

Bachelorarbeit im Studiengang Rettungsingenieurwesen

# Experimentelle Evaluation und Vergleich von technischen Systemen der 3D-Erfassung und -Rekonstruktion auf die Geeignetheit der gefahrlosen Erkundung und Lagedarstellung von Gebäudeinnenräumen für die Gefahrenabwehr

vorgelegt von

**Jan Bäumer**

**Matrikelnummer:**

an der Technischen Hochschule Köln - Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr (IRG).

Erstgutachter: Prof. Dr. Alexander Fekete (Technische Hochschule Köln)

Zweitgutachter: Prof. Dr. Arnulph Fuhrmann (Technische Hochschule Köln)

März 2017

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei den beiden Firmen FARO Technologies und Laserscanning-Europe GmbH bedanken, die mir freundlicherweise ihre Geräte zur Verfügung gestellt haben. Dabei sind besonders Herr Stefan Hug (FARO Technologies), Herr Eric Bergholz und Herr Ole Krause (Laserscanning-Europe) zu nennen.

# Bachelorarbeit-Zusammenfassung

**Titel:** Experimentelle Evaluation und Vergleich von technischen Systemen der 3D- Erfassung und -Rekonstruktion auf die Geeignetheit der gefahrlosen Erkundung und Lagedarstellung von Gebäudeinnenräumen für die Gefahrenabwehr

**Gutachter:**

1. Prof. Dr. Alexander Fekete (Technische Hochschule Köln)
2. Prof. Dr. Arnulph Fuhrmann (Technische Hochschule Köln)

**Zusammenfassung:** Im Rahmen dieser Bachelorarbeit an der Technischen Hochschule Köln, deren Bearbeitungszeit vom 20.1.2017 bis 24.3.2017 ist, wird durch ein technisches Experiment geprüft, ob diverse Technologien zur 3D-Erfassung und Rekonstruktion geeignet sind Gebäudeinnenräume so zu erkunden, dass die Gefahrenabwehr dadurch einen höheren Nutzen hat, als es bei einer persönlichen oder autonomen Videoerkundung der Fall ist. Dies soll vor allem dann helfen, wenn Gebäude nicht mehr betreten werden sollten, wie es beispielsweise der Fall ist, wenn das Gebäude durch Erdbebenschäden einsturzgefährdet oder mit Gasen kontaminiert ist. 3D-Modelle einer Umgebung haben u.a. den Vorteil, dass problemlos neue Blickwinkel eingenommen, Maße ermittelt und Planungen für Rettungseinsätze oder Evakuierungen effizienter durchgeführt werden können, ohne Bildmaterial aufwendig zu sichten. Zudem können die Ergebnisse für spätere Evaluationen und Trainings genutzt werden. Um diese Geeignetheit festzustellen werden Beurteilungskriterien erarbeitet, die ein potentielles System erfüllen muss. Diese Kriterien sind: Günstig in der Beschaffung, Zeit bis zu einer 3D-Darstellung, leichte Bedienbarkeit, Qualität bzw. Informationsgewinnung aus der Darstellung (Erkennung von Zugängen und Personen), Lieferung von Zusatzinformationen (beispielsweise Maßangaben) und ob das System Online oder Offline funktionsfähig ist. Um diese Kriterien beurteilen zu können, werden Systeme der drei Haupttechnologien in der 3D-Erfassung (Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO, RGB-D-Kamera Microsoft Kinect und FARO Freestyle3D, Fotogrammetrie mit der Software Agisoft PhotoScan) in einem Versuch überprüft. Dabei wird das Labor für Großschadensereignisse der Technischen Hochschule Köln, der angrenzende Flur und das angrenzende Treppenhaus gescannt bzw. erfasst und rekonstruiert, wobei die nötigen Daten ermittelt werden. Dabei stellt sich heraus, dass der FARO Freestyle3D mit seiner RGB-D-Technologie und der Software FARO Scene als einziges System alle Kriterien erfüllt und somit für den Zweck der Erkundung in diesem Kontext geeignet ist. Der Microsoft Kinect Sensor mit der Software FARO Scene hat, durch Fehler in der Rekonstruktion, Schwächen in der Darstellungsqualität. Dies gilt auch für die Kombination aus GeoSLAM ZEB-REVO/CloudCompare, da hiermit kein Farbscan erstellt werden kann und somit eine Erkennung von Objekten (z.B. geschlossene Türen) erschwert wird. Die Fotogrammetrie dauert mit einer Berechnungsdauer von ca. 38 Stunden zu lange, um in Notfallsituationen einen Nutzen zu bieten und liefert außerdem falsche Maßangaben.

Nicht näher betrachtet wird in dieser Arbeit die (autonome) Erkundung durch Roboter oder Drohnen, die die Geräte transportieren können, Strom- und Datenübertragungsproblematiken, andere ergänzende Sensortechniken und die Erkundung in dunkler Umgebung.

**Stichwörter:** Erkundung, Gefahrenabwehr, 3D, gefahrlos, Gebäudeinnenräume

**Datum:** 24. März 2017

# Bachelor Thesis - Abstract

**Title:** Experimental evaluation and comparison of 3D-Scanning and reconstruction on the suitability of safe exploration and situation reporting of the inside of buildings for emergency response

**Reviewers:**

1. Prof. Dr. Alexander Fekete (Technische Hochschule Köln/University of Applied Sciences)
2. Prof. Dr. Arnulph Fuhrmann (Technische Hochschule Köln/ University of Applied Sciences)

**Abstract:** In this bachelor thesis, created from 20.1.2017 to 24.3.2017, is examined by a technical experiment, whether various technologies for 3D capturing and reconstruction are suitable for exploring the interior of a building in such way that the benefit for emergency response is higher than in a personal or autonomous video exploration. This is particularly useful when buildings should no longer be entered. For example when the building has been impacted by earthquake damages or is contaminated with gases. 3D models of an environment have the advantages, among other things, that new viewing angles can be taken without difficulties, dimensions can be determined and the planning for rescue operations and evacuations can be carried out more efficiently, without the need of sighting video footages. In addition, the results can be used for later evaluations and trainings. In order to determine this suitability, assessment criteria have been developed, which must be fulfilled by a potential system. These criteria are: Cost-effective in procurement, elapsed time for a 3D representation, quality and retrieval of information from the representation (recognition of entrances and persons), delivery of additional information (e.g. measurements) and whether the system is functional on-line or off-line. In order to be able to assess these criteria, systems of the three main technologies in 3D detection (Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO, RGB-D-Camera Microsoft Kinect and FARO Freestyle3D, photogrammetry with the software Agisoft PhotoScan) are tested in an experiment. In the experiment, the laboratory for large-scale emergencies of the TH Köln, the adjoining corridor and the adjoining staircase are scanned and reconstructed, whereby the necessary data are determined. Results of this experiment show that the FARO Freestyle3D with its RGB-D technology (in combination with the software FARO Scene) as the only system fulfils all the criteria and is thus suitable for the purpose of exploration in this context. The Microsoft Kinect Sensor with the software FARO Scene has, through errors in the reconstruction, weaknesses in the quality of the representation. This also applies to the combination of GeoSLAM ZEB-REVO/CloudCompare, since it is not possible to create a color scan and thus make detection of objects (such as closed doors) more difficult. With a processing time of approx. 38 hours, the photogrammetry takes too long to provide an advantage in emergency situations and also provides incorrect measurements.

In this thesis, the (autonomous) exploration by robots or drones, which can transport the devices, is not considered in detail. This also applies to current and data transmission problems, other complementary sensor techniques and exploration in dark environments.

**Keywords:** Exploration, emergency response, 3D, safe, interior of buildings

**Date:** 24 March 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>Bachelorarbeit-Zusammenfassung</b> .....	<b>I</b>
<b>Bachelor Thesis - Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 State of the Art</b> .....	<b>4</b>
2.1 Techniken der 3D Erfassung, Rekonstruktion und Darstellung .....	4
2.2 Erkundung, Lagedarstellung und Verwendung von Technologien der 3D-Erfassung, Rekonstruktion und Darstellung in der Gefahrenabwehr .....	8
2.3 Autonome Erkundung und 3D-Mapping bzw. Darstellung von Gebäudeinnenräumen durch Roboter und Drohnen .....	12
<b>3 Methodik</b> .....	<b>13</b>
3.1 Identifizierung von Beurteilungskriterien für die Geeignetheit der Systeme .....	15
3.2 Experiment .....	18
3.2.1 Geräte- und Softwarebeschaffung .....	18
3.2.2 Versuchsplanung/-Vorbereitung, Ablauf und Methodik der Ermittlung der Zielgrößen für die Beurteilungskriterien .....	22
3.2.3 Versuchsabläufe .....	29
<b>4 Ergebnisdarstellung</b> .....	<b>34</b>
4.1 Kosten der Geräte .....	34
4.2 Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos .....	35
4.3 Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung .....	35
4.4 Bedienungsschritte des Scanvorgangs .....	35
4.5 Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware .....	38
4.6 Erkennungsrate einer Person .....	41
4.7 Erkennungsrate von Türen/Zugängen .....	42
4.8 Erkennungsrate von einem Treppenhaus .....	44
4.9 Voraussetzung Internetzugang .....	46
4.10 Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen .....	46
<b>5 Diskussion</b> .....	<b>49</b>
5.1 Interpretation, Vergleich und Ermittlung der Geeignetheit .....	49
5.2 Kritische Betrachtung der Methode/Versuche und Fehlerquellen .....	56

<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>57</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>60</b>
	<b>Quellenverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
	<b>Persönliche Erklärung.....</b>	<b>77</b>



# Abkürzungsverzeichnis

IRG	Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr
LIDAR	Light detection and ranging
RGB	Red, Green, Blue
RGB-D	Red, Green, Blue, Depth
SLAM	Simultaneous localization and mapping

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Workflow des Projektes.....	14
Abbildung 2: FARO Freestyle3D.....	20
Abbildung 3: GeoSLAM ZEB-REVO Handscanner mit Datenspeicher .....	20
Abbildung 4: Microsoft Kinect Sensor .....	21
Abbildung 5: Screenshot Speedtest. Durchgeföhrt mit <a href="https://www.wieistmeineip.de/speedtest/">https://www.wieistmeineip.de/speedtest/</a> .....	25
Abbildung 6: Scanbereich Labor und Standort der Puppe (roter Punkt) .....	28
Abbildung 7: Puppe als Opfer (links) und Labor für Großschadenslagen (rechts).....	28
Abbildung 8: Treppenhaus.....	29
Abbildung 9: Kamerapositionen mit Blickrichtung.....	30
Abbildung 10: Markierungen der Kamerapositionen (Hier dargestellt in dem angrenzenden Flur).....	30
Abbildung 11: Kamerawinkel .....	31
Abbildung 12: Rollwagen mit Computer, Kinect Sensor und Stromversorgung.....	31
Abbildung 13: Scanweg Kinect Sensor .....	32
Abbildung 14: Scanweg Freestyle3D und ZEB-REVO .....	33
Abbildung 15: 3D Rekonstruktion (Ansicht von seitlich oben) mit tatsächlichem Scanweg (orange) Kinect .....	36
Abbildung 16: 3D Rekonstruktion (Ansicht von seitlich oben) mit tatsächlichem Scanweg (orange) Freestyle3D .....	36
Abbildung 17: 3D Punktwolke und tatsächlicher Scanweg (schwarz) GeoSLAM ZEB- REVO .....	37
Abbildung 18: Tatsächliche Kamerapositionen.....	38
Abbildung 19: 3D Rekonstruktion nach Nachverarbeitung (Microsoft Kinect + FARO Scene) .....	38
Abbildung 20: 3D Rekonstruktion nach Nachverarbeitung (FARO Freestyle3D + FARO Scene) .....	39
Abbildung 21: 3D Punktwolke GeoSLAM ZEB-REVO .....	39
Abbildung 22: 3D Rekonstruktion von GeoSLAM ZEB-REVO nach Erstellung eines Meshes mit CloudCompare.....	40
Abbildung 23: 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie mit Decke .....	41
Abbildung 24: 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie ohne Decke .....	41

Abbildung 25: Darstellung der Puppe in der 3D Rekonstruktion. Links: Fotogrammetrie; Rechts: ZEB-REVO .....	42
Abbildung 26: Darstellung der Puppe in der 3D Rekonstruktion. Links: Kinect; Rechts: Freestyle3D .....	42
Abbildung 27: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Fotogrammetrie. Fenster (oben links), Flur mit Türen (oben rechts), Eingangstür Labor (unten) .....	43
Abbildung 28: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO und CloudCompare. Eingangstür Labor (links), Fenster (rechts) .....	43
Abbildung 29: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene. Eingangstür Labor (oben links), Flur mit Türen (oben rechts), Fenster (unten) .....	44
Abbildung 30: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene. Eingangstür Labor und Flur mit Türen (links), Fenster (rechts) .....	44
Abbildung 31: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Fotogrammetrie .	45
Abbildung 32: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO und CloudCompare.....	45
Abbildung 33: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene	45
Abbildung 34: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene .....	46
Abbildung 35: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie .....	47
Abbildung 36: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO in CloudCompare.....	48
Abbildung 37: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene .....	48
Abbildung 38: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene .....	49
Abbildung 39: Dopplungen an einer Tür (links) und niedrige Auflösung Treppenhaus (rechts) aus Rekonstruktion mit Kinect .....	54

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Systemüberblick - Hardware mit Technologie und zugehöriger Software.....	22
Tabelle 2: Zielgrößen.....	23
Tabelle 3: Einflussgrößen .....	23
Tabelle 4: Ergebnisse Preise der Geräte .....	35
Tabelle 5: Ergebnisse Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos.....	35
Tabelle 6: Ergebnisse Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung.....	35
Tabelle 7: Ergebnisse Erkennungsrate der Person pro System (5 Befragte) .....	41
Tabelle 8: Ergebnisse Erkennungsrate von Türen und Zugängen pro System (5 Befragte)	43
Tabelle 9: Ergebnisse Erkennungsrate des Treppenhauses pro System (5 Befragte) .....	44
Tabelle 10: Ergebnisse Voraussetzung Internetzugang .....	46
Tabelle 11: Ergebnisse Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen .....	47
Tabelle 12: Ermittelte Werte für die Beurteilungskriterien pro Hard- und Softwarekombination.....	55
Tabelle 13: Beurteilung der Geeignetheit .....	56

# Glossar

Führungskreislauf	Der Führungskreislauf entspricht dem Schema des Führungsvorgangs in der Gefahrenabwehr. Dieses Schema ist dadurch gekennzeichnet, dass er sich nach der Lagefeststellung, der Planung und der Befehlsgebung wiederholt. (Ministerium für Inneres und Kommunales NRW 10.03.1999, S. 25)
Gefahrenabwehr	Die Gefahrenabwehr dient dazu, Schäden von einem Schutzgut abzuwenden oder zu minimieren. Dies beinhaltet alle Maßnahmen, aber auch den Katastrophen- und Zivilschutz. (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) 2013, S. 12)
Mapping	Erstellung einer Karte bzw. einer Darstellung der Umgebung.
Punktewolke	Eine Vielzahl an Punkten in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem bilden eine Punktewolke. Diese Punkte werden durch beispielsweise Laserscanner oder andere Technologien der 3D-Erfassung ermittelt.
Mesh	Auf Deutsch: Gitternetz Die Punkte der Punktewolke werden miteinander verbunden und somit entsteht ein Gitternetz. Die Flächen werden gefüllt und es entsteht eine glatte Oberfläche.

# 1 Einleitung

Für eine adäquate und erfolgreiche Planung und Durchführung eines Notfalleinsatzes durch Kräfte der Gefahrenabwehr ist eine Erkundung der Lage am Einsatzort unabdingbar und der erste Schritt im Führungskreislauf (Ministerium für Inneres und Kommunales NRW 10.03.1999, S. 26–28). So können gefährdete Objekte und Personen gefunden, Zugänge und Laufwege identifiziert und Gefahren für die eigenen Kräfte erkannt werden.

Jedoch können durch beispielsweise Erdbeben oder Explosionen Gebäude so stark beschädigt werden, dass diese einsturzgefährdet sind und dadurch eine gefahrlose Erkundung des Gebäudeinneren durch Menschen nicht mehr gewährleistet ist. Auch eine Explosionsgefahr oder das Vorhandensein von giftigen Gasen macht eine menschliche Erkundung sehr riskant. (Feuerwehr- und Katastrophenschutzschule Rheinland-Pfalz 2010) Die Unversehrtheit bzw. der Eigenschutz der Einsatzkräfte ist jedoch oberstes Ziel, damit die Zahl der Verletzten so gering wie möglich bleibt (Brand-Schutz/Deutsche Feuerwehrzeitung 2015, S. 47–48).

Auch aus diesem Grund werden in der Gefahrenabwehr vermehrt unbemannte Fahr- und Flugzeuge (Drohnen) eingesetzt. Diese schaffen neue Überblicke aus der Höhe oder dringen in Gebiete vor, die für Menschen zu gefährlich sind. (Emili 2016; Rivas Casado und Leinster 2017) Jedoch sind diese Systeme für die Visualisierung zumeist nur mit einer Videokamera ausgestattet oder maximal mit der Ergänzung einer Wärmebildkamera (Taurob GmbH 2016) oder eines Bioradars zur Ortung von Personen (Hamp et al. 2012). Dadurch können zwar Brände erkannt oder Personen in unübersichtlichen Gebieten geortet werden, jedoch muss dafür das Videomaterial bei der Sichtung vor- und zurückgespult oder während des Einsatzes ständig beobachtet werden. Somit ist eine übersichtliche Lagedarstellung für die Führungskräfte nicht direkt gegeben, da die erhaltenen Informationen aufbereitet und auf z.B. einer Übersichtskarte dargestellt werden müssen.

Im Gegensatz zu 2-dimensionalen Videoaufnahmen oder Fotografien haben 3D Modelle von z.B. Gebäuden oder ganzen Städten, ob digital oder physisch, einige Vorteile, die auch schon einige Städte und Behörden erkannt haben (InGeoForum und Kommission 3D-Stadtmodelle; Bezirksregierung Köln 2017). So können für eine bessere Orientierung sehr einfach verschiedene Blickwinkel eingenommen werden, um so z.B. die geeignetsten Zugangspunkte für die Einsatzkräfte zu finden (Chen et al. 2014) und Wege durch das Gebäude auszumachen (Thill et al. 2011), die auch für Evakuierungsplanungen genutzt werden können. Somit können Einsatzkräfte effizient Einsatzplanungen vornehmen (InGeoForum und Kommission 3D-Stadtmodelle, S. 5; Mittelblöck et al.). Ein Vor- und Zurückspulen von z.B. den Videoaufnahmen einer Drohne ist nicht nötig, sondern das Modell muss nur gedreht werden, was besonders bei großen Gebäuden bzw. deren Innenraum von Vorteil ist. Entfernungen und Größen können besser abgeschätzt werden, da diese sogar direkt angegeben werden können (Zarre 2016).

Nicht zuletzt können Simulationen, wie etwa die Berechnung von Explosionsauswirkungen (Trometer und Mensinger 2014), Evakuierung (Kohler 2016) oder Brand- bzw. Rauchausbreitungen (Stock und Wallasch 2008) integriert werden. Außerdem steigt stetig die Verfügbarkeit entsprechender Technologie zur Erfassung von Objekten bzw. Umgebungen und anschließender Rekonstruktion in einem 3D-Modell und kann mit anderen Technologien, wie z.B. einer Wärmebildkamera zur Erkennung von Bränden oder Gasdetektoren, ergänzt werden.

Gegenstand und Ziel dieser Arbeit ist es, vorhandene Technologien zur Erfassung und Rekonstruktion in digitalen 3D-Modellen zu identifizieren und mittels eines technischen Experimentes darauf zu testen, ob diese für die Erkundung und Darstellung von Gebäudeinnenräumen in Notfalleinsätzen geeignet sind und somit einen Mehrwert gegenüber klassischen Erkundungsarten bieten. Diese technischen Systeme können dann im Verbund mit Drohnen oder Robotern das Innere von Gebäuden scannen und somit ein Modell der Innenräume liefern. Dadurch soll die Erkundung für Einsatzkräfte weniger gefährlich, die Lagedarstellung ergänzt bzw. übersichtlicher gestaltet und die Planung von taktischen Maßnahmen erleichtert werden. Zudem können die gewonnenen Daten aus Einsätzen für nachträgliche Schulungen verwendet werden, indem so realitätsnahe Szenarien modelliert und beispielsweise mit Virtual Reality Technik erlebt bzw. geübt werden (Ahmad et al. 2012). Auch eine nachträgliche Analyse der Daten z.B. für die Weiterentwicklung der Ausbildung und für die Forschung, wie z.B. die Untersuchung der Reaktionen von Menschen in gefährlichen Situationen ohne reale Gefährdung der erlebenden Personen, ist ein möglicher Nutzen.

Die für die Bearbeitung ausgewählte Methodik ist eine Datenerhebung für vorher definierte Beurteilungskriterien für die Geeignetheit durch das technische Experiment, dessen Ziel es ist, von technischen Systemen „[...]die funktionsnotwendigen Bedingungen zu erforschen und die Grenzen der Leistungsfähigkeit zu ermitteln“ (Herbold 2000, S. 102). Somit ist dies ein final orientiertes Verfahren, das nicht kausale Zusammenhänge ermittelt, sondern die Beziehung zwischen Ziel und Mittel untersucht. In diesem Fall die Geeignetheit, ob das Ziel mit dem Mittel erreicht werden kann. Dies kann auch als Frage nach der Zweckmäßigkeit angesehen werden (Rauner 1985, S. 20). Nach der Evaluierung auf dem Markt befindlicher Systeme hinsichtlich Technologie, Preis und Mobilität, werden verschiedene Systeme beschafft, die möglichst unterschiedliche Scan-Technologien verwenden: Laser-Scan, Fotogrammetrie und RGB-D-Kamera. In einem Versuchsszenario, das für alle Systeme identisch ist, werden die Systeme in Betrieb genommen und ein Probescan bei heller Umgebung durchgeführt. Die Systeme sollen das Labor für Großschadensereignisse der Technischen Hochschule Köln samt angrenzendem Flur und Treppenhaus abschnitten. In dem Labor befindet sich eine lebensgroße Puppe, die einen Opfer darstellen soll. Die Scan-Ergebnisse werden Testpersonen zur Auswertung vorgelegt, denen die besagten Räumlichkeiten nicht bekannt sind. Ihre Aufgabe besteht in der Interpretation des Scans bzw. der Identifizierung des Patienten und der Zugänge, wie Fenster, Türen und des Treppenhauses. Während des Scan- und Rekonstruktionsvorgangs werden zudem Handhabung bzw. Bedienbarkeit,

Aufwand bzw. nötige Infrastruktur und Schnelligkeit ermittelt. Der Datenermittlung folgt die Analyse und ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den getesteten Systemen und den Beurteilungskriterien, was Aussagen über die Geeignetheit der technischen Systeme liefert.

