abbildung 56: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme, Ansicht oben.....	59
Abbildung 57: Vergleich Messobjekt Neckargröningen - Photogrammetrische Aufnahme, Ansicht vorne.....	59
Abbildung 58: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation 3DScannerApp, Grundriss	60
Abbildung 59: Messobjekt Innenraum 1 - Applikation EveryPoint, Grundriss	60
Abbildung 60: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Grundriss	61
Abbildung 61: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Grundriss	61
Abbildung 62: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Schnitt 1	61
Abbildung 63: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Schnitt 1	61
Abbildung 64: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation 3DScannerApp, Schnitt 2.....	62
Abbildung 65: Messobjekt Innenraum 2 - Applikation EveryPoint, Schnitt 2.....	62
Abbildung 66: Diagramm	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf, TLS44

Tabelle 2: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen, TLS.....45

Tabelle 3: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, TLS.....45

Tabelle 4: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf - Applikation 3DScannerApp
.....46

Tabelle 5: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Hochdorf - Applikation EveryPoint46

Tabelle 6: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen - Applikation
3DScannerApp.....47

Tabelle 7: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen - Applikation
EveryPoint.....47

Tabelle 8: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, 3DScannerApp48

Tabelle 9: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckarrems, EveryPoint.....48

Tabelle 10: Ergebnisse Georeferenzierung Messobjekt Neckargröningen -
Photogrammetrische Aufnahme50

Tabelle 11: Vergleich der Aufnahmemethoden.....64