Die Bearbeitung dieser Arbeit erfolgt vom 20.1.2017 bis 24.3.2017 an der Technischen Hochschule Köln.

### **Gliederung der Arbeit:**

Kapitel 2 „State of the Art“ unterteilt sich in 3 Unterabschnitte, in denen jeweils der aktuelle Stand der Technik bzw. aktuelle Vorgehensweisen und Entwicklungen in der Forschung aufgezeigt werden. Als erstes wird beschrieben, welche aktuellen Techniken es in der 3D- Erfassung und Rekonstruktion von Gebäudeinnenräumen gibt, wie diese funktionieren und was aktuelle Entwicklungen, insbesondere in Mobilität durch z.B. Smartphones, Schnelligkeit und Darstellungsqualität, sind. Anschließend soll beschrieben werden wie aktuell Kräfte der Gefahrenabwehr das Innere von Gebäuden menschlich und technisch erkunden, diese danach abbilden und wo in der Gefahrenabwehr schon 3D-Modelle bzw. deren Erstellungssysteme genutzt werden oder wie sie diese in Zukunft nutzen können. Abschließend wird knapp umrissen, wie der aktuelle Forschungsstand bei der autonomen Erkundung von Gebäudeinnenräumen durch Roboter oder Drohnen aussieht, die die Techniken für die 3D-Erfassung nutzen und die erkundeten Objekte direkt 3-dimensional darstellen.

Kapitel 3 „Methodik“ beschreibt das Vorgehen zur Planung und Durchführung des technischen Experimentes. Dargestellt wird wie die notwendigen Gerätschaften und Software organisiert, wie die Beurteilungskriterien für die Geeignetheit erstellt und begründet werden, wie der Versuchsaufbau im Detail aussieht und wie die Daten für die Beurteilungskriterien genau generiert werden sollen.

Im Kapitel 4 „Ergebnisdarstellung“ werden die Ergebnisse des Experiments, wie z.B. Zeiten der Scan- und Rekonstruktionsvorgänge, detaillierte Beschreibungen der notwendigen Arbeits- bzw. Bedienungsschritte (Aufwand/Handhabung), die erstellten 3D-Modelle aller Geräte der Räumlichkeiten und die Befragungsergebnisse von Personen, die die 3D-Modelle nach Informationen sichten sollen, dargestellt.

In dem Kapitel 5 „Diskussion“ werden die Ergebnisse aus Kapitel 4 interpretiert und mit anderen wissenschaftlichen Arbeiten verglichen. Dadurch soll gezeigt werden, ob ein oder mehrere getestete Systeme für die Erkundung von Innenräumen in der Gefahrenabwehr geeignet sind. Zudem werden Probleme und Fehlerquellen bei der Durchführung des Experiments dargestellt und hinsichtlich ihres Einflusses auf das Ergebnis bewertet.

Kapitel 6 „Fazit“ rekapituliert die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit.



## Inhaltliche Eingrenzung der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich inhaltlich ausschließlich mit den technischen Systemen zu Erfassung von Umgebungen und anschließenden 3D-Rekonstruktionen von Innenräumen ohne weitere Simulationsanwendungen. Die Erkundung von Außengeländen und deren Nutzung für weitere Analysen ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Nicht betrachtet werden im Detail unbemannte Systeme, wie z.B. Drohnen, mit denen die 3D-Erfassungstechniken genutzt werden können und auch nicht ergänzende Sensoren, wie z.B. das Bioradar oder künstliche Lichtquellen für (bessere) Scanergebnisse bei Dunkelheit.

Technische Probleme bzw. Lösungsmöglichkeiten bei der Stromversorgung der Systeme oder auch die Datenübertragung an Endgeräte oder Server zur Berechnung sind ebenfalls nicht Gegenstand der Betrachtung.

Auf die Möglichkeiten der autonomen Wegfindung und simultanes Mapping durch Drohnen und Roboter wird in Kapitel 2 „State of the Art“ eingegangen und deren Möglichkeiten beschrieben. Jedoch werden diese Techniken nicht in dieser Arbeit genutzt, da nicht mit Drohnen und Robotern experimentiert werden soll und somit eine autonome Wegfindung obsolet ist.

## 2 State of the Art

Dieses Kapitel zeigt den aktuellen Stand der Technik und Forschung in Bereichen auf, die für die Bearbeitung und Erfassung dieser Arbeit vom Autor als wichtig angesehen werden.

### 2.1 Techniken der 3D Erfassung, Rekonstruktion und Darstellung

#### 3D-Laserscanner

Die meisten Laserscanner funktionieren nach den Impulsmessverfahren (Time-Of-Flight-Prinzip). Bei dieser Methode werden mehrere Laserpunkte in einem bestimmten Winkel gepulst ausgestrahlt. Die Zeit von der Emittierung der Laserstrahlen bis zu der Rückkehr zu einem Sensor wird erfasst. Da die Lichtgeschwindigkeit in Luft bekannt ist, kann somit der Abstand von einem Objekt, das den Strahl reflektiert, ausgerechnet werden. Dieser Abstand wird in Form eines Punktes in ein 3-dimensionales Koordinatensystem aufgetragen. Mehrere dieser Punkte ergeben eine sogenannte Punktwolke, durch die, bei genügender Anzahl von Punkten, Objekte 3-dimensional erkennbar werden. Zusätzlich zu dieser Messung werden oft noch Farbaufnahmen in Rot, Grün und Blau (RGB) gemacht. Die Farbpixel dieser Aufnahmen werden den Punkten der Punktwolke zugeordnet und diese eingefärbt. Dadurch kann in kurzer Zeit oder auch in Echt-

zeit eine sehr gute 3D-Rekonstruktion des gescannten Objektes oder der Umgebung geliefert werden. (Large und Heritage 2009; Axelsson 1999)

Die zweite Methode ist das Phasenvergleichsverfahren. Auch hier werden Laserstrahlen gepulst emittiert. Jedoch weisen diese unterschiedliche Wellenlängen auf. Trifft der Laserstrahl auf ein Objekt, so ändert sich die Phase des Laserstrahls und ist somit ungleich der Phase bei der Ausstrahlung. Durch diese Phasendifferenz kann der Abstand zum reflektierenden Objekt berechnet werden. Dieses Verfahren ist zwar komplizierter als das Impulsmessverfahren, jedoch bietet es eine höhere Genauigkeit, eine höhere Reichweite und es liefert schneller Ergebnisse. (Hirtl 2009, S. 10–11; Laserscanning Europe 2017)

Die resultierenden Punktwolken können weiterverarbeitet und beispielsweise in einem modernen CAD-Programm dargestellt werden, wo sie z.B. für diverse Simulationen genutzt werden können (Höfer & Bechtel GmbH 2012, S. 4–6).

### Fotogrammetrie

Mit Fotogrammetrie werden Verfahren bezeichnet, mit der 3D-Modelle mittels Algorithmen nur aus Fotos erstellt werden. Um dies zu ermöglichen, muss eine Vielzahl an Bildern aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen werden und das in möglichst guter Qualität.

Der Arbeitsablauf in der Fotogrammetrie sieht folgendermaßen aus: Fotos aus verschiedenen Blickwinkeln aufnehmen, Berechnung der Kameraparameter für jedes einzelne Bild, Rekonstruktion einer dichten 3D-Geometrie aus den Informationen der Bilder und der Kameraparameter (Furukawa und Hernández 2013, S. 3–5).

Die Berechnung der Kameraparameter und Rekonstruktion erfolgt beispielsweise durch die „Structure from Motion“-Technik, bei der korrespondierende Punkte innerhalb der Einzelfotos gefunden, Kamerapositionen ermittelt und die Punkte in einer 3D-Punktwolke dargestellt werden. Als erster Schritt in der „Structure from Motion“-Technik werden potentiell wiedererkennbare, 2-dimensionale Punkte in den Einzelfotos ermittelt. Finden sich Punkte, die auf verschiedenen Fotos gleich sind, so werden diese miteinander verbunden. Abschließend erfolgt mit diesen Informationen die Berechnung der Kamerapositionen und der Positionen der Punkte in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem. (Furukawa und Hernández 2013, S. 10–12)

Früher und auch noch heute wurde bzw. wird diese Technik für die Erstellung von topografischen Bildern genutzt. Durch die Weiterentwicklung der verschiedenen Algorithmen und das Zugänglichmachen für die breite Masse durch immer mehr Softwaretools, wird die Darstellungsqualität und dadurch der Nutzen solcher 3D-Darstellungen aus Fotos immer mehr gesteigert. (Seitz et al. 2006; Stumpf et al. 2015)

### Structured Light

Ein Projektor projiziert ein Gittermuster oder verschiedene andere Strukturen auf ein Objekt und eine Kamera mit fester Position nimmt dieses Bild auf. Durch das Tiefenpro-

fil des Objektes wird das Muster oder die Linien verzerrt. Da das Muster und die Anordnung der Linien bekannt ist, können durch die Verzerrung des Musters oder durch den Versatz der Linien alle Koordinaten eines 3-dimensionalen Systems, also Höhe, Tiefe und Breite, ermittelt werden. (Hering und Schönfelder 2012, S. 305–309)

Diese Koordinaten können anschließend durch mathematische Modelle in Punktwolken transformiert werden. Die Punktwolken haben die Vorteile, dass diese flexibel eingesetzt, Maße ausgelesen und, wie schon erwähnt, in CAD-Programmen eingepflegt werden können (Peng und Gupta 2007).

Scharstein und Szeliski (2003) nutzten Structured Light für die Verbesserung der Ergebnisse der Fotogrammetrie. Es wurden Fotoaufnahmen aus zwei Blickwinkeln mit und ohne Strukturmuster aufgenommen. Durch diese Vorgehensweise soll die automatische Registrierung von Tiefeninformationen zu den einzelnen Bildpixeln und das Finden gleicher Bildpixel in verschiedenen Aufnahmen verbessert werden und somit zu präziseren 3D Rekonstruktionen führen.

### RGB-D-Kamera

Eine sogenannte RGB-D-Kamera, wie beispielsweise die Microsoft Kinect, besteht meist aus drei Komponenten: Eine RGB-Farbkamera, ein Infrarot-Projektor und eine Infrarot-Kamera. Das D steht für Depth, was bedeutet, dass die Kamera neben der normalen Farbaufnahme auch Tiefeninformationen (anders gesagt: Distanzen zu anderen Objekten) aufnimmt. Der Infrarotprojektor projiziert auf die Umgebung ein spezielles Punktmuster. Dem System ist bekannt wie weit ein Objekt entfernt ist, je nachdem in was für einer Größe und in welcher Position ein Muster von der Infrarotkamera aufgenommen wird. Mit diesen Informationen kann per Triangulation ein 2-dimensionales Tiefenbild erstellt werden. In diesem Tiefenbild werden unterschiedliche Entfernungen in unterschiedlichen Graufärbungen dargestellt. (Zhang 2012)

Programme, wie das von Microsoft selbst zur Verfügung gestellte KinectFusion, ermöglichen es mit diesen Informationen in Echtzeit 3D-Rekonstruktionen zu erstellen. Diese Programme transformieren das 2-dimensionale Tiefenbild in eine 3-dimensionale Punktwolke und berechnen die jeweilige Position der Kamera während der Aufnahme. Die Pixel der Farbbilder, die simultan mit der RGB-Kamera aufgenommen werden, werden den Punkten der Punktwolke zugeordnet. Somit können die Punkte der Punktwolke entsprechend eingefärbt werden und liefern schon eine erkennbare 3D-Rekonstruktion. Anschließend können diese Punkte noch durch ein Gitternetz (Mesh) verbunden werden, was eine dichte Oberfläche entstehen lässt. (Newcombe et al. 2011; Litomisky 2012; Popescu Raluca und Lungu 2014)

Die Technologie der RGB-D-Kameras wird ständig weiterentwickelt. So soll beispielsweise die Qualität der 3D-Rekonstruktion erhöht und gleichzeitig die Schnelligkeit verbessert werden, indem z.B. die Berechnungen online stattfinden, also mehr Rechenkapazität zur Verfügung steht (Dai et al. 2016).

Pan et al. (2016) beschäftigten sich mit der Aufhebung des 40cm Mindestabstand (Pan et al. 2016, S. 644) des Kinect Sensors. Denn mit dieser Limitierung können keine Details von nahen Objekten aufgenommen werden. Sie nutzten als Lösung eine Kombination aus Tiefenbildern des Kinect Sensors für weite Entfernungen und die „Structure from Motion“ Technik aus der Fotogrammetrie für nahe Objekte.

Eine weitere Beschränkung des Kinect Sensors bzw. von KinectFusion ist, dass nur eine Umgebung von begrenzter Größe aufgenommen werden kann. Eine Lösung besteht darin, nicht die einzelne Aufnahmekapazität zu erhöhen, sondern kleinere Gebiete separat zu scannen und diese dann durch optimierte Berechnungsmethoden aneinander zu fügen, wodurch ein großes 3D-Modell entsteht. (Thomas und Sugimoto 2016)

Anzumerken ist, dass die Generierung von Tiefeninformationen nicht nur durch die Technik mit Infrarotkameras möglich ist, sondern auch mit dem im Rahmen der Laserscanner erörterten Impulsmessverfahrens.

### Smartphones/Tablets

Heutzutage sind nicht mehr zwingend gesonderte Sensoren bzw. Scanner nötig, um 3D-Rekonstruktionen zu erstellen. Heutzutage ist es möglich Smartphones oder Tablets direkt dazu zu nutzen, diese technisch zu erweitern oder spezielle Smartphones zu kaufen, die eine solche Technologie von Werk aus eingebaut haben.

Eine Möglichkeit ist, Apps, wie beispielsweise „123D Catch“, auf einem Smartphone zu installieren, die durch Fotogrammetrie aus Fotos 3D-Modelle erzeugen und keinerlei weitere Fachkenntnisse erfordern (Autodesk 2016a). Dies ist z.B. auch mit Drohnen möglich, die im Freien automatisch GPS-Koordinaten abfliegen, Fotos machen und diese Fotos dann durch eine Software umgewandelt werden (FliteTest 2016).

Ein anderer Ansatz ist, die Farbkamera eines Smartphones zu nutzen, um 3D-Rekonstruktionen in Echtzeit zu erstellen. Für die Erstellung des nötigen Tiefenbildes wird dafür das jeweilige aktuelle Bild mit Referenzbildern verglichen, die durch die Aufnahme selbst und einen dahinterstehenden Algorithmus generiert werden. Durch einen Block-Matching-Algorithmus werden dann die Tiefeninformationen errechnet, womit eine weitere Bearbeitung ermöglicht wird. (Ondruska et al. 2015)

Der Structure Sensor von Occipital ist ein Beispiel für eine technische Erweiterung von Tablets, die dazu dient, Tablets zu 3D-Aufnahmen zu befähigen. Dahinter steckt eine ähnliche Technologie wie die des Kinect Sensors, um die Tiefe der Umgebung zu erfassen. Zusätzlich zum Sensor wird die Kamera des Tablets genutzt, um so einen Tiefe-pro-Pixel Datenstrom zu erzeugen, wie es auch der Kinect Sensor mit KinectFusion macht. Somit wird ein Tablet mit dieser Erweiterung zu einer RGB-D-Kamera, nur in kompakterer Bauweise und mit Kompatibilität mit der Hard- und Software von mobilen Endgeräten. (Occipital 2014)

Die Tango-Technologie von Google ist ebenfalls eine RGB-D-Kamera, die Tiefeninformationen durch Infrarotsensoren generiert (Kalyan et al. 2016). In Kombinationen mit anderen Sensoren eines Smartphones, wie z.B. die Bewegungssensoren, können Um-

gebungen gescannt, diese rekonstruiert und durch beispielsweise Virtual Reality dreidimensional vermittelt werden (Sra et al. 2016). Eine weitere Anwendung ist die Augmented Reality, mit der es z.B. möglich ist, Möbelstücke in einem Raum zu testen, ohne sie kaufen und dort aufstellen zu müssen (Elgan 2016; Google 2017). Zur Zeit ist das Lenovo Phab 2 Pro noch das einzige verfügbare Smartphone mit der Tango-Technologie (Lenovo 2016). Dadurch, dass das System für Entwickler für die Erstellung von Eigenentwicklungen offen ist, werden momentan unter anderem neue Methoden entwickelt, um mit Tango auch große Umgebungen (wie eine ganze Häuserreihe) zu scannen. (Schöps et al. 2016)

### Image Based Rendering

3D-Rekonstruktionen leiden meist daran, dass die Darstellung trotz aller neuen Technologie nicht so gut und detailliert ist, wie Fotografien. Das Image Based Rendering greift diese Problematik auf und verbindet, wie bei Hedman et al. (2016), ein Tiefenbild einer RGB-D-Kamera mit hochauflösende Fotografien.

Dabei wird, meist durch sogenanntes Forward Mapping, dem Betrachter die je nach Blickwinkel passenden Pixel aus den Fotografien auf eine 3D-Punktewolke gelegt (Kang et al. 2006, S. 215–218). Somit werden hochauflösende 3D Rekonstruktionen ermöglicht, die bessere Kantendarstellungen, Details in der 2D Ebene, wie beispielsweise Texturen, Darstellungen von Beleuchtungen und Berechnungen neuer Blickpunkte, die von denen der Fotografien abweichen, liefern (Kang et al. 2006, S. 173–174).

## 2.2 Erkundung, Lagedarstellung und Verwendung von Technologien der 3D-Erfassung, Rekonstruktion und Darstellung in der Gefahrenabwehr

### Erkundung von Gebäuden durch die Gefahrenabwehr (ohne 3D Anwendungen)

Einsatzkräfte der Feuerwehr oder auch des Technischen Hilfswerks erkunden bei einem Einsatz Gebäude meist durch die sogenannten 4 Phasen der Erkundung, die durch die Einsatzkräfte (meist durch den Einsatzleiter oder durch Erkunder) selbst vorgenommen werden. Diese Erkundung läuft nach folgendem Schema ab (Staatliche Feuerweherschule Würzburg 2008):

- Frontalansicht: Betrachtung der Front des Gebäudes, also die Seite, an der die Feuerwehrkräfte eintreffen. Die Schäden, Brände, Gefahrstoffe usw. sollen dabei erfasst werden.
- Befragung von Personen: Hierbei werden Zeugen danach befragt, was passiert ist, wo es genau passiert ist, wer bzw. wie viele Personen betroffen sind und wo sich Zugangswege in das Gebäude befinden.
- Innenansicht: Betrachtung der Situation im Inneren durch den Eingangsbereich oder Treppenträume, wobei erneut auf weitere Gefahren und Zugänge geachtet wird.

- Gesamtübersicht: Es erfolgt eine detaillierte Erkundung. Diese wird z.B. durch Angriffstrupps der Feuerwehr vorgenommen (Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung 2008).

Innerhalb von großen Gebäuden verläuft die Orientierung meist durch Zuhilfenahme von Laufkarten einer Brandmeldeanlage. Diese dienen dazu, den schnellsten Weg von der Anlage bis zu den ausgelösten Brandmeldern zu finden. Dieser Weg wird durch einen grünen Pfeil angezeigt. Zusätzlich zu diesem Weg ist auf den Plänen noch die Nutzungsart der jeweiligen Räume, Treppen, Türen, Melder, die Gebäudebezeichnung, die Geschossbezeichnung niedergeschrieben und ggfs. sich in den Räumen befindliche Gefahrenstoffe, die die Einsatzkräfte gefährden könnten. (DIN 14675) Diese Pläne sind jedoch nur dort zu finden, wo auch eine Brandmeldeanlage verbaut ist. Zudem zeigen diese nicht den Schadensumfang, sondern nur den Zustand des Gebäudes vor dem Schadenseintritt.

Eine andere Möglichkeit von Plänen zur Orientierung sind Feuerwehrpläne. Hierbei handelt es sich um Pläne, die für den Einsatz in besonderen Gebäuden oder Umgebungen angefertigt wurden, damit der Einsatz effektiver und gefahrloser abläuft. Auf diesen Plänen wird 2-dimensional das komplette Gebäude mit Lage, die Geschosse, die jeweils nochmal auf gesonderten Plänen detailliert dargestellt sind, und Umgebungsdetails dargestellt. Darauf zu finden sind weitere Informationen, wie die Nutzungsart von Räumen, Gefahrenquellen, Zugangswege und Standorte von Einrichtungen für Lösch- bzw. Rettungsmaßnahmen, wie beispielsweise Einspeisemöglichkeiten in Steigleitungen, Absperrmöglichkeiten für Gas, Sammelbereiche und alles, was noch an Informationen für einen Einsatz zur Brandbekämpfung oder Rettungsmaßnahme nötig ist. (DIN 14095) Diese Pläne sind also detaillierter als Laufkarten. Dennoch bieten auch diese Pläne kein Bild der aktuellen Schadenslage. Wie bei den Laufkarten gibt es auch diese Pläne nicht für jedes Gebäude, sondern meist nur, wo es vom Gesetzgeber gefordert wird, wie z.B. bei Sonderbauten (Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr Nordrhein-Westfalen 2016).

Eine technische Lösung, die schon heute bei Feuerwehren häufig in der Erkundung eingesetzt wird, ist die Wärmebildkamera, die es ermöglicht Brandherde oder auch Personen leichter zu entdecken (BrandSchutz/Deutsche Feuerwehrzeitung 2015, S. 181–184). Diese nutzen die Tatsache, dass Oberflächen mit unterschiedlichen Temperaturen unterschiedlich intensive Strahlungen emittieren, die von Detektoren gemessen werden können (Wagner 2011, S. 18). Eine Wärmebildkamera nutzt eine Matrix an Detektoren, die die Strahlungen in elektronische Impulse umwandeln, die dann so verarbeitet werden, dass auf einem Bildschirm die Temperaturwerte in unterschiedlichen Farben visualisiert werden (Wagner 2011, S. 18–21). Das Problem liegt hier jedoch bei dem 2-dimensionalen Sehen, was es erschwert, dass z.B. Entfernungen eingeschätzt werden können (Keller et al. 2012, S. 23).

Auch in der Erkundung von Gebäuden durch unbemannte Systeme, wie Robotern, werden mehr und mehr Fortschritte erzielt, so dass diese zum Teil bereits genutzt wer-

den. So bietet beispielweise die Firma Taurob einen ferngesteuerten Roboter an, der Video- und Wärmebildaufnahmen liefert, vor gefährlichen Gasen und Chemikalien geschützt ist und Gaskonzentrationen messen kann (Taurob GmbH 2016).

In dem Forschungsvorhaben „Intelligentes, sicherndes Lokalisierungssystem für die Rettung und Bergung von Verschütteten (I-LOV)“ wurde ein Erkundungsroboter entwickelt, der autonom oder per Fernsteuerung Verschüttete in Trümmern suchen soll. Dafür wurde er mit Kameras, einer Wärmebildkamera, Ultraschallsensoren und CO<sub>2</sub>-Messern, die die Ausatemluft von Menschen detektieren sollen, ausgestattet. Damit der Roboter auch Treppen erklimmen und Trümmer überwinden kann, ist er so konzipiert, dass mehrere Module hintereinandergeschaltet werden und somit eine Schlangenform bilden. (Hamp et al. 2012)

Liu et al. (2015) evaluierten Roboter, die zur Erkundung in gefährlichen Umgebungen eingesetzt werden. So wurde der „Letterbot“ dazu entwickelt, Gebäude zu erkunden, ohne dass Schäden, wie beispielsweise das Einschlagen von Scheiben, in Kauf genommen werden müssen, da dieser einfach durch den Briefschlitz in Türen geschoben werden kann und diese längliche Form auch dafür nutzt, Treppen einfach zu überfahren (Liu et al. 2015, S. 43–44).

Der Roboter von AlHaza et al. (2015) wurde so konzipiert, dass er Temperaturen von über 700°C aushält. Neben den Funktionen der schon genannten Roboter, kann dieser Kontakt zu Opfern via Audio- und Videoübertragung herstellen und außerdem Gasmasken oder Sauerstoff zu eingeschlossenen Personen transportieren.

Roboter sind auch in der Lage, Brände in Innenräumen automatisch zu erkennen und zu löschen. Zunächst werden diese via Bluetooth in das Gebäude gesteuert, wobei Ultraschallsensoren zur Kollisionsvermeidung den Bediener unterstützen. Flammensensoren detektieren durch die Wellenlänge des Lichts das Feuer. Ist dies der Fall, so fährt der Roboter automatisch zu der erkannten Stelle und löscht die Flammen mit einem eingebauten Feuerlöscher. (Vivekandan et al. 2016)

Nach der Erkundung ist eine hinreichende Dokumentation der erfassten Daten und eine adäquate Lagedarstellung unabdingbar. In Nordrhein-Westfalen existiert dafür das „Lagedarstellungssystem NRW“, das vom Institut der Feuerwehr NRW veröffentlicht wurde. Dieses ist ein einheitliches System für die Lagedarstellung und Dokumentation, das sich in drei Ebenen gliedert: Das Taktische Arbeitsblatt für das Führen ohne Führungseinheit, die Taktische Arbeitstafel für das Führen mit Führungseinheit und die Taktische Arbeitswand für das Führen mit einem Stab. Vorgesehen ist dabei das händische Aufschreiben des Lagebilds. Für die Lagedarstellung können Zeichnungen angefertigt oder Karten bearbeitet werden und eine Übersicht der eingesetzten Kräfte, bedrohte Objekte oder von Nachforderungen etc. geführt werden. Das System ist als eine Art Gedankenstütze zu verstehen, das den Führungsvorgang für die Führungspersonen erleichtern soll, damit keine wichtigen Maßnahmen vergessen werden und das Wesentliche nicht aus dem Blick verloren geht. (Institut der Feuerwehr NRW 2015)

Als Alternative für die handgeschriebene Dokumentation und Lagedarstellung kommen immer mehr Softwarelösungen auf den Markt, die das Einsatzmanagement optimieren sollen. Diese stellen interaktive Lagekarten, z.B. aus Online-Kartenmaterial, Geoinformationssystemen oder Luftaufnahmen bereit, die gezoomt und beliebig gedreht werden können und das Einzeichnen von Informationen ermöglichen. So können beispielsweise die eingesetzten Kräfte mit Stärke und Position durch taktische Zeichen dargestellt werden. Zudem ist das Einbinden von digitalen Feuerwehrplänen und Fotos bzw. Videoaufnahmen möglich. (Fireboard GmbH 2016; Rosenbauer International AG 2015)

### Verwendung von 3D-Modellen in der Gefahrenabwehr

Neben den schon in der Einleitung erwähnten Anwendungen von 3D-Modellen für die Evakuierungsplanungen, Simulationen von Hochwasser, Detonationsauswirkungen etc. werden physische 3D-Modelle für Planspiele genutzt, um Einsätze zu üben und beispielsweise Veranstaltungen zu planen. Diese physischen Modelle bieten die Vorteile von besserer Anschauung und Erkennung von besonderen örtlichen Begebenheiten und besserer Erfassung der Lage durch die Vogelperspektive bzw. das Einnehmen von neuen Perspektiven. (Thelen und Gullotta 2014)

In einem Forschungsvorhaben von Zlatanova und Vosselman (2015) soll erforscht werden, ob es sinnvoll ist, 2-dimensionale Pläne, wie die Feuerwehrpläne, durch 3D-Modelle der Innenräume zu ersetzen. Dies wird untersucht, da auch dieses Forscherteam den Vorteil der besseren Wegfindung sieht und die Modelle es möglich machen, eine Wegfindung durch Algorithmen zu automatisieren. Die Modelle sollen so bereitgestellt werden, dass diese auf Smartphones oder Tablets betrachtet werden können.

3DNSITE ist eine webbasierte Anwendung zur Darstellung einer Lage für das Krisenmanagement. In dieser Anwendung werden 3-dimensionale Ansichten aus drei unterschiedlichen Datenquellen generiert. Die Datenquellen sind eine 3D-Punktwolke (Generierung durch einen Laserscanner), Fotos mit Informationen zu dem jeweiligen Blickwinkel und die Kameraparameter. Diese Daten werden vor Ort gesammelt. Die Einsatzkräfte können dann mit einem Tablet durch die Szenerie, die zunächst als Punktwolke dargestellt wird, navigieren und je nach Blickwinkel wird dann das passende Foto an der richtigen Stelle und in richtiger Größe angezeigt. (Giovanni Pintore et al. 2012)

Die Projekte INDIGO bzw. die Weiterentwicklung VASCO wurden ursprünglich für das strategische Trainieren von Personen des Krisenmanagements entwickelt. Jedoch können diese Programme auch als Unterstützung bei Entscheidungsfindungen und Planungen von Einsätzen dienen. Auf digitalen Tafeln oder Tablets werden 2- und 3-dimensionale Karten von Außengeländen dargestellt, die mit statistischen Informationen, Bildern aus dem Einsatzgebiet, Infrastrukturdaten, Außenansichten von Gebäuden etc. ergänzt werden. Diese Daten können stetig und schnell durch beispielsweise neue Sensordaten oder Bildern aktualisiert werden. Dafür nutzt INDIGO auch die Technik von 3DNSITE (Ahmad et al. 2012, S. 5). Die Weiterentwicklung VASCO möchte dieses Konzept soweit transformieren, dass Kräfte der taktischen und operativen Ebene Informationen austauschen können und somit nicht nur die taktische Ebene einen Nutzen



des Systems hat, sondern auch Kräfte vor Ort diese Informationen nutzen können. Dies soll auch durch das schnelle Erstellen von präzisen 3D-Modellen von Gebäudeinnenräumen und Außenansichten geschehen. Für das Erstellen von 3D-Innenansichten möchte man die Technik von Google Tango nutzen. (Boin et al.)

Tully et al. (2015) kombinieren aktuelle Light detection and ranging (LIDAR) Daten, die von Flugzeugen gemacht werden, mit Kartenmaterial aus OpenStreetMap und der britischen Behörde Ordnance Survey. Mit diesen Daten wird eine 3D-Karte in einer Spiele- bzw. Grafik-Engine erstellt, die für eine bessere Planung im Krisenmanagement sorgen soll. Durch die aktuellen LIDAR-Daten sind die Karten sehr aktuell und in der 3D-Umgebungen können beispielsweise Flutauswirkungen besser abgeschätzt oder gar simuliert werden. Zudem können Infrastrukturen, wie etwa Stromleitungen, besser erkannt werden, als es in 2D-Karten möglich ist.

Auch das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum hat erkannt, dass Einsatzkräfte möglichst schnell umfassende Lageinformationen brauchen. Dafür wurde dort ein optisches Kamerasystem entwickelt, das an Flugzeugen oder Hubschraubern angebracht wird und dann hochauflösende 3D-Geländemodelle liefert, welche schon während des Überfliegens des Geländes bereitstehen und genutzt werden können. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2016)

In der Arbeit der Polizei und Forensik werden schon seit mehreren Jahren 3D-Scanner eingesetzt. Aufgenommen werden damit Unfallszenarien und Tatorte von beispielsweise Mordfällen, um Spuren zu sichern. Diese Scanner sind so hochauflösend, dass neben herumliegenden Gegenständen, Opfern, Unfallschäden, Konstellationen von Unfallautos, auch Blutspuren analysiert werden können. (Arnold und Braun 2007; Holowko et al. 2016)

### 2.3 Autonome Erkundung und 3D-Mapping bzw. Darstellung von Gebäudeinnenräumen durch Roboter und Drohnen

Roboter und Drohnen werden mehr und mehr in die Lage versetzt, sich autonom in Innenräumen zu orientieren und sich darin zu bewegen. Ist die Umgebung völlig unbekannt, also ist keinerlei Kartenmaterial bzw. GPS vorhanden an denen sich der Roboter oder die Drohne orientieren kann, so spricht man von der „Simultaneous Localization an Mapping“ (SLAM) - Problematik, bei der der Roboter oder die Drohne sich eine eigene Karte über Sensoren erstellt und sich gleichzeitig an dieser erstellten Karte im Raum orientiert (Chong et al. 2015, S. 174). Sensoren, die meist für diese Problematik genutzt werden, sind Systeme, die teilweise schon in Abschnitt 2.1 vorgestellt wurden. Dabei werden Laserscanner, Fotogrammetrie und RGB-D-Kameras eingesetzt, aber auch akustische Sensoren wie Sonar (Chong et al. 2015, S. 175–178).

So haben beispielsweise Faessler et al. (2016) einen Quadrocopter entwickelt, der autonom Such- und Rettungsmaßnahmen unterstützen soll. Dieser arbeitet rein mit visuellen Daten und liefert an den Operator in Echtzeit ein dichtes 3D-Modell der Umgebung,

die von der Drohne völlig autonom abgeflogen wird. So ist hier nicht nur der Vorteil der autonomen Erkundung gegeben, sondern auch die Lieferung von 3D-Modellen, die auch durch andere Sensoren, wie z.B. von einer Kinect RGB-D-Kamera, geliefert werden können (Lai und Su 2016, S. 2).

Auch Jianhao et al. (2015) haben untersucht, ob Roboter effizient und autonom unbekannte Umgebungen erkunden können. Gleichzeitig soll auch eine 3-dimensionale Karte von dem Roboter geliefert werden, damit weitere Planungen durchgeführt werden können. Diese Forschergruppe hat einen Microsoft Kinect Sensor genutzt, da dieser in Relation sehr preiswert ist.

Ein Problem bei autonomer Erkundung durch unbemannte Systeme ist zurzeit noch, dass dies relativ viel Zeit in Anspruch nimmt und es somit Probleme bei größeren Gebäuden gibt. Dies kann dadurch gelöst werden, dass mehrere Roboter gleichzeitig eingesetzt werden, die miteinander kommunizieren oder gar als Schwarm agieren können. Werden diese an verschiedenen Punkten des Gebäudes abgesetzt und aktiviert, wird die Zeit der gesamten Erkundung erheblich verkürzt. (Wang et al. 2016; Kulich et al. 2015)

### 3 Methodik

Die ausgewählte Methodik dieser Arbeit ist das technische Experiment, welches dazu geeignet ist, Daten durch Versuche zu generieren. Diese Daten dienen zur Beurteilung der Geeignetheit durch vorher definierte Beurteilungskriterien. Da es in dem Kontext der Gefahrenabwehr noch keine Literatur oder Erfahrungsberichte zur 3-dimensionalen Erkundung gibt bzw. diese einen anderen Schwerpunkt haben, wie z.B. autonome Erkundung, ist eine Literaturstudie nicht zielführend, weshalb eine eigene Datengenerierung notwendig ist. Durch das Experiment werden aktiv Daten und Erfahrungen (Eifler 2014, S. 195) gesammelt.

Trotz der Kategorie des technischen Experimentes, welches im Gegensatz zu dem naturwissenschaftlichen Experiment oder dem statistischen Experiment die Beziehung zwischen Zweck und Mittel oder anders gesagt die Zweckmäßigkeit (in dieser Arbeit als Geeignetheit definiert) eines Mittels (Rauner 1985, S. 20) untersucht, wird dennoch die Versuchsplanung angelehnt an das Vorgehen der statistischen Versuchsplanung und die Grundaktivitäten des Experiments an wissenschaftliche Definitionen (siehe dazu Abschnitt 3.2). Die Auswertung erfolgt nicht statistisch, sondern vergleichend mit vorher festgelegten Referenzwerten für die Beurteilungskriterien.

Nachteil dieser Methode ist der hohe Zeitaufwand und die dadurch mangelnde Möglichkeit alle Geräte und Software auf dem Markt zu untersuchen, da dies den Zeitrahmen der Bearbeitung sprengen würde. Außerdem stehen nicht alle Geräte für die Versuche zur Verfügung.

Die Geeignetheit wird für jede Hard- und Softwarekombination ermittelt. Das bedeutet, dass zu jeder Scan-Technologie mindestens eine Software gehört, die entweder den Scanvorgang mit der Hardware vornimmt und/oder die Nachbearbeitung der Scandaten übernimmt.

In Abschnitt 3.1 werden die Beurteilungskriterien für die Beurteilung der Geeignetheit zur Erkundung in der Gefahrenabwehr aufgezeigt und erläutert, warum diese eine wichtige Rolle spielen. Für diese Beurteilungskriterien werden die nötigen Daten angegeben, die mit den Versuchen ermittelt werden sollen. Anschließend werden begründete Referenzwerte zu jedem Kriterium angegeben, um die Daten aus den Versuchen und Recherchen adäquat vergleichen zu können.

In Abschnitt 3.2 wird erläutert, wie der Aufbau des Experiments aussieht. Dazu gehört das Vorgehen der Beschaffung und Kurzbeschreibung der Geräte/Software, die in den Versuchen getestet werden, in Unterabschnitt 3.2.1. Unterabschnitt 3.2.2 beschreibt die Versuchsvorbereitung bzw. Planung. Dazu kommt noch eine Beschreibung der Methodik zur Ermittlung der Zielgrößen, die für die Beurteilungskriterien wichtig sind. In dem Unterabschnitt 3.2.3 wird erläutert, wie die einzelnen Versuche jeweils ablaufen sollen und durchgeführt werden. Dazu zählen auch spezifische Aufbauten, die für eine ordentliche Durchführung der Versuche mit dem jeweiligen System notwendig sind und die Art der Dokumentation.

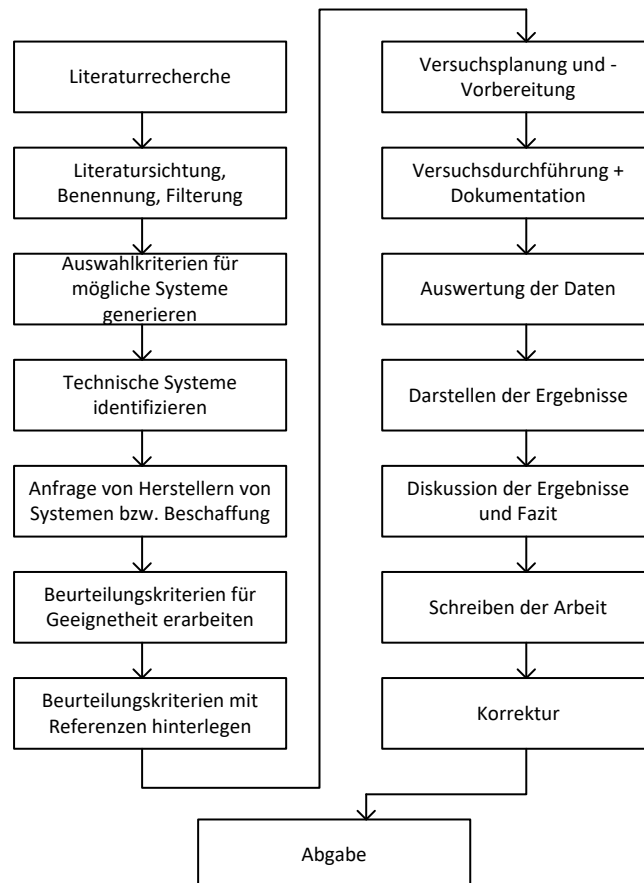


Abbildung 1: Workflow des Projektes

### 3.1 Identifizierung von Beurteilungskriterien für die Geeignetheit der Systeme

Für die Beurteilung der Geeignetheit eines Gerätes bzw. der Kombination aus Hard- und Software, sollten diese möglichst alle nachfolgenden Kriterien erfüllen. Das Kriterium „Qualität der Darstellung“ nimmt eine Sonderstellung ein, da dieses Kriterium zwingend erfüllt werden muss (Begründung siehe unten).

#### Zeit bis zu einer 3D-Darstellung

Um verletzte oder gefährdete Personen möglichst schnell zu bergen und zu behandeln bzw. aus dem Gefahrenbereich zu bringen, ist eine möglichst schnelle Ortung der Personen und die Gewinnung aller relevanten Informationen, wie z.B. die Laufstrecke, erforderlich. Somit sollte die Erkundung so wenig Zeit wie möglich in Anspruch nehmen.

Für die Ermittlung dieses Kriteriums werden während der Versuchsdurchführung zwei Zeiten genommen, die zusammen die Beurteilungszeit ergeben:

- Zeit des Scanvorganges bzw. der Erstellung von Fotos
- Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung

Als Referenzzeit wird folgender Wert angenommen: 108 Minuten.

Die Begründung für die Referenzzeit ist wie folgt: Bei einer verletzten und zu findenden Person wird eine massive Blutung angenommen, bei der nach Definition innerhalb von 3 Stunden 50% des zirkulierenden Blutvolumens verloren geht (Grottke et al. 2013, S. 147). Ein erwachsener Mann (80 kg) hat ein ungefähres Blutvolumen von 6000ml (Eichler 2011). Dies macht 16,6 ml pro Minute an Blutverlust bei einer massiven Blutung. Ein kritischer Blutverlust herrscht ab 30-40% des gesamten Blutvolumens (Striebel 2015, S. 162). Wird der Wert des kritischen Blutverlustes mit 30% angenommen, so ergibt sich dafür ein Volumenwert von 1800ml. Dieses Volumen wäre bei einer Blutung mit 16,6 ml pro Minute in 1,8 Stunden (=108 min) aus dem Körper getreten.

#### Leichte Bedienbarkeit

Rettungseinsätze bzw. alle Einsätze der Gefahrenabwehr sind mit hohem Stress verbunden. Dies hat zur Folge, dass Erlerntes schwerer aktiv abzurufen ist und das Handeln durch das Unterbewusstsein automatisiert wird. Damit dennoch die Bedienung eines technischen Gerätes adäquat erfolgen kann, müssen die Bedienungsschritte entweder exzessiv geübt werden oder die Bedienung sollte selbsterklärend sein und mit möglichst wenigen Handgriffen erledigt werden können. (BrandSchutz/Deutsche Feuerwehrzeitung 2015, S. 211)

Für die Ermittlung dieses Kriteriums werden während der Versuchsdurchführung folgende Werte ermittelt:

- Bedienungsschritte des Scanvorgangs (Ab Beginn der Erfassung)
- Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware

Als Referenzwert wird folgender Wert angenommen: 4 Bedienungsschritte

Die Begründung für den Referenzwert ist wie folgt: Als Vergleich wird die Bedienung einer Wärmebildkamera herangezogen, da diese ein bildgebendes Gerät ist, was z.B. bei Feuerwehren für Erkundungen angewendet wird (BrandSchutz/Deutsche Feuerwehrzeitung 2015, S. 181). Die Bedienungsschritte (ohne größere Änderungen der Einstellungen und von Beginn der Aufnahme bis Sichtung an einem Computer) der Wärmebildkamera FLIR Kx5 sind: Ausrichten der Kamera, Kameramodus wählen, Taste für Speicherung des Bildes betätigen, Anschluss Kamera an Computer (FLIR Systems 2016, S. 14).

#### Günstig in der Beschaffung

Beschaffungen von Geräten durch beispielsweise Feuerwehren sind von dem Haushalt der entsprechenden Kommune oder Stadt abhängig. So wurden beispielsweise im Jahr 2014 in Köln 79.974 Euro für technische Geräte im Bereich Brandschutz ausgegeben und für 2017 sind Ausgaben von 190.000 Euro geplant (Stadt Köln 2016, S. 205). Dementsprechend sollte der Preis für ein neues Gerät möglichst niedrig sein, damit diese durch den vorhandenen bzw. geplanten Haushalt beschafft werden können.

Es werden jeweils die Kosten für die einzelnen technischen Geräte durch Recherchen ermittelt.

Als Referenzwert wird folgender Wert angenommen: 11.500 Euro

Die Begründung für den Referenzwert ist wie folgt: Auch hier wird als Vergleich eine Wärmebildkamera herangezogen, die, wie schon erwähnt, ein bildgebendes Gerät im Einsatz bei Feuerwehren ist. Somit wird davon ausgegangen, dass der Preis einer Wärmebildkamera, bei gegebenem Nutzen, ein Preis ist, den die Gefahrenabwehr bereit ist zu zahlen. Herangezogen wird der Preis der Wärmebildkamera Argus 4 von der Firma Rosenbauer, der 11.497,50 Euro beträgt (Domeyer GmbH & Co. KG 2017).

#### Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung

Um den Anforderungen, wie etwa Planung von Angriffs- und Evakuierungswegen oder Erkennen von Gefahren und Personen/Opfern (siehe Kapitel 1), gerecht zu werden, müssen die erstellten 3D Modelle auf ihren Informationsgehalt hin überprüft werden. Sind diese Informationen nicht in den Modellen erkennbar, so wird angenommen, dass diese nicht für den hier angestrebten Einsatzzweck geeignet sind, da dies die Kernaufgabe der Systeme sein soll.

Für die Ermittlung dieses Kriteriums werden während der Versuchsdurchführung folgende Werte ermittelt:

- Erkennungsrate einer Person
- Erkennungsrate von Türen/Zugängen
- Erkennungsrate von einem Treppenhaus (Dies ist ebenfalls ein Zugang, jedoch wird dies gesondert behandelt, da ein solches Treppenhaus die Information lie-

fert, dass das Gebäude weitere Geschosse hat bzw. dass dort der Zugang zu anderen Geschossen ist)

Als Referenzwert wird folgender Wert angenommen: 100% als arithmetisches Mittel aller 3 Erkennungsraten.

Die Begründung für den Referenzwert ist wie folgt: Die Erkennung von Zugängen und Personen ist die Kernaufgabe, deren Erfüllung zu überprüfen ist. Ohne diese Eigenschaft wäre kein Nutzen für die Gefahrenabwehr erkennbar. Zudem sind Menschenleben in Gefahr, falls Zugänge nicht erkannt, verletzte Personen nicht gefunden und diese dadurch nicht gerettet werden. Daher soll dies in jedem Fall und ohne Ausnahme erkannt werden.

#### Online oder Offline

Nach Schadensereignissen, wie etwa Erdbeben, können durch die massive Einwirkung Infrastrukturnetze, wie beispielsweise das Stromnetz, gestört sein und nicht mehr funktionieren (Kongar et al. 2017, S. 601). Somit ist eine Versorgung mit Internetzugängen, ohne den Aufbau von autarken Infrastrukturen seitens der Gefahrenabwehr, nicht in jedem Fall gegeben. Daher sollte die Erfassung und Nachbearbeitung der 3D-Darstellungen möglichst offline auf einem eigenen Computer möglich sein.

Damit ist die Referenz: Offline

Ermittelt wird während der Versuchsdurchführung, welche Systeme einen Internetzugang benötigen.

#### Lieferung von zusätzlichen Informationen

Ein schon genannter Vorteil von 3D-Modellen ist die bessere räumliche Orientierung. Für die Ermittlung von Laufwegen ist es von Vorteil, wenn deren Länge oder auch die Höhen von Durchgängen direkt gemessen werden können, wodurch ein Abschätzen der Maße entfällt. Ist dies direkt in den 3D-Modellen möglich und sind die Angaben möglichst korrekt, so ist dies ein Mehrwert für die Einsatzplanung der Gefahrenabwehr.

Ermittelt wird in der Versuchsdurchführung, ob diese Funktion vorhanden ist und möglichst korrekte Werte liefert.

Als Referenz wird somit angenommen: Messfunktion vorhanden und korrekt.

#### Nicht betrachtete Kriterien mit Begründung

- Darstellung bei dunkler Umgebung: Dies war in der ursprünglichen Form der Arbeit geplant. Jedoch ist es nicht möglich eine homogene Dunkelheit in der Experimentumgebung zu schaffen, wodurch ein Vergleich der Systeme nicht möglich ist.
- Mobilität: Dies ist ein Kriterium, das in der Vorauswahl der zu beschaffenen Geräte berücksichtigt wurde. Siehe dazu Abschnitt 3.2.1.

## 3.2 Experiment

Das Experiment ist eine Form der Datenerhebung, die eine bestimmten Form aufweist bzw. einem bestimmten Ablauf folgt. (Eifler 2014, S. 195) Daher ist das Experiment nicht nur die Versuchsdurchführung, sondern stellt ein umfassendes Projekt dar.

Das Experiment gliedert sich, angelehnt an Kelterborn (1994), in folgende Grundaktivitäten (Beschaffung von Rohmaterialien entfällt). Bei den einzelnen Punkten wird erläutert, wo sich diese Aktivitäten in dieser Arbeit wiederfinden.

1. Strukturierung und Planung des Projektes  
Die Strukturierung und Planung des Projektes erfolgt anhand eines Flowcharts zum Projektmanagement, indem die einzelnen Bearbeitungspunkte bis zur Fertigstellung des Berichts dargestellt sind. Zu finden ist dieses Flowchart am Anfang des Kapitels 3 „Methodik“.
2. Beschaffung von Informationen  
Die Beschaffung von Hintergrundinformationen und notwendigen Daten ist in Form der Literaturrecherche erfolgt. Diese finden sich in dem Kapitel „State of the Art“ und an den notwendigen Stellen wieder.
3. Versuchsaufbau planen und vorbereiten  
Zu finden in Abschnitt 3.2.2.
4. Beschaffung von Geräten, Werkzeugen etc.  
Zu finden in Abschnitt 3.2.1.
5. Ausführen und Auswerten des Experiments  
Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Kapitel 4 und die anschließende Auswertung findet sich in Kapitel 5 „Diskussion“.
6. Abschlussarbeit  
Diese liegt in Form dieser Arbeit vor.

### 3.2.1 Geräte- und Softwarebeschaffung

An Geräten sollen möglichst Geräte mit verschiedene Scantechnologien zur Verfügung stehen. Diese Technologien sind (siehe auch Kapitel 2): Laserscanner, RGB-D-Kamera und Fotogrammetrie. Dadurch wird ein Vergleich untereinander ermöglicht. Des Weiteren sollen die Geräte möglichst mobil sein, damit diese einfach bewegt, transportiert, ggfs. später durch Roboter getragen werden können und durch enge Umgebungen passen. Dazu passend werden geeignete Softwarelösungen durch Recherchen ermittelt.

Durch eine Internetrecherche sind folgende Geräte als vielversprechend befunden worden (Ohne Kamera für die Fotogrammetrie):

- *Google Tango* bzw. das Tablet *Lenovo Phab 2 Pro*
- *Occipital Structure Sensor*
- *Microsoft Kinect* Sensor V1 mit Adapter für den Anschluss an einen Computer
- *GeoSLAM ZEB-REVO*

- *FARO Freestyle3D*

Ein Kinect Sensor V1 stand bereits zur Verfügung, für den ein entsprechender Adapter beschafft wurde.

Die Hersteller oder Vertreiber der anderen Geräte wurden angeschrieben und gefragt, ob diese unterstützen und entsprechende Geräte zur Verfügung stellen können. Die einzelnen Anfragen sind im Anhang zu finden.

Google, Lenovo und Occipital hatten für die Bearbeitungszeit keine Geräte zur Ausleihe zur Verfügung und konnten diese dementsprechend nicht bereitstellen. Die Firmen FARO und Laserscanning-Europe jedoch baten ihre Hilfe an und konnten die entsprechenden Geräte zukommen lassen. FARO schickte ihren Scanner Freestyle3D als Leihgabe und Laserscanning-Europe schickte einen Mitarbeiter mit dem Scanner GeoSLAM ZEB-REVO für den Versuchstag (die Versuche wurden nicht von diesem Mitarbeiter durchgeführt).

Für die Fotogrammetrie wird eine eigene, handelsübliche Digitalkamera (Majinon SZ 24) auf einem Stativ verwendet.

Kurzbeschreibung bzw. Daten der beschafften Geräte:

Hier folgt nur eine Kurzbeschreibung der Geräte und ihrer Funktionsweise. Für eine genauere Erläuterung der Scantechniken wird auf das Kapitel 2 Abschnitt 1 verwiesen.

*FARO Freestyle3D:* Der Scanner FARO Freestyle3D basiert auf dem Prinzip der RGB-D Kamera. Ein Infrarot-Punktmuster wird durch einen Laser projiziert und durch zwei Infrarotkameras aufgezeichnet, wodurch via Triangulation die Entfernungen ermittelt werden. Somit entsteht eine 3D- Punktwolke. Gleichzeitig nimmt eine weitere Kamera ein Farbbild auf, wodurch die Punkte der Punktwolke entsprechend eingefärbt werden. Die Stromversorgung erfolgt durch den USB-Anschluss des Computers, wodurch auch direkt die Daten an eine Software übertragen werden (Eine Aufnahme auf eine Speicherkarte im Gerät ist ebenfalls möglich). Der Freestyle hat eine Scanreichweite von bis zu drei Metern. (FARO Technologies Inc. 2016, S. 5–6). Durch einen eingebauten LED-Blitz werden bei Bedarf mangelhafte Lichtverhältnisse ausgeglichen (FARO Technologies Inc. 2016, S. 39).





Abbildung 2: FARO Freestyle3D

*GeoSLAM ZEB-REVO*: Der ZEB-REVO ist ein Laserscanner, der in der Hand getragen oder auf einem Fahrzeug montiert werden kann. Durch den rotierenden Scanner Kopf werden Laserstrahlen ausgesendet und wieder empfangen, wodurch eine 3D-Punktwolke berechnet wird. Die Stromversorgung erfolgt durch den mitgelieferten Datenspeicher, der auch in einem Rucksack getragen werden kann. Die Übertragung der Daten erfolgt nach dem Scannen durch die Übertragung von dem Datenspeicher in eine Software auf einem Computer. Die Scanreichweite in Räumen beträgt bis zu 30 Metern. (GeoSLAM Ltd 2015, 2017b)



Abbildung 3: GeoSLAM ZEB-REVO Handscanner mit Datenspeicher

*Microsoft Kinect V1*: Die Funktionsweise des Kinect Sensors bzw. einer RGB-D Kamera wird in Kapitel 2 State of the Art beschrieben. Der Kinect Sensor wurde für die Microsoft XBOX 360 entwickelt, um diese per Gesten oder Sprache zu steuern und so auch neue

Spielweisen hervorzubringen. Die Stromzufuhr erfolgt über einen USB-Adapter mit Netzstecker, der gleichzeitig die Verbindung mit dem Computer bzw. der Software herstellt. Die Reichweite beträgt ca. 2,50 Meter. (Microsoft Corporation 2010)



Abbildung 4: Microsoft Kinect Sensor

*Digitalkamera Maginon SZ 24:* Die Kamera besitzt eine Bildauflösung von 16 Megapixeln (1/2,3“ CCD Bildsensor). Das Objektiv hat eine Brennweite von 4,5 – 108,0mm. (Supra Foto-Elektronik-Vertriebs-GmbH 2013, S. 52)

#### Software:

Alle Geräte benötigen eine Software für die Aufnahme bzw. das Scannen und einige für die Nachbearbeitung der Daten, damit ein 3D-Modell erstellt wird.

Zu dem System ZEB-REVO von GeoSLAM wird direkt das Programm „GeoSLAM Desktop“ mitgeliefert, das die Daten des Scanners zu einer 3D-Punktwolke verarbeitet, nachdem diese übertragen wurden (GeoSLAM Ltd 2017a). Für die weitere Betrachtung und Weiterverarbeitung wird die Software „CloudCompare“ verwendet, die es ermöglicht die Punktwolke weiter zu be- und verarbeiten (z.B. Erzeugung eines Meshes) und die Ergebnisse in andere Dateiformate zu exportieren (Girardeau-Montaut 2015).

Für den FARO Freestyle gibt es eine eigene Software zur Erfassung der Scandaten, die sich „FARO Scene Capture“ nennt. Diese Software empfängt direkt die Daten des Scanners und speichert diese als farbige Punktwolke ab. Zudem können in diesem Programm Einstellungen vorgenommen werden, wie beispielsweise die Reichweite der Erfassung oder Nutzung des Blitzes. In dieser Software können die Ergebnisse auch direkt nach dem Scanvorgang betrachtet werden. (FARO Technologies Inc. 2016, S. 35–44)

Die Software „FARO Scene Capture“ unterstützt nicht nur den Freestyle3D, sondern sie erlaubt auch das Scannen mit anderen Sensoren, wie etwa mit dem Microsoft Kinect Sensor (FARO Technologies Inc. 2016, S. 122). Daher wird bei der Versuchsdurchführung mit dem Kinect Sensor ebenfalls dieses Programm verwendet. Für die Nachbearbeitung beider Ergebnisse (Freestyle3D und Kinect) wird das Programm „FARO Scene“ herangezogen, durch das eine Projektpunktwolke erzeugt werden kann, die ein stän-

diges nachladen der Punkte verhindert und zudem z.B. ein Mesh für den Scan erzeugen kann (FARO Technologies Inc. 2016, S. 91–94).

Als Software für die Fotogrammetrie wird eine professionelle Software verwendet, die „Agisoft PhotoScan Professional“ heißt. Diese Software erstellt aus Fotos zunächst eine Punktwolke und danach ein dichtes 3D-Modell (Agisoft LLC 2016). Die Funktionsweise der Fotogrammetrie ist in Abschnitt 2.1 näher erläutert.

Tabelle 1 gibt einen Überblick darüber, welche Hardware mit welcher Software kombiniert wird und auf welcher Erfassungstechnologie die Hardware basiert.

Tabelle 1: Systemüberblick - Hardware mit Technologie und zugehöriger Software

Hardware	Technik	Zugehörige Software
Microsoft Kinect V1	RGB-D-Kamera	FARO Scene Capture und FARO Scene
FARO Freestyle3D	RGB-D-Kamera	FARO Scene Capture und FARO Scene
GeoSLAM ZEB-REVO	Laser-Scanner	GeoSLAM Desktop und CloudCompare
Digitalkamera Maginon SZ 24	Fotogrammetrie	Agisoft PhotoScan Professional

### 3.2.2 Versuchsplanung/-Vorbereitung, Ablauf und Methodik der Ermittlung der Zielgrößen für die Beurteilungskriterien

Folgende Darstellung ist angelehnt an das Buch „Taschenbuch Versuchsplanung“ von Kleppmann (2008). Da sich das Buch jedoch auf Versuchsplanungen für Produkt- und Prozessoptimierungen bezieht, wird nicht alles daraus übernommen.

#### Festlegung des Untersuchungsziels

Ziel der Untersuchung ist es, die Geeignetheit der Hard- und Softwarekombinationen zu ermitteln. Dafür ist es nötig, dass möglichst alle Beurteilungskriterien erfüllt werden. Dafür wird ein Abgleich der ermittelten Daten mit den vorher definierten Referenzwerten vorgenommen (siehe Abschnitt 3.1).

#### Zielgrößen festlegen

Die Zielgrößen sind die Daten, die durch den Versuch ermittelt werden (Kleppmann 2008, S. 11). Diese Daten können variable Messwerte sein, also Zahlenwerte (quantitativ), oder attributive Werte, also Aussagen, wie vorhanden/nicht vorhanden (Quentin 1994, S. 14).

Die hier zu ermittelnden Daten ergeben sich aus den Beurteilungskriterien. In nachfolgender Tabelle sind die Zielgrößen samt der Klassifizierung in variabel/attributiv aufgezeigt und zu welchem Beurteilungskriterium diese gehören.

Tabelle 2: Zielgrößen

Zielgröße	Attributiv/variabel	Beurteilungskriterium
Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos	Variabel	Zeit bis zu einer 3D Darstellung
Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung	Variabel	Zeit bis zu einer 3D Darstellung
Bedienungsschritte des Scanvorgangs	Variabel	Leichte Bedienbarkeit
Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware	Variabel	Leichte Bedienbarkeit
Erkennungsrate einer Person	Variabel	Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung
Erkennungsrate von Türen/Zugängen	Variabel	Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung
Erkennungsrate von einem Treppenhaus	Variabel	Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung
Voraussetzung Internetzugang	Attributiv (Ja/Nein)	Online oder Offline
Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen	Attributiv (Ja/Nein)	Lieferung von zusätzlichen Informationen

### Einflussgrößen

Als nächstes werden Größen identifiziert, die die Ergebnisse der Zielgrößen beeinflussen können. Diese werden Einflussgrößen genannt und unterteilen sich in Steuergrößen und Störgrößen. Die Werte von Steuergrößen kann selber eingestellt und dann konstant gehalten werden. Die Werte von Störgrößen können nicht selber eingestellt werden. (Kleppmann 2008, S. 11–12)

Durch Betrachtung der Funktionsweise der zu testenden Systeme können folgende Einflussgrößen herausgestellt werden:

Tabelle 3: Einflussgrößen

Einflussgröße	Erläuterung des Einflusses	Art der Einflussgröße
Beleuchtung	Die Beleuchtung kann Einfluss auf die Qualität des Scans bei der RGB-D-Kamera und den Fotos haben, da diese die gleiche Beleuchtung für die gleichen Ergebnisse benötigen	Störgröße

Einflussgröße	Erläuterung des Einflusses	Art der Einflussgröße
Beleuchtung	Die Beleuchtung kann Einfluss auf die Qualität des Scans bei der RGB-D-Kamera und den Fotos haben, da diese die gleiche Beleuchtung für die gleichen Ergebnisse benötigen	Störgröße
Veränderungen/Bewegungen im zu scannenden Bereich	Da bei den Scanvorgängen oder bei der Fotogrammetrie gleiche Punkte erkannt werden, muss die Umgebung immer gleich sein, damit dieser Abgleich funktionieren kann	Störgröße
Anzahl der Bilder bei der Anwendung der Fotogrammetrie	Je mehr Fotos von einem Objekt gemacht werden, desto mehr Referenzpunkte kann die Software entdecken und miteinander verbinden. Zudem muss verhindert werden, dass zu viele Gebiete der Umgebung durch Fotos nicht abgedeckt werden und somit nicht rekonstruiert werden können	Steuergröße
Bewegungsablauf bei Scanvorgängen mit der RGB-D-Kamera und dem Laserscanner	Nur das was gescannt wird, kann auch tatsächlich rekonstruiert werden. Der Bewegungsablauf mit den Scannern beeinflusst welche Gebiete erfasst werden	Steuergröße
Internetgeschwindigkeit für die Verarbeitung bei Online-Systemen	Bei Software, die Berechnungen online vornimmt, müssen Daten hochgeladen und wieder runtergeladen werden. Die Geschwindigkeit des Internetzugangs beeinflusst dabei die Zeit die dafür gebraucht wird	Störgröße
Rechenleistung des Computers	Die Software nutzt die Rechenleistung des Computers. Je mehr Rechenleistung ein Computer besitzt, desto schneller kann die Software Berechnungen durchführen	Störgröße

In diesem Experiment werden die Steuergrößen festgelegt und nicht mehr verändert, damit die späteren Ergebnisse aus den Versuchsdurchführungen mit den Hard- und Softwarekombinationen vergleichbar und reproduzierbar sind. Somit sind diese Größen bei der Beschreibung des Versuchsablaufs explizit zu beschreiben.

Da die Steuergrößen nicht variiert werden, ergibt sich eine Faktorstufe von 1, was bedeutet, dass pro Hard- und Softwarekombination nur ein Versuch durchgeführt wird.

### Behandlung von Störgrößen

Störgrößen können, falls sie sich innerhalb der Versuche verändern, zu Ergebnissen führen, die nicht mehr miteinander vergleichbar sind. Somit ist es notwendig, dass diese Größen möglichst konstant gehalten werden. Nachfolgend wird erläutert wie dies gehandhabt wird.

*Beleuchtung:* Die Versuchsumgebung befindet sich in einem Keller mit einer Fensterfront. Diese Fensterfront wird durch eine Jalousie abgedunkelt und nur die Deckenbeleuchtung bleibt eingeschaltet.

*Veränderungen/Bewegungen im zu scannenden Bereich:* Die Personen, die in dem Labor ihren Arbeitsplatz haben, werden für die Versuchsdurchführung gebeten das Labor zu verlassen. Während der Scans und dem Erstellen der Fotos wird darauf geachtet, dass kein Einrichtungsgegenstand verschoben, entfernt oder hinzugefügt wird.

*Internetgeschwindigkeit für die Verarbeitung bei Online-Systemen:* Für den Zugang zum Internet wird immer der gleiche Computer und der gleiche Internetzugang des Labors genutzt. Die Internetgeschwindigkeit wird durch einen Online-Speedtest festgestellt. Der Test ergab folgende Werte: 21.903 kbit/s Download, 9.942 kbit/s Upload.



Abbildung 5: Screenshot Speedtest. Durchgeführt mit <https://www.wieistmeineip.de/speedtest/>

*Rechenleistung des Computers:* Für die Versuche wird immer der gleiche Computer genutzt und jede andere Anwendung, die nicht für die Funktion nötig ist, wird während der Durchführung geschlossen. Der verwendete Computer hat folgende Merkmale:

- Acer Aspire E 15 Laptop
- Prozessor: Intel Core i5-6200U 2,3 GHz (Turbo Boost 2,8 GHz)
- Grafikkarte: NVIDIA GeForce 940M (2GB VRAM)
- Arbeitsspeicher: 8GB DDR3 RAM

- Festplatte: 1000 GB HDD
- Betriebssystem: Windows 10 Home 64-Bit

### Versuchsplan aufstellen

Aufgestellt wird ein Plan, der die Reihenfolge der Versuche festlegt, also wann, welches System untersucht wird.

Die Reihenfolge ist:

1. Fotogrammetrie mit Digitalkamera und der Software Agisoft PhotoScan Professional
2. RGB-D-Kamera Microsoft Kinect mit der Software FARO Scene Capture und FARO Scene
3. RGB-D-Kamera FARO Freestyle3D mit der Software FARO Scene Capture und FARO Scene
4. Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO mit der Software GeoSLAM Desktop und CloudCompare

### Methodik zur Ermittlung der Zielgrößen

Hier soll erläutert werden, wie die Werte für die Zielgrößen während der Versuche gemessen bzw. ermittelt und welche Art von Daten dadurch generiert werden.

*Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos:* Mittels einer Stoppuhr wird die Zeit gemessen. Der Startpunkt der Messung ist die Initialisierung des Scanvorgangs an dem Scanner bzw. das Schießen des ersten Fotos. Die Zeitnahme endet an dem Punkt, an dem die weitere Verarbeitung der Daten beginnt bzw. mit dem Schießen des letzten Fotos. Art des Datensatzes → Zeit (quantitativ).

*Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung:* Mittels einer Stoppuhr wird die Zeit gemessen. Startpunkt der Messung ist der erste Schritt, der zur Erstellung einer 3D-Darstellung nötig bzw. in dem Workflow der Software vorgesehen ist. Art des Datensatzes → Zeit (quantitativ).

*Bedienungsschritte des Scanvorgangs:* Jeder nötige Handgriff an dem Scanner bzw. bei der Erstellung der Fotos wird dokumentiert. Beispiel: Betätigen des Start-Knopfes. Beginn der Dokumentation ist der Handgriff, der den Scan initialisiert bzw. das Schießen des ersten Fotos. Es wird angenommen, dass die Hardware schon aufgebaut und verkabelt ist. Die Dokumentation endet mit dem Schritt, der vor der Nachverarbeitung nötig ist. Art des Datensatzes → Anzahl der Schritte (quantitativ).

*Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware:* Jeder Bedienungsschritt in der Software, der nötig ist, um ein adäquates 3-dimensionales Bild zu erzeugen, wird dokumentiert. Beginn der Dokumentation ist der erste Bedienungsschritt in der Software. Die Dokumentation endet mit dem Schritt, der vor der Betrachtung des finalen Bildes durchgeführt wird. Art des Datensatzes → Anzahl der Schritte (quantitativ).

*Erkennungsrate einer Person:* Die erstellten 3D Rekonstruktionen werden jeweils fünf Personen gezeigt, die die untersuchten Räumlichkeiten nicht kennen. Andere Vorkenntnisse werden nicht vorausgesetzt (ebenso bei den anderen Erkennungsraten), da eine Erkennung auch ohne spezielles Training möglich sein soll. Die Befragten werden gebeten zu sagen, ob sie eine Person erkennen können und wo diese sich befindet. Da sich eine Person, in Form einer Puppe, immer an der gleichen Stelle befinden wird, dürfen die Befragten jeweils nur eine Rekonstruktion sehen. Ansonsten wüssten sie bei einer nächsten Befragung wo sie suchen müssen. Art des Datensatzes → Erkennungsrate in Prozent (quantitativ).

*Erkennungsrate von Türen/Zugängen:* Die erstellten 3D Rekonstruktionen werden jeweils 5 Personen gezeigt, die die untersuchten Räumlichkeiten nicht kennen. Die Unwissenheit über die räumlichen Begebenheiten ist deshalb wichtig, da die Befragten sonst schon aus diffusen Umrissen ableiten könnten was dort dargestellt wird. Die Personen werden gefragt, wo sie welche Zugänge in die Räumlichkeiten erkennen können, wie Fenster, Türen oder Flure. Wichtig dabei ist, dass alle Türen (Haupteingangstür zum Labor und die Tür im Flur gegenüber der Haupteingangstür) und die Fenster als Zugänge erkannt werden. Erst dann wird hier eine Erkennung vermerkt. Auch hier wird den Befragten jeweils nur eine Rekonstruktion gezeigt. Art des Datensatzes → Erkennungsrate in Prozent (quantitativ).

*Erkennungsrate von einem Treppenhaus:* Bei der Befragung zu einer Person oder Türen bzw. Zugängen, wird gleichzeitig dokumentiert, wie viele der Befragten das ebenfalls erfasste Treppenhaus erkennen und es als solches benennen. Art des Datensatzes → Erkennungsrate in Prozent (quantitativ).

*Voraussetzung Internetzugang:* Während der Erfassung der Umgebung und der Nachverarbeitung/Berechnung wird ermittelt, ob eines der Programme einen Internetzugang benötigt, damit die Berechnungen oder sonstige Schritte ausgeführt werden. Dafür wird der Internetadapter des Computers deaktiviert und geschaut, ob eine Berechnung erfolgt. Art des Datensatzes → Ja oder Nein (qualitativ).

*Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen:* Nach der 3D-Rekonstruktion wird evaluiert, ob die Software weitere Informationen zu der gescannten Umgebung liefern kann. So wird geprüft, ob eine Funktion zu Messung von Abständen vorhanden ist und die gelieferten Werte auch mit der Realität übereinstimmen. Gemessen wird jeweils die Höhe der Eingangstür zu dem Labor, dessen tatsächliche Höhe 2,10 m beträgt. Eine Abweichung von 3% wird toleriert, was 6,2 cm entspricht. Art des Datensatzes → Ja oder Nein (qualitativ).

#### Zusätzlich benötigte Materialien

Für die Ermittlung der Zielgrößen bzw. für die Durchführung der Versuche sind folgende, weitere Materialien nötig:

- Stoppuhr
- Zollstock



- Klebeband
- Verlängerungskabel
- Mehrfachsteckdose
- Rollwagen
- Kamerastativ

### Versuchsumgebung

Das Labor für Großschadenslagen der Technischen Hochschule Köln soll samt Teilen des angrenzenden Flurs und dem Ansatz des Treppenhauses in der Nähe erfasst und als 3D-Rekonstruktion dargestellt werden. In dem Labor wird eine Übungspuppe für Reanimationen so platziert, dass diese auf dem Boden angelehnt an einem Schrank sitzt. In der rechten Wand des Labors befindet sich die Fensterwand.

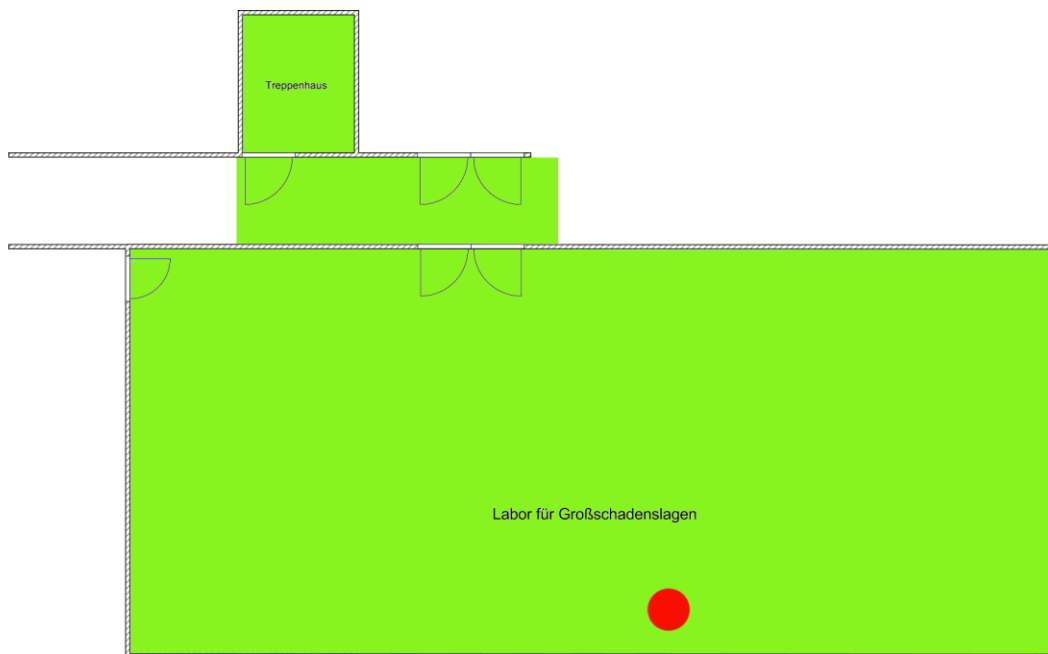


Abbildung 6: Scanbereich Labor und Standort der Puppe (roter Punkt)

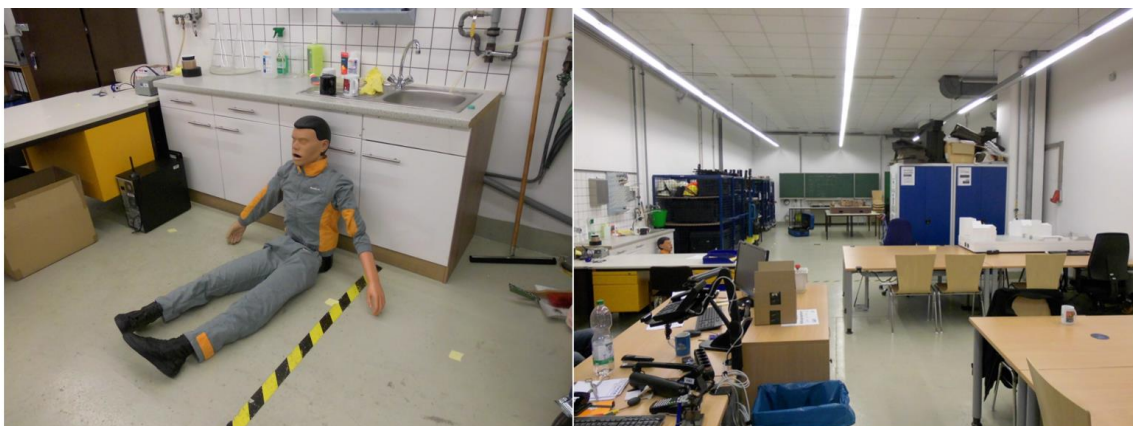


Abbildung 7: Puppe als Opfer (links) und Labor für Großschadenslagen (rechts)

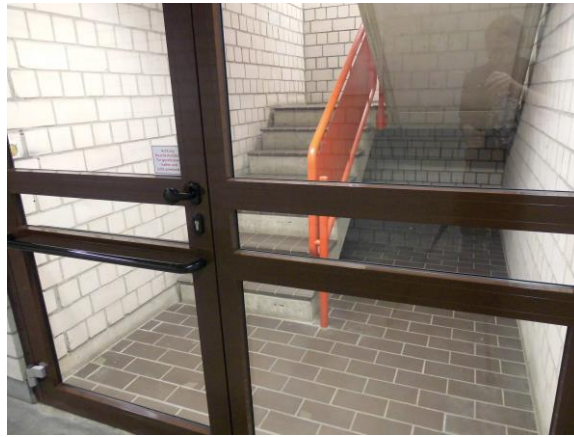


Abbildung 8: Treppenhaus

### 3.2.3 Versuchsabläufe

#### Fotogrammetrie mit Digitalkamera und der Software Agisoft PhotoScan Professional

Mit der Digitalkamera Maginon SZ 24 werden Aufnahmen der Räumlichkeiten gemacht. Die Kameraeinstellungen sollen bei allen Fotos gleich sein und werden damit auf folgende Werte festgelegt:

- ISO 100
- Qualität: Normal
- Beleuchtungskompensation: 0.0
- Weißabgleich: Automatisch
- Blitz: Nein
- Auflösung: 4608x3456 Pixel

Damit die gesamte Umgebung richtig erfasst wird, werden die Kamerapositionen bzw. die Aufnahmerichtung der Fotos nach Anleitung der Software festgelegt (Agisoft LLC 2016, S. 6). Die Art der Positionen mit Blickwinkel des Objektivs ist in nachfolgendem Bild dargestellt:

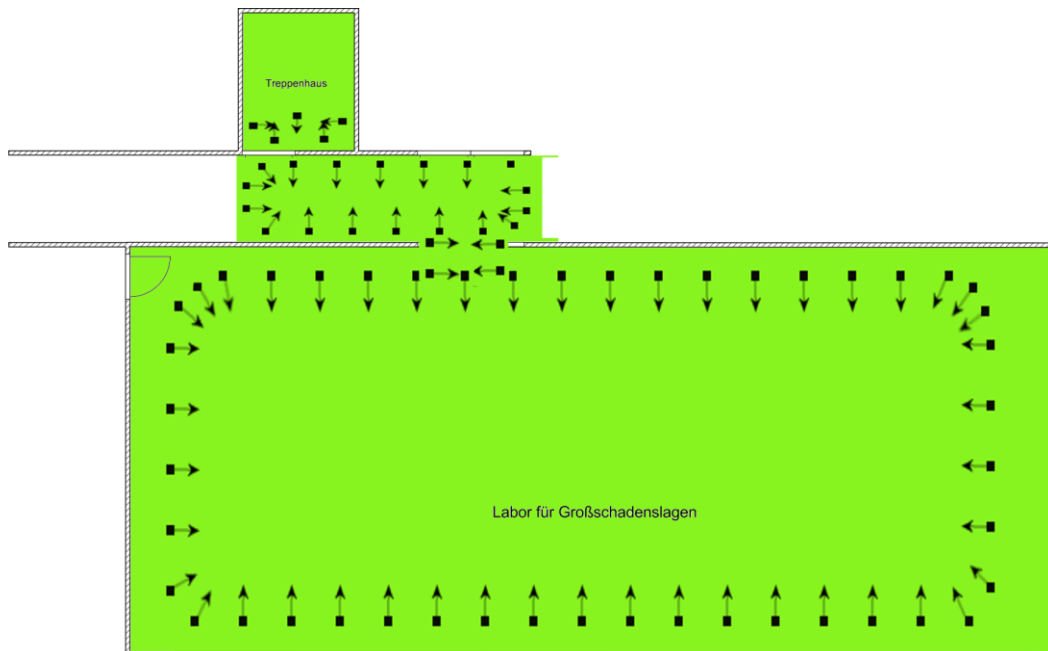


Abbildung 9: Kamerapositionen mit Blickrichtung

Die Positionen befinden sich alle 60cm. Um dies sicherzustellen, wird der Boden der Räumlichkeiten vermessen und alle 60cm eine Markierung der Kameraposition mit Klebeband vorgenommen.

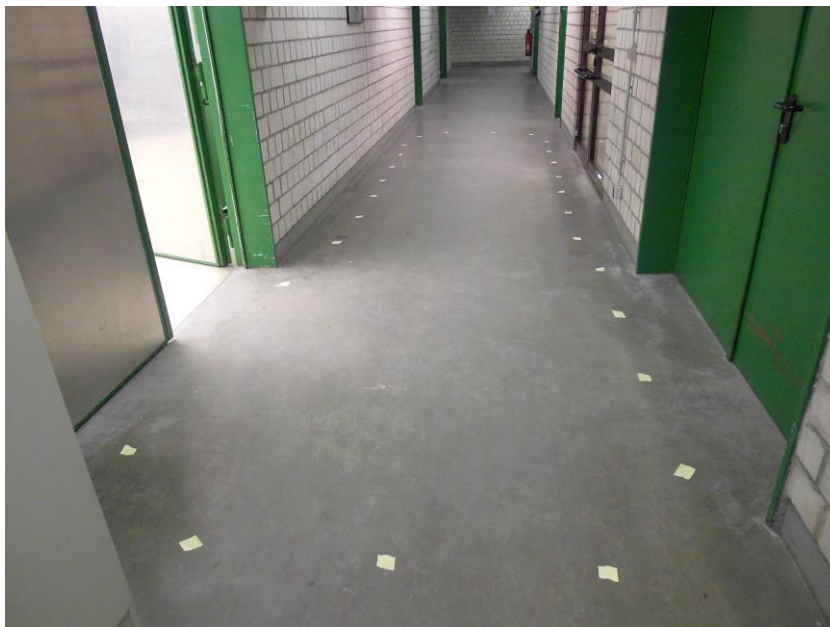


Abbildung 10: Markierungen der Kamerapositionen (Hier dargestellt in dem angrenzenden Flur)

An jeder der Kamerapositionen wird die Kamera auf ein Stativ in einer Höhe von 155cm aufgestellt. Es erfolgt die Aufnahme von 3 unterschiedlichen Bildern pro Position, nämlich zuerst in einem Winkel von  $90^\circ$  zu dem Stativ, danach in einem Winkel von  $70^\circ$  und zuletzt in einem Winkel von  $110^\circ$ . Dies soll sicherstellen, dass nicht nur die Wände, sondern auch der Fußboden und die Decke erfasst werden.

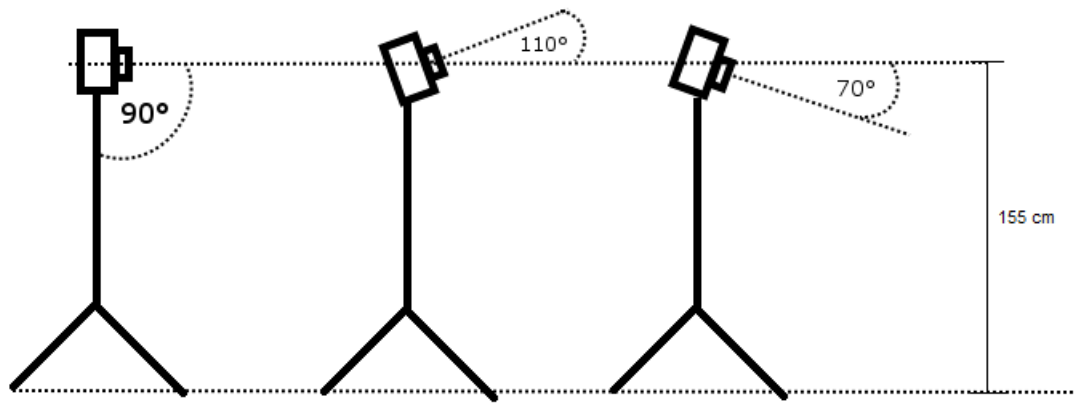


Abbildung 11: Kamerawinkel

Nach dem Anfertigen der Fotos, werden die Bilder auf den Computer übertragen und mit der Software bearbeitet.

### RGB-D-Kamera Microsoft Kinect mit der Software FARO Scene Capture und FARO Scene

Der Microsoft Kinect Sensor wird mittels eines Strom- und USB-Adapters an den Computer angeschlossen. Die Stromversorgung wird durch ein Verlängerungskabel und eine Mehrfachsteckdose sichergestellt. Damit die Verkabelung und die Hardware nicht am Körper getragen werden muss, wird die Verkabelung und der Computer auf einem Rollwagen untergebracht, der bei dem Scanvorgang hinter der scannenden Person hergezogen wird und somit nicht mit erfasst werden kann.



Abbildung 12: Rollwagen mit Computer, Kinect Sensor und Stromversorgung

Während des Scanvorgangs wird der Kinect Sensor in eine Hand genommen und vor den Körper gehalten. Dabei wird der Sensor nach links und rechts geschwenkt, um die Umgebung zu erfassen. Die Vorschau des 3D-Modells in der Software FARO Scene

Capture, die schon bei der Erfassung möglich ist, wird ausgeschaltet, da geschaut werden soll, ob auch ohne ein ständiges Beobachten des Bildschirms ein geeignetes Modell entsteht. Der Scanweg für den Kinect Sensor ist durch die nötige Verkabelung begrenzt. In Abbildung 13 ist ersichtlich, welcher Weg vorgenommen werden soll, wobei der Pfeil die Laufrichtung anzeigt. Der Scanweg ist durch die Bindung an das Stromkabel begrenzt. An der Anfangsposition (rechtes Ende) wird ein Rundumscan durchgeführt, damit auch die Fensterfront, die sich an der rechten Wand befindet, miterfasst wird. Die Gehgeschwindigkeit ist durch ein langsames Vorranggehen durchzuführen.

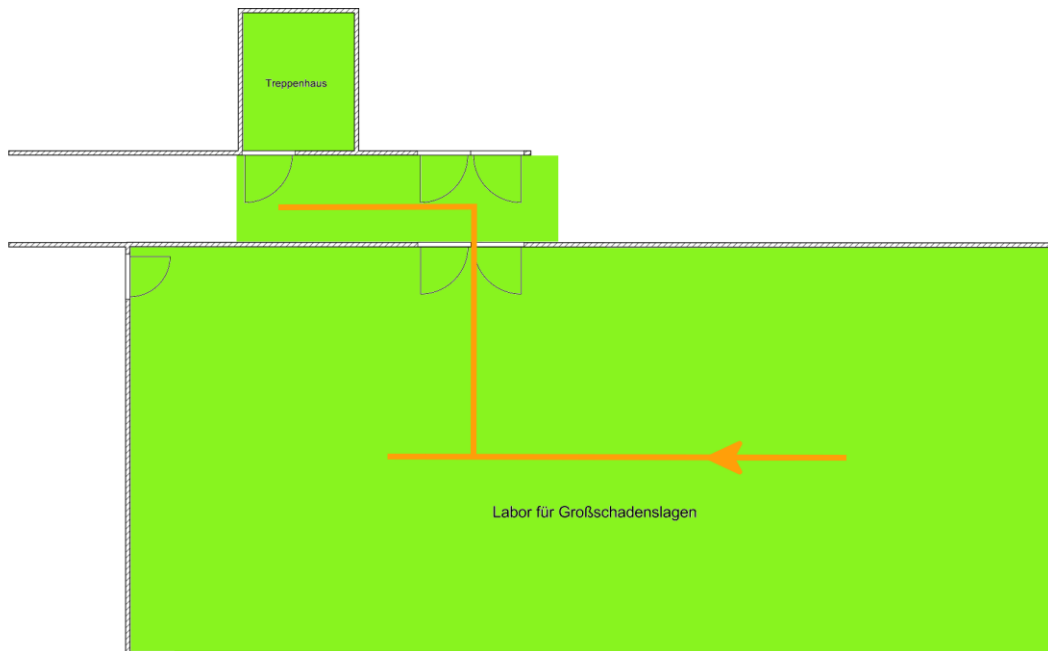


Abbildung 13: Scanweg Kinect Sensor

### RGB-D-Kamera FARO Freestyle3D mit der Software FARO Scene Capture und FARO Scene

Der Scanner FARO Freestyle3D benötigt keine zusätzliche Stromversorgung und wird direkt über den USB-Anschluss eines Computers oder Tablets gespeist. In dem Lieferumfang des Gerätes ist ein Tablet enthalten, das einfach in der Hand gehalten werden kann. Für die Vergleichbarkeit wird jedoch von der Nutzung des Tablets abgesehen und der Computer aus den anderen Versuchen genutzt. Der Scanner wird mit dem Laptop verbunden und die Voreinstellung eingeschaltet, damit der Freestyle3D das eingebaute Blitzlicht nutzen kann. Der Laptop wird in der einen Hand, der Scanner in der anderen Hand gehalten. Beim Scanvorgang wird, wie bei dem Kinect Sensor, der Scanner vor den Körper gehalten und nach links und rechts geschwenkt. Der Weg, der mit dem Scanner abgelaufen werden soll, ist in Abbildung 14 dargestellt, wobei der Pfeil die Laufrichtung vorgibt. An der Anfangsposition ganz rechts wird ebenfalls ein Rundumschwenk vorgenommen. Die Gehgeschwindigkeit ist durch ein langsames Vorranggehen durchzuführen.

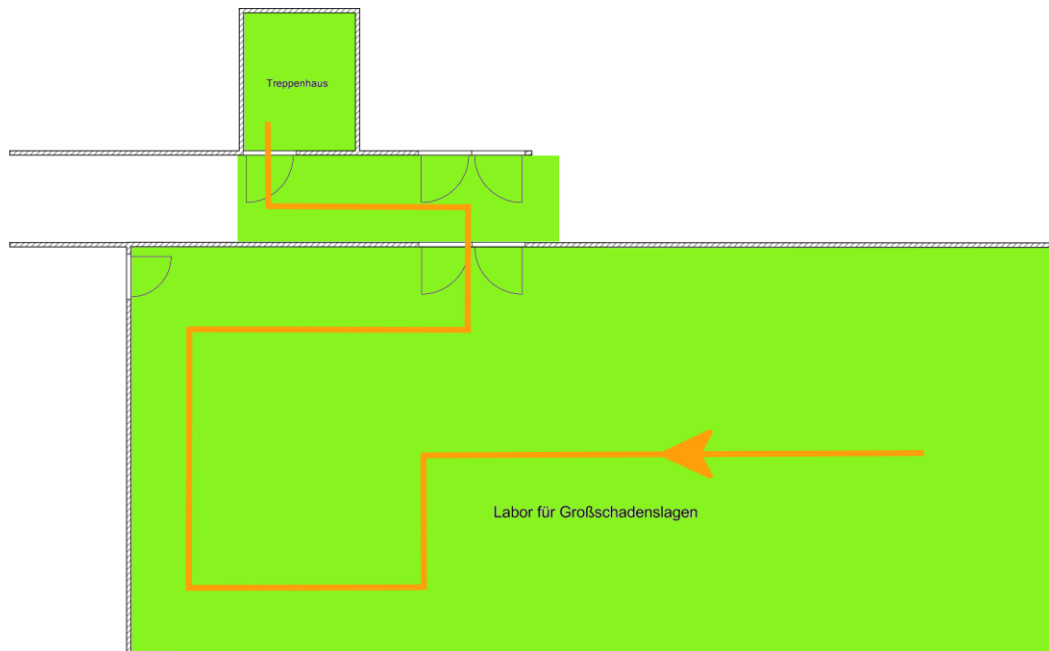


Abbildung 14: Scanweg Freestyle3D und ZEB-REVO

Nach der Erfassung wird das Ergebnis weiter mit der Software FARO Scene bearbeitet.

#### Laserscanner GeoSLAM ZEB-REVO mit der Software GeoSLAM Desktop und CloudCompare

Der Laserscanner ZEB-REVO wird mit dem Datenspeicher verbunden, der neben der Speicherung der Daten auch die Stromversorgung für den Scanner ist. Der Weg bei der Erfassung ist ebenfalls durch die Abbildung 14 ersichtlich. Die Gehgeschwindigkeit ist durch ein langsames Vorranggehen durchzuführen. Der Scanner wird ebenfalls vor den Körper gehalten. Jedoch wird dieser nicht geschwenkt. Wichtig dabei ist, dass bei einem Durchschreiten der Türen rückwärtsgegangen werden muss. Dies soll einen Fehler in der Positionsermittlung verhindern und wurde durch den Mitarbeiter von Laserscanning-Europe mitgeteilt.

#### Dokumentation

Eine Dokumentation ist zwingend erforderlich, damit die Daten und damit das Wissen nicht verloren geht (Quentin 1994, S. 9). Somit ist sie gewissenhaft und vollständig durchzuführen.

Für jeden Versuchsdurchgang wird ein Dokumentationsbogen erstellt, in dem die wichtigen Zielgrößen und ein Bereich zum Eintragen der Werte aufgezeigt sind. Diese liegen während den Versuchen in digitaler Form vor und können direkt digital bearbeitet werden. Nachfolgend ist der generelle Aufbau der Bögen dargestellt. Die Bögen mit den Daten aus den Versuchen sind im Anhang zu finden.

- *Technisches System:* Hier wird angegeben, welches technische Gerät in diesem Versuchsdurchlauf benutzt wurde. Beispiel: GeoSLAM ZEB-REVO
- *Datum der Durchführung:* Hier ist das genaue Datum des jeweiligen Versuchs anzugeben. Beispiel: 24.2.2017

- *Software für Erfassung*: Eintragung der Software, die für die Funktion des Scanners notwendig ist. Beispiel: GeoSLAM Desktop
- *Bedienungsschritte* (Scanvorgang): Hier sollen alle Bedienungsschritte der Hard- und Software eingetragen werden, die vor der Nachbearbeitung notwendig sind. Beispiel: Start-Knopf betätigen, Stopp-Knopf betätigen, Daten übertragen etc.
- *Zeit für Scan/Erfassung*: Eintragen der gesamten Zeit des Scan- bzw. Erfassungsvorgangs in Minuten und Sekunden. Beispiel: 6:52
- *Bedienungsschritte* (Nachverarbeitung): Hier sollen alle notwendigen Bedienungsschritte der Software für eine Nachverarbeitung/Berechnung eingetragen werden. Beispiel: Fotos verbinden, Punktwolke erstellen etc.
- *Zeit für Verarbeitung*: Eintragen der gesamten Zeit der Verarbeitung in Minuten und Sekunden. Beispiel: 7:54
- *Zusatzinformationen*: Beschreiben, ob die Software bzw. das Modell eine Ermittlung von Maßen erlaubt und ob diese Maße richtig sind.
- *Befragung der Darstellungsqualität*: Eintragen der Personen, die die Türen, die Person und das Treppenhaus erkannt haben. Beispiel: Erkennung der Person: 3 von 5 Befragten

## 4 Ergebnisdarstellung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Versuchen dargestellt. Dies geschieht unterteilt in die jeweiligen Zielgrößen der Versuche und anderen Größen der Beurteilungskriterien, damit die Ergebnisse besser miteinander verglichen werden können. Die Originaldatensätze bzw. die ausgefüllten Dokumentationsbögen sind im Anhang beigefügt.

Bis auf die Kosten der Geräte unter Abschnitt 4.1, welche Sekundärdaten darstellen, sind alle anderen Daten Primärdaten.

### 4.1 Kosten der Geräte

Die aktuellen Marktpreise der Geräte FARO Freestyle3D und GeoSLAM ZEB-REVO wurden durch eine Nachfrage bei Firma Laserscanning-Europe in Erfahrung gebracht. Die Preise der Digitalkamera und des Kinect Sensors wurden durch Internetrecherchen ermittelt. Dargestellt sind die Ergebnisse in Tabelle 4.

Tabelle 4: Ergebnisse Preise der Geräte

	Microsoft Kinect	FARO Freestyle3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Digitalkamera Maginon SZ 24
Preis in Euro	149,87 (Amazon o.J.)	11.670(Opti-cal Survey Equipment 2017)-13.600 (Krause 2017)	30.450 (Krause 2017)	129 (Sauer 2013)

## 4.2 Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos

In Tabelle 5 sind die Zeiten der Erfassung der Umgebung dargestellt, die benötigt wurden. Die Anzahl der Fotos, die gemacht wurde, beträgt 336.

Tabelle 5: Ergebnisse Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Zeit [Minuten :Sekunden]	20:11	17:07	9:29	67:11

## 4.3 Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung

In Tabelle 6 sind die Zeiten der Nachverarbeitung bzw. der nötigen Berechnungen mit der jeweiligen Software dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene	FARO Scene	GeoSLAM Desktop	Agisoft Photo-Scan Professional
Zeit [Minuten :Sekunden]	4:01	00:13	21:14	2286

## 4.4 Bedienungsschritte des Scanvorgangs

Die Bedienungsschritte sind in diesem Abschnitt nach Gerät aufgegliedert und einzeln aufgezählt. Außerdem sind Bilder der tatsächlich abgelaufenen Wege, die von den Geräten mit aufgezeichnet wurden, bzw. ein Bild von den Kamerapositionen angefügt.

### Microsoft Kinect

- Aufnahmeknopf in der Software FARO Scene Capture betätigen
- Scanweg ablaufen und somit die Räumlichkeiten erfassen



- Scan durch das Betätigen des Knopfes in der Software beenden

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 3



Abbildung 15: 3D Rekonstruktion (Ansicht von seitlich oben) mit tatsächlichem Scanweg (orange) Kinect

### FARO Freestyle3D

- Knopf an dem Freestyle3D betätigen, um das Gerät zu aktivieren
- Scanweg ablaufen und somit die Räumlichkeiten erfassen
- Knopf an dem Freestyle3D erneut betätigen, um das Gerät zu deaktivieren

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 3

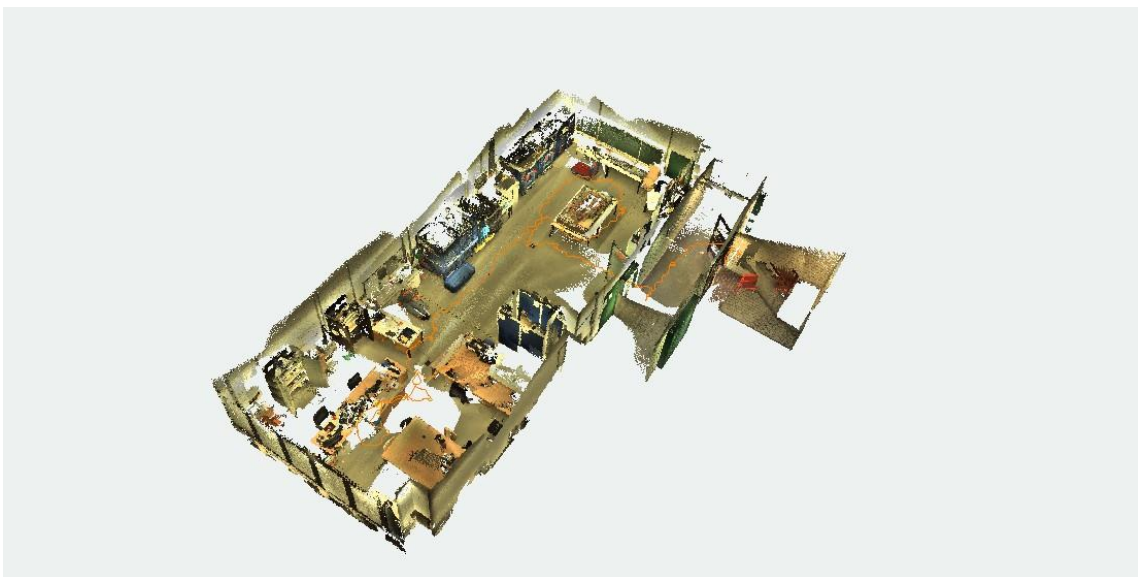


Abbildung 16: 3D Rekonstruktion (Ansicht von seitlich oben) mit tatsächlichem Scanweg (orange) Freestyle3D

### GeoSLAM ZEB-REVO

- Knopf an dem Handscanner betätigen und somit den Scanvorgang initialisieren
- Scanweg ablaufen und somit die Räumlichkeiten erfassen

- Knopf erneut an dem Handscanner betätigen und somit den Handscanner deaktivieren
- USB-Stick an den Datenspeicher anschließen, damit die Daten auf ihn übertragen werden
- USB-Stick von dem Datenspeicher entfernen und an den Computer anschließen
- Die Scandaten werden am Computer in die Software geladen
- Die Scandaten werden nach kurzer Ladezeit auf den Computer gespeichert und können geöffnet werden

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 7

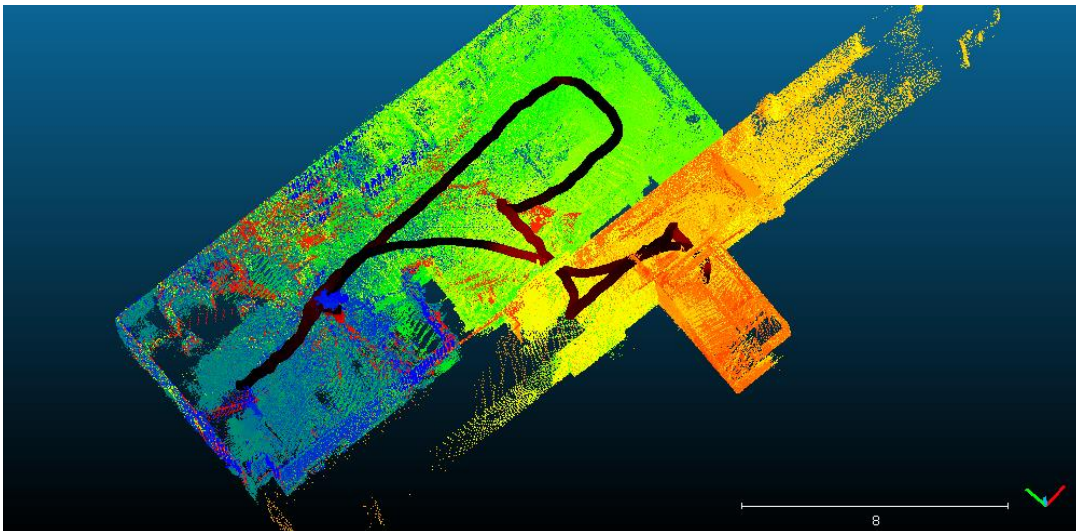


Abbildung 17: 3D Punktwolke und tatsächlicher Scanweg (schwarz) GeoSLAM ZEB-REVO

### Fotogrammetrie mit Digitalkamera

- Fotos machen gemäß Plan. Alle 60cm 3 Fotos (90°, 110°, 70°), Stativ umstellen
- Gemachte Fotos: 336
- Bilder auf den Computer kopieren

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 449

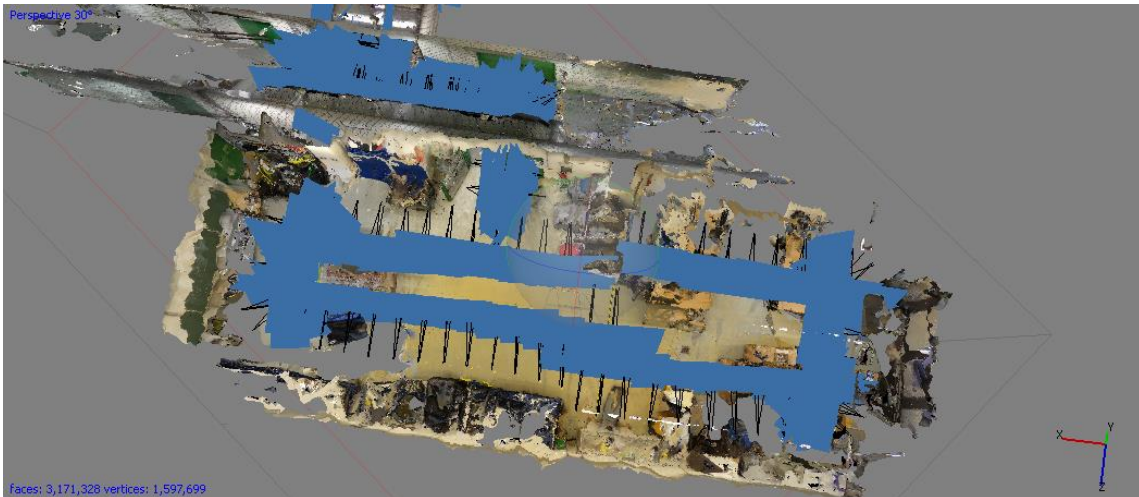


Abbildung 18: Tatsächliche Kamerapositionen

## 4.5 Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware

Die Bedienungsschritte sind in diesem Abschnitt nach Gerät und Software aufgegliedert, diese einzeln aufgezählt und die Ergebnisse abgebildet. Bei den Bearbeitungsschritten ist auch jeweils angegeben, welche Einstellungen in den Programmen genutzt wurden.

### Microsoft Kinect mit FARO Scene

- Projektpunktwolke erstellen

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 1



Abbildung 19: 3D Rekonstruktion nach Nachverarbeitung (Microsoft Kinect + FARO Scene)

### FARO Freestyle mit FARO Scene

- Projektpunktwolke erstellen

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 1



Abbildung 20: 3D Rekonstruktion nach Nachverarbeitung (FARO Freestyle3D + FARO Scene)

### GeoSLAM ZEB-REVO mit CloudCompare

- Decke der Punktwolke abschneiden, damit das Innere der Räumlichkeiten zu sehen ist
- Normale berechnen. Einstellung: Quadrik
- Oberflächenrekonstruktion. Einstellung: Octree Tiefe von 11
- Ausschneiden durch die Funktion „Scalar Field“
- Exportieren des Meshes

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 5

Anmerkung: Es wurde ein Mesh erstellt und nicht direkt die Punktwolke genutzt, da bei der Darstellung der Punktwolke nicht viele Details erkennbar waren. Dies ist in Abbildung 21 zu erkennen.

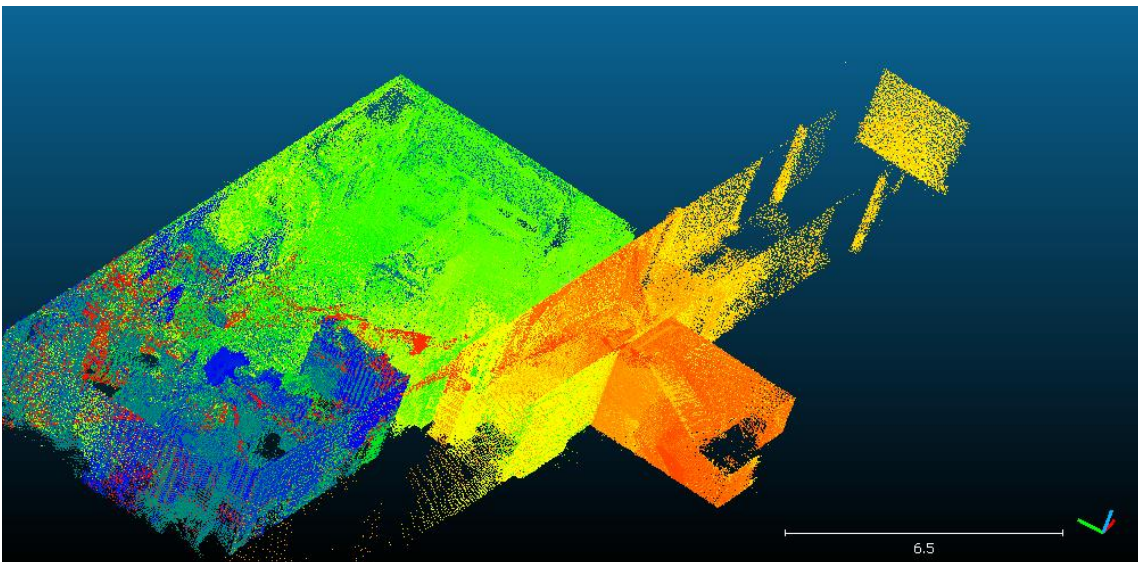


Abbildung 21: 3D Punktwolke GeoSLAM ZEB-REVO

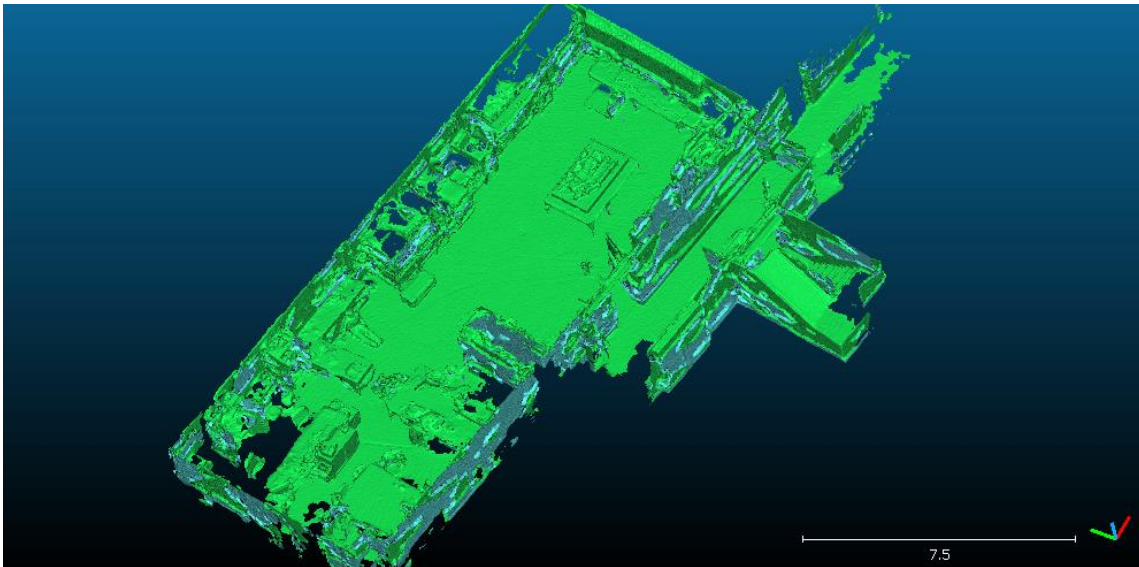


Abbildung 22: 3D Rekonstruktion von GeoSLAM ZEB-REVO nach Erstellung eines Meshes mit CloudCompare

### Fotogrammetrie mit Digitalkamera und Agisoft PhotoScan Professional

- Fotos hinzufügen
- Fotos abgleichen. Einstellung: Mittlere Genauigkeit
- Dichte Punktwolke erzeugen. Einstellung: Mittel
- Mesh erzeugen. Einstellungen: Mittel, Quelldaten: Dichte Punktwolke, Oberflächenart: Frei, Flächenzahl: Hoch
- Textur erzeugen. Einstellungen: Abbildungsmodus: Allgemein, Überlagerungsmodus: Mosaik, Texturgröße: 4096
- Abschneiden der Decke, damit das Einnehmen der Vogelperspektive mit Blick in die Räumlichkeiten möglich ist

Dies macht eine Anzahl an Bedienungsschritten von: 6

Anmerkungen: Es wurden nur 334 Bilder für die Fotogrammetrie genutzt, da zwei der Bilder nicht scharf gestellt waren. Die mittleren Einstellungen in der Nachbearbeitung wurden vorgenommen, da bei hohen Einstellungen die Zeit auf über das doppelte angestiegen wäre. Die Bedienungsschritte sind nach der Anleitung vorgenommen worden (Agisoft LLC 2016, S. 8).

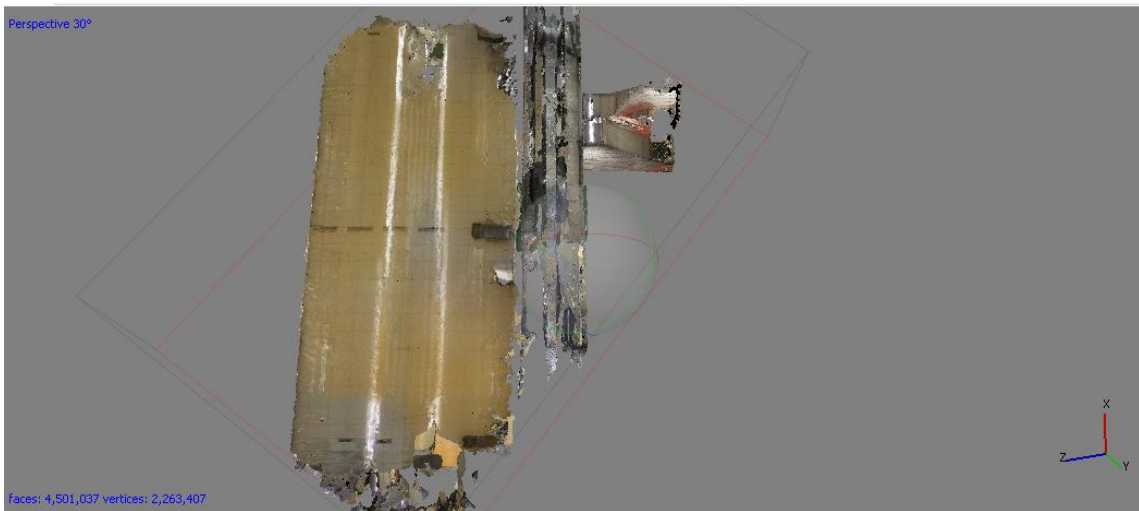


Abbildung 23: 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie mit Decke

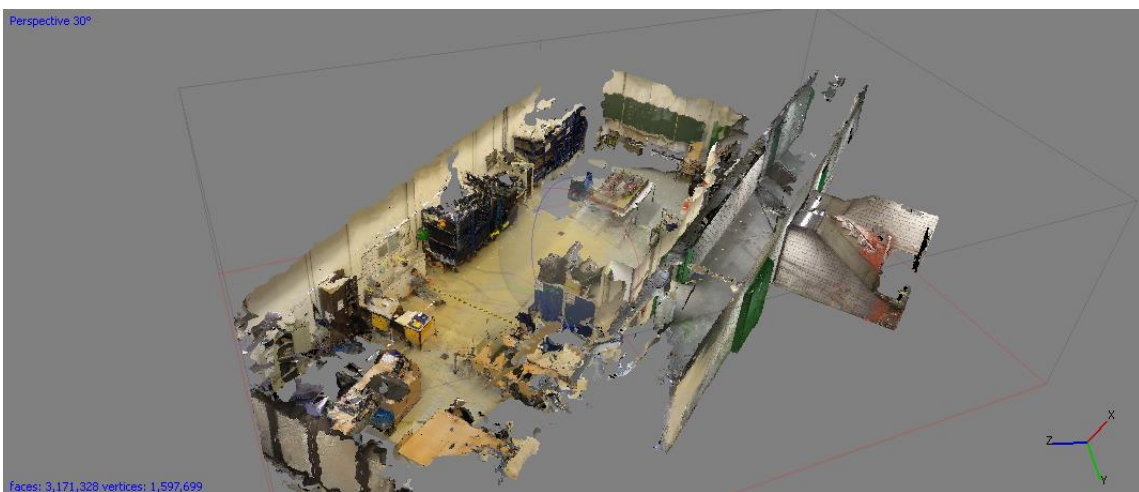


Abbildung 24: 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie ohne Decke

## 4.6 Erkennungsrate einer Person

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Befragungen als Erkennungsrate der Personen dargestellt (Tabelle 7). Danach folgen Abbildungen der Puppe in den 3D Rekonstruktionen.

Tabelle 7: Ergebnisse Erkennungsrate der Person pro System (5 Befragte)

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene	FARO Scene	CloudCompare	Agisoft Photo-Scan Professional
Erkennungsrate in Prozent	100	100	100	100

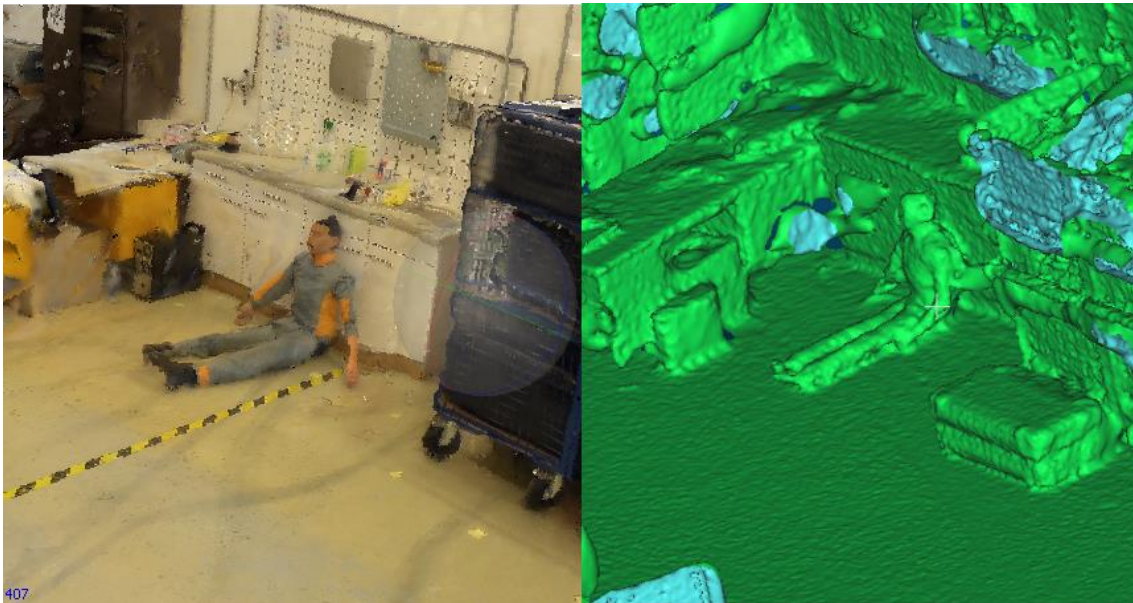


Abbildung 25: Darstellung der Puppe in der 3D Rekonstruktion. Links: Fotogrammetrie; Rechts: ZEB-REVO

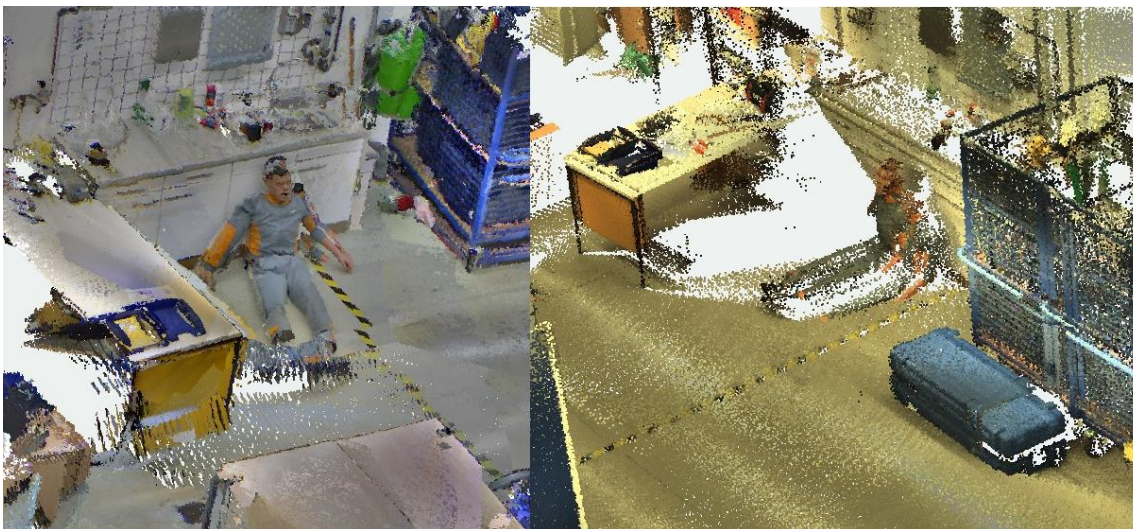


Abbildung 26: Darstellung der Puppe in der 3D Rekonstruktion. Links: Kinect; Rechts: Freestyle3D

## 4.7 Erkennungsrate von Türen/Zugängen

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Befragung als Erkennungsrate dargestellt. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Türen und andere Zugänge in den jeweiligen 3D Rekonstruktionen ersichtlic.

Tabelle 8: Ergebnisse Erkennungsrate von Türen und Zugängen pro System (5 Befragte)

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene	FARO Scene	CloudCompare	Agisoft Photo-Scan Professional
Erkennungsrate in Prozent	100	100	0	100



Abbildung 27: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Fotogrammetrie. Fenster (oben links), Flur mit Türen (oben rechts), Eingangstür Labor (unten)

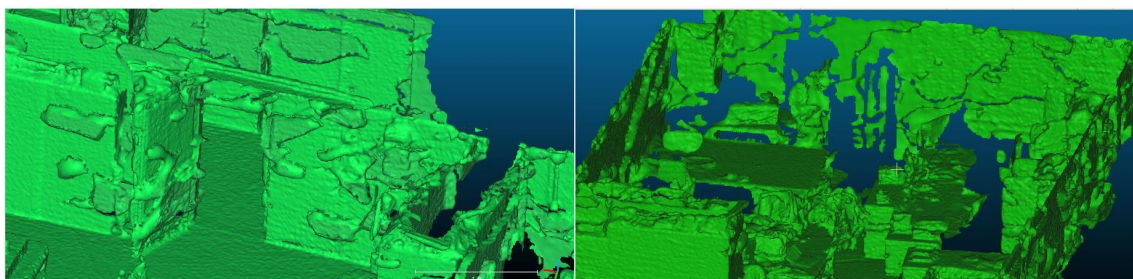


Abbildung 28: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO und CloudCompare. Eingangstür Labor (links), Fenster (rechts)



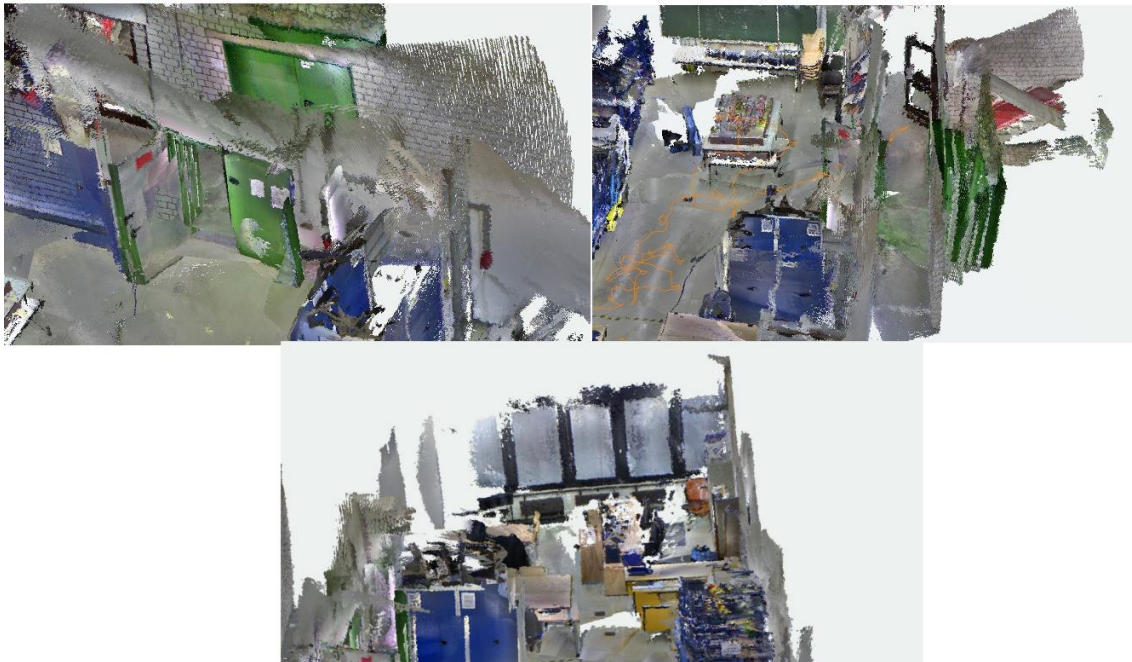


Abbildung 29: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene. Eingangstür Labor (oben links), Flur mit Türen (oben rechts), Fenster (unten)



Abbildung 30: Darstellung der Zugänge in der 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene. Eingangstür Labor und Flur mit Türen (links), Fenster (rechts)

## 4.8 Erkennungsrate von einem Treppenhaus

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Befragung als Erkennungsrate dargestellt. In den nachfolgenden Abbildungen ist das Treppenhaus in den jeweiligen 3D Rekonstruktionen abgebildet.

Tabelle 9: Ergebnisse Erkennungsrate des Treppenhauses pro System (5 Befragte)

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene	FARO Scene	CloudCompare	Agisoft Photo-Scan Professional
Erkennungsrate in Prozent	60	100	100	100



Abbildung 31: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Fotogrammetrie

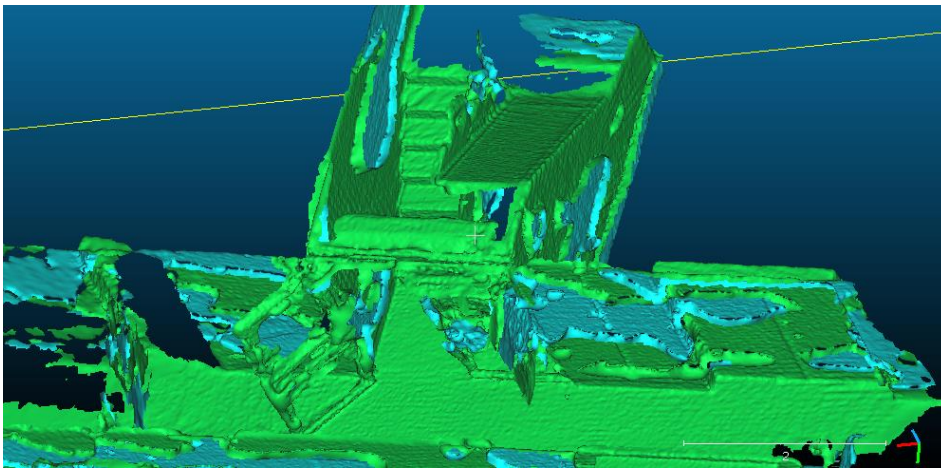


Abbildung 32: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO und CloudCompare



Abbildung 33: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene

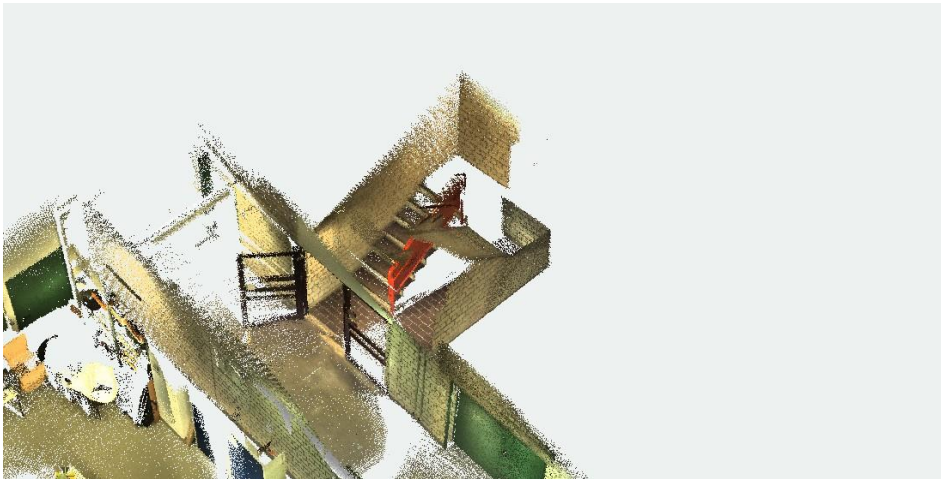


Abbildung 34: Darstellung Treppenhaus in der 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene

## 4.9 Voraussetzung Internetzugang

Während den Versuchsdurchgängen wurde geschaut, ob die Programme ohne einen Internetzugang Ergebnisse bereitstellen können. Um dies sicher zu validieren, wurde während den Bearbeitungen bzw. Berechnungen der Internetadapter des Computers deaktiviert.

Tabelle 10: Ergebnisse Voraussetzung Internetzugang

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene Capture/FARO Scene	FARO Scene Capture/FARO Scene	GeoSLAM Desktop/Cloud Compare	Agisoft Photo-Scan Professional
Voraussetzung Internetzugang	Nein	Nein	Nein	Nein

## 4.10 Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen

Wie schon in der Methodenbeschreibung dargestellt, wird nicht nur ermittelt ob eine Ermittlung von Distanzen mit der Software möglich ist, sondern auch, ob korrekte Maße ausgegeben werden. Dafür wurde jeweils die Eingangstür des Labors in den Programmen gemessen, deren reale Höhe 2,10 m beträgt. Eine Abweichung von 3% wird akzeptiert.

Tabelle 11: Ergebnisse Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen

	Microsoft Kinect	FARO Free-style3D	GeoSLAM ZEB-REVO	Fotogrammetrie mit Digitalkamera
Software	FARO Scene	FARO Scene	GeoSLAM Desktop	Agisoft Photo-Scan Professional
Distanzmessung möglich?	Ja	Ja	Ja	Ja
Gemessene Maße der Eingangstür	2,15m	2,11m	2,15m	3,84m
Maße korrekt?	Ja	Ja	Ja	Nein

Anmerkung: Die Messung von Distanzen war mit den Daten des Laserscanners ZEB-REVO nur innerhalb der Punktwolke und nicht mit dem Mesh möglich. Daher ist diese hier auch nur dargestellt.



Abbildung 35: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion Fotogrammetrie

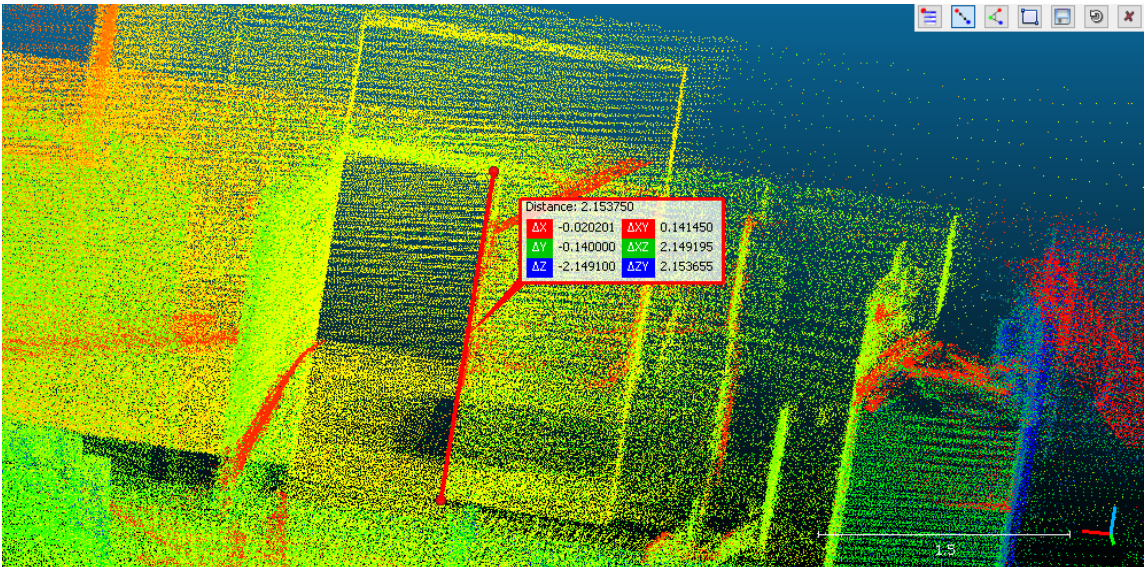


Abbildung 36: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch ZEB-REVO in CloudCompare

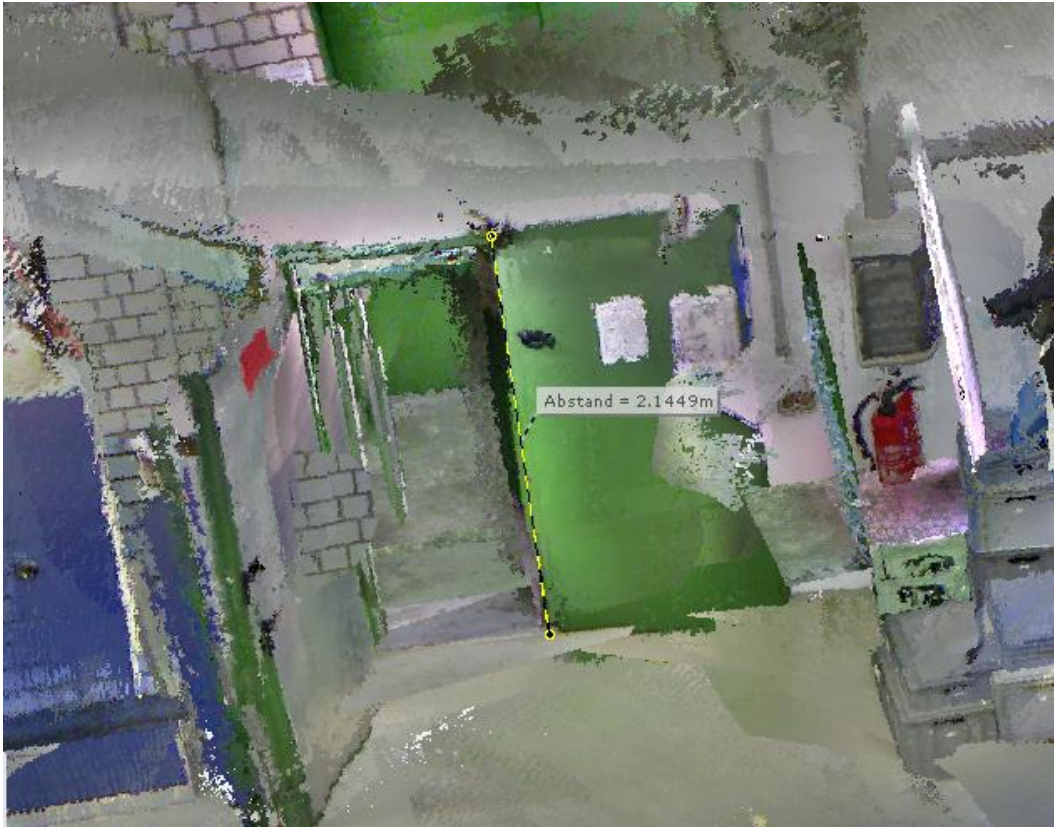


Abbildung 37: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch Kinect und Scene

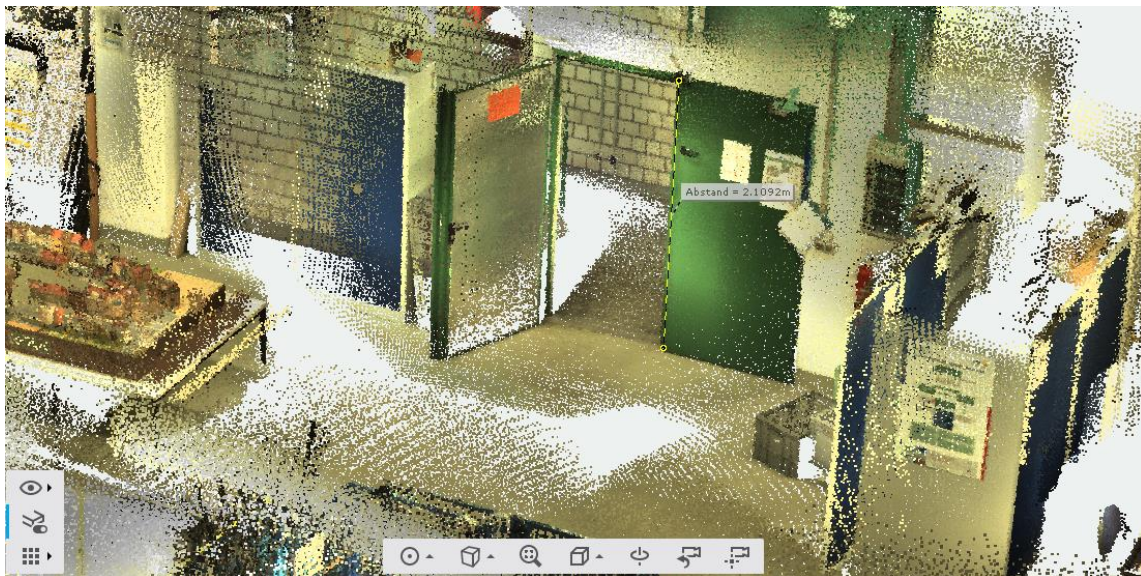


Abbildung 38: Maßangabe Haupteingangstür in 3D Rekonstruktion durch Freestyle3D und Scene

## 5 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche, die in Kapitel 4 dargestellt sind, interpretiert, mit anderen Arbeiten verglichen und in den Kontext der Beurteilungskriterien gebracht bzw. mit den Referenzwerten verglichen, um eine Aussage über die Geeignetheit des jeweiligen Systems zu tätigen. Anschließend erfolgt eine kritische Betrachtung und Beurteilung der Methodik bzw. der Versuchsdurchführung und deren Fehlerquellen.

### 5.1 Interpretation, Vergleich und Ermittlung der Geeignetheit

In diesem Abschnitt erfolgt die Gliederung zunächst nach den Zielgrößen, so wie sich auch die Darstellung in der Ergebnisdarstellung wiederfindet. Diese Ergebnisse werden dann in einer Tabelle mit den Beurteilungskriterien eingepflegt und danach interpretiert.

#### Kosten der Geräte

Bei dem Vergleich der Preise der Geräte stehen vor allem der Microsoft Kinect Sensor und die Digitalkamera mit 129-149,87 Euro hervor, die in Relation sehr günstig zu beschaffen sind. Außerdem sind Digitalkameras ein Massenprodukt, das mittlerweile sehr viele Haushalte besitzen und somit erst gar nicht extra beschafft werden muss. Bei dem Microsoft Kinect Sensor ist das Problem, dass dieser nicht mehr in dieser Version hergestellt wird. Das macht einen Kauf auf dem Gebrauchtmrkt oder durch Restbestände nötig, da die neueste Version des Kinect Sensors in den Versuchen nicht funktioniert hat bzw. nicht in Betrieb genommen werden konnte. Allerdings sind Alternativen, wie das ASUS Xtion (ASUSTeK Computer Inc. 2012), erhältlich.

Das teuerste Gerät ist der GeoSLAM ZEB-REVO mit 30.450 Euro. Dennoch ist dieses Gerät nicht der teuerste 3D Scanner, da manche Geräte beispielsweise um die 45.000 Euro kosten (3D CAD GmbH 2017). Dieser ist somit für kleinere Hilfsorganisationen oder Feuerwehren schwer bezahlbar. Aber es wurden schon andere unbemannte Fahrzeuge mit 3D Laserscannern entwickelt, die preislich weit unter diesem Wert liegen und zwar bei 5000 amerikanischen Dollar (Rejas et al. 2015, S. 948).

Der FARO Freestyle3D rangiert mit seinem Preis von 11.670 bis 13.600 Euro sehr nah an der Referenzgröße des Beurteilungskriteriums „Günstig in der Beschaffung“, die sich auf 11.500 Euro beläuft. Somit können sich vermutlich die meisten Organisationen der Gefahrenabwehr dieses Gerät leisten. Dies ist besonders dann der Fall sein, wenn dieses Gerät gebraucht gekauft werden kann.

#### Zeit des Scanvorgangs bzw. der Erstellung der Fotos

Alle Gräte sind bei der reinen Erfassung unterhalb der Referenzzeit von 108 Minuten. Dazu kommt in der späteren Beurteilung aber noch die Zeit für die jeweilige Nachbearbeitung.

Die kürzeste Zeit hat mit 9 Minuten und 29 Sekunden der Scan mit dem Laserscanner ZEB-REVO in Anspruch genommen. Danach folgen Microsoft Kinect und FARO Freestyle3D, die mit 20 Minuten und 11 Sekunden bzw. 17 Minuten und 7 Sekunden relativ nahe beieinanderliegen. Diese Zeiten sprechen für die Möglichkeit einer schnellen Erkundung, die fast schon innerhalb der Reanimationsgrenze bei Aussetzung von Rauchgasen liegen. Diese beträgt 17 Minuten und sagt aus, dass ab dieser Zeit mit keinem Erfolg bei einer Reanimation zu rechnen ist (Landesfeuerwehrverband Nordrhein-Westfalen e.V. 2001, S. 33).

Mit Abstand am längsten hat die Erstellung der Fotos für die Fotogrammetrie in Anspruch genommen, die sich auf über eine Stunde beläuft (67 Minuten und 11 Sekunden).

Ein Vergleich mit anderen Arbeiten erweist sich als sehr schwierig, da die Zeit der Erfassung besonders von der Größe und Begebenheit der jeweiligen Räumlichkeit abhängt. In einer Arbeit von Zhu et al. (2015) wurde ein kleinerer Raum (7m x 6m) mit einem unbemannten, autonomen Roboter gescannt und dieser brauchte ca. 3 Minuten. Jedoch ist dort auch ersichtlich, dass besonders Böden nicht abgedeckt sind und somit dort auch keine Opfer gefunden werden könnten.

#### Zeit der Nachverarbeitung/Berechnung

Hier fallen im Positiven besonders die Kombinationen von Microsoft Kinect (4 Minuten 1 Sekunde) und FARO Freestyle3D (13 Sekunden) mit der Software FARO Scene auf, deren Nachverarbeitungen sehr schnell waren. Bei dem FARO Freestyle3D kann man bei der kurzen Zeit sogar beinahe von einem Ergebnis in Echtzeit sprechen. Dabei muss auch erwähnt werden, dass die Nachverarbeitung der rohen Ergebnisse mit den Scannern gar nicht zwingend notwendig gewesen wäre und schon den Ergebnissen gleichen, wie direkt nach dem Erfassen. Die Erstellung einer Projektpunktwolke wurde

nur vorgenommen, damit während dem Bewegen des Modells kein irritierendes Ausdünnen der Punktwolke vorkommt. Nach der Bewegung erscheint das Modell wieder in der normalen Rekonstruktionsqualität. Die Schnelligkeit bestätigt sich auch in der Arbeit von Gao und Zhang (2015), bei der die Berechnungen nur ca. eine halbe Sekunde brauchten.

Besonders lange hat die Nachverarbeitung in der Fotogrammetrie mit der Software Agisoft PhotoScan gedauert. Diese brauchte über 38 Stunden (2286 Minuten) und liegt damit schon alleine übermäßig weit über der Referenzzeit, wodurch diese Methode nicht praktikabel für die Gefahrenabwehr ist. Anzumerken ist dabei, dass sich die Zeiten dieser Methode drastisch ändern können. Dies ist davon abhängig, welche Rechenleistung der jeweilige Computer bzw. andere Infrastruktur mit sich bringt. Wie schon in Kapitel 2 erwähnt, existieren heute schon Techniken, die hochauflösende 3D Bilder durch Fotogrammetrie innerhalb von nur wenigen Sekunden bereitstellen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2016). Dennoch dauert es meist mehrere Stunden, wie auch die Arbeit von Koutsoudis et al. (2014) zeigt. Dort hatten die Autoren eine deutlich bessere Rechenleistung zur Verfügung und haben bei deutlich mehr Fotografien (652) eine Berechnungszeit von 26 Stunden gebraucht (Koutsoudis et al. 2014, S. 74–75).

Die Punktwolke des Laserscanners GeoSLAM ZEB-REVO wurde noch in ein Mesh umgewandelt, damit eine bessere Erkennbarkeit der Objekte erreicht wird. Dies hat mit etwas über 21 Minuten etwas länger gedauert als die Nachverarbeitung der Daten von dem Kinect Sensor. Auch diese Zeit ist alleine betrachtet weit unter der Referenzzeit. In einer anderen Arbeit wurde mit dem gleichen Algorithmus und der gleichen Octree Tiefe eine Statue in 28 Minuten berechnet (Kazhdan und Hoppe 2013, S. 9). Mit anderen Berechnungsmethoden ist dies jedoch auch in kürzerer Zeit möglich. In der gleichen Arbeit von Kazhdan und Hoppe haben die Autoren ihre Neuentwicklung des Poisson Algorithmus vorgestellt, der statt 28 Minuten nur etwa 10 Minuten gebraucht hat (Kazhdan und Hoppe 2013, S. 9).

### Bedienungsschritte des Scanvorgangs

Bei der Betrachtung der Ergebnisse hinsichtlich der Bedienungsschritte der Scanvorgänge bzw. der Erstellung der Fotos fällt vor allem auf, dass die Fotogrammetrie mittels Digitalkamera die Referenzzahl von vier erheblich übersteigt und auch erheblich über den Bedienungsschritten der anderen Systeme liegt. Dies spiegelt sich auch in der sehr hohen Erfassungszeit wieder. Es besteht die Möglichkeit, dass weniger Fotos gemacht werden. Dies würde jedoch unter Umständen die Qualität der 3D Rekonstruktion negativ beeinflussen, da durch mehr Bilder auch mehr Referenzpunkte für die Software vorhanden sind. Auch in der Anleitung der Software PhotoScan steht, dass besser mehr als zu wenige Fotos gemacht werden sollten (Agisoft LLC 2016, S. 3). So wurden von dem Kioutouklou Baba Bekctashic Tekke Monument, dessen Höhe 10,62 m und Breite 13,42 m beträgt (3Dicons 2014), von einem Forscherteam 469 Fotos auf dem Boden und 183 Fotos aus der Luft gemacht (Koutsoudis et al. 2014, S. 74). Einen Unterschied



würde es machen, wenn die Erstellung der Fotos automatisch ablaufen würde. Dies ist jedoch zurzeit meist nur für die Außenbetrachtung vorgesehen, wo GPS verfügbar ist.

Die Bedienungsschritte des Kinect Sensors und des Freestyle3D sind mit 3 Schritten noch unter der Referenzgröße und somit für die meisten Personen sehr intuitiv bedienbar.

Der ZEB-REVO benötigt insgesamt sieben Bedienungsschritte und weist somit fast doppelt so viele auf, wie die Referenz es vorgibt. Dies kommt vor allem durch die fehlende Direktverbindung mit dem Computer, wodurch es nötig ist die Scandaten erst auf einem separaten Speicher zu hinterlegen und diese dann auf den Computer zu kopieren. Nun ist das Bedienen eines USB-Sticks nicht weiter kompliziert, aber dennoch können sich bei solchen kleinen Schritten Fehler einschleichen und wenn es nur das Vergessen eben dieses Sticks oder die Nutzung des falschen Sticks ist. Trotz dieser Zahl an Bedienungsschritten konnte der Scanvorgang schneller durchgeführt werden, als es bei Kinect und Freestyle3D möglich war.

Die Bedienungsschritte lassen sich durch eine Autonomie von Drohnen und Robotern erheblich senken. So kann eine Drohne einen einfachen Sprachbefehl, wie etwa zur Erkundung, bekommen, diese dann ausführen und automatisch beenden (Faessler et al. 2016, S. 432). Dies bedeutet, dass dann nur ein einziger Bedienungsschritt nötig ist.

#### Bedienungsschritte der Verarbeitungssoftware

Auch hier sticht die Zahl der Bedienungsschritte von sechs der Software PhotoScan hervor. Diese kann auch nicht mehr kleiner gehalten werden, da diese Bedienungsschritte den allgemeinen Workflow dieser Technologie darstellen (Agisoft LLC 2016, S. 8). Gut ist, dass diese Arbeitsschritte alle in einem Reiter und in der richtigen Reihenfolge dargestellt werden. Aber dennoch sind in diesem Zusammenhang 6 Schritte zu viele Schritte, um in Stresssituationen alles korrekt durchzuführen. In diesem Kontext wäre eine Lösung mit nur zwei Bediensritten wünschenswert, wie etwa Fotos hochladen und danach direkt verarbeiten. Doch auch bei anderer Software sind mehr Schritte notwendig. Bei der Software ReMake von Autodesk sind es beispielsweise mindestens vier Schritte (Online/Offline wählen, Fotos auswählen, Modell erstellen, Modell herunterladen) (Autodesk 2016b).

Nach der Software PhotoScan folgt mit fünf Bedienungsschritten die Nachbearbeitung des Laserscans mit der Software CloudCompare. Dabei ist zu beachten, dass das Mesh nur deshalb erstellt wurde, weil bei der reinen Punktwolke wenig Details zu erkennen waren. Wäre die Punktwolke durch RGB Daten direkt eingefärbt worden, so würden hier vier Schritte entfallen. Dies ist beispielsweise mit Geräten möglich, die zusätzlich eine Digitalkamera besitzen und dementsprechend den Punkten eine Farbe zuordnen können (FARO Technologies Inc. 2011, S. 46). Dennoch erfordert das vorhandene System zu viele Bedienungsschritte, da diese den Referenzwert übersteigen.

Bei beiden Versuchen mit RGB-D-Kameras wurde jeweils nur ein Bearbeitungsschritt vorgenommen. Wie schon erwähnt, wäre dies theoretisch nicht nötig gewesen, da prin-

ziell das Modell schon während des Scans komplett rekonstruiert wurde. So ist es dennoch handhabbarer für den Bediener, dem sich ein konsistenteres Bild bietet.

#### Erkennungsrate einer Person

Bei allen 3D Rekonstruktionen konnten alle Befragten die Person gut erkennen. Somit erfüllen alle Geräte/Software-Kombinationen diese Voraussetzung zu 100%. Dennoch ist ersichtlich, dass bei der Rekonstruktion durch den GeoSLAM ZEB-REVO mit CloudCompare die Erkennung nur durch die gute Exposition der Puppe möglich war. Bei einer Positionierung in einer Umgebung mit mehr Objekten würde die Erkennung um ein Vielfaches schwerer, da die Puppe farblich nicht von der Umgebung zu unterscheiden ist.

#### Erkennungsrate von Türen/Zugängen

Hier erreichten die Kombinationen Kinect/FARO Scene, Freestyle3D/FARO Scene und Digitalkamera/PhotoScan jeweils eine 100%ige Erkennungsrate aller Türen und Fenster, was ein optimales Ergebnis bei dieser Größe darstellt. Teilweise wurden hier die Fenster als Türen identifiziert, was aber das Ergebnis nicht beeinflusst, da dies dennoch Zugänge sind. Außerdem waren die Jalousien vor den Fenstern geschlossen, was zu einer anderen Farbdarstellung der Scheiben in den 3D Rekonstruktionen führt.

Der Laserscanner ZEB-REVO mit der Software CloudCompare erreichte 0% Erkennungsrate, da keiner der Befragten alle Zugänge erkannt hat. Die Schwierigkeiten lagen vor allem bei der geschlossenen Tür im Flur (gegenüber der Haupteingangstür des Labors) und den Fenstern. Dies liegt daran, dass das System keinen farbigen Scan ermöglichte und sich somit die Fenster und Tür nicht von der Wand abheben, da alles die gleiche Farbe hat. Bei Laserscannern mit Farbscan (FARO Technologies Inc. 2011, S. 46) wäre das Ergebnis also besser gewesen.

#### Erkennungsrate von einem Treppenhaus

Bis auf bei der Rekonstruktion mit dem Microsoft Kinect Sensor war das Treppenhaus für alle Befragten klar als solches zu erkennen, wodurch mit diesen z.B. eine Evakuierungsplanung auch über mehrere Stockwerke möglich wäre.

Bei der Rekonstruktion von Kinect/FARO Scene Software wurde nur eine 60%ige Erkennungsrate erzielt. Dies liegt daran, dass bei diesem System einige Dopplungen in der Darstellung vorkommen (siehe Abbildung 39) und deshalb die Umrisse verzerrt werden. Außerdem ist die Auflösung dort zu gering, als dass Treppenstufen gut zu erkennen wären. Bei manchen Befragten wurde das Treppenhaus deshalb eher als Abstellkammer bezeichnet. Durch dieses fehlende Erkennen des Treppenhauses würde in einem Einsatzfall eine taktische Möglichkeit fehlen und somit ist dies ein schwerwiegender Mangel.



Abbildung 39: Dopplungen an einer Tür (links) und niedrige Auflösung Treppenhaus (rechts) aus Rekonstruktion mit Kinect

### Voraussetzung Internetzugang

Alle Programme, die in den Versuchen zum Einsatz kamen, benötigten keinerlei Internetverbindung. Dies ist ein Vorteil, wenn keine Netzwerk-Infrastruktur zur Verfügung steht. So erfüllen alle Systeme das Beurteilungskriterium bezüglich Offline/Online.

Manch andere Programme setzen bei zu geringer Rechenleistung einen Internetzugang voraus, damit auch mit diesen, gute und vor allem schnelleren Ergebnissen erzielt werden. Einer dieser Software ist beispielsweise ReMake von der Firma Autodesk (Autodesk 2016b, S. 9–10), die bei einem Testlauf eine Offlineberechnung nur mit 16 Giga-byte Arbeitsspeicher erlaubte.

### Bereitstellung von korrekten Zusatzinformationen

Alle Programme haben die Möglichkeit geboten die Distanzen in den Modellen zu messen. Jedoch waren die Maße der Eingangstür zum Labor in der Fotogrammetrie-Darstellung um 83% zu hoch angegeben, so dass das Kriterium einer korrekten Angabe nicht gegeben und die Funktion somit unbrauchbar ist. Dabei scheint die Software jedoch auch korrekte Daten liefern zu können. So zeigen Ergebnisse von Koutsoudis et al., die die gleiche Software nutzten, nur Abweichungen von ca. 1cm (Koutsoudis et al. 2014, S. 78) und somit noch bessere Werte als alle Rekonstruktionen, die im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden. Somit scheint es mit der Technik der Fotogrammetrie doch möglich zu sein, diesen Anspruch zu erfüllen.

Die Maßangaben in den anderen Rekonstruktionen blieben innerhalb der 3% Abweichung und beliefen sich maximal auf eine Abweichung von 5cm. Somit können mit diesen Rekonstruktionen gut Maßangaben erhoben werden, die für Planungen notwendig sind. Diese guten Ergebnisse lassen sich noch durch bessere Technik und andere Berechnungsmethoden verbessern. Bei der Vermessung von einem Boot mit einem 3D Laserscanner wurden maximale Abweichungen von nur 6mm zur Realität festgestellt (Abbas et al. 2017, S. 309).

### Ermittlung der Geeignetheit

In Tabelle 12 sind die ermittelten Ergebnisse für die Beurteilungskriterien (Zeilen) pro System (Spalten) eingetragen und farblich so markiert, dass erkennbar ist, ob das Beur-

teilungskriterium erfüllt wurde. Rot steht dabei für eine Nicht-Erfüllung und Grün für ein Erfüllen oder gar besseres Abschneiden bei dem jeweiligen Kriterium. Die Zeiten und Bedienungsschritte sind dort miteinander addiert worden und die Prozentangabe bei dem Kriterium „Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung“ ist das arithmetische Mittel aus den jeweiligen Erkennungsraten.

Tabelle 12: Ermittelte Werte für die Beurteilungskriterien pro Hard- und Softwarekombination

	FARO Freestyle3D + FARO Scene	Microsoft Kinect + FARO Scene	GeoSLAM ZEB-REVO + CloudCompare	Fotogrammetrie + Agisoft PhotoSan
Zeit bis zu einer 3D Darstellung	Insgesamt 17 Minuten und 20 Sekunden	Insgesamt 24 Minuten und 12 Sekunden	Insgesamt 30 Minuten und 43 Sekunden	Insgesamt 2353 Minuten und 11 Sekunden
Leichte Bedienbarkeit (Schritte insgesamt)	Ja (4)	Ja (4)	Nein (12)	Nein (455)
Günstig in der Beschaffung	Bedingt	Ja	Nein	Ja
Qualität der Darstellung/Informationsgewinnung aus der Darstellung	Arithmetischer Mittelwert: 100%	Arithmetischer Mittelwert: 86,67%	Arithmetischer Mittelwert: 66,67%	Arithmetischer Mittelwert: 100%
Offline oder Online	Offline	Offline	Offline	Offline
Lieferung von zusätzlichen Informationen	Ja	Ja	Ja	Ja, aber inkorrekt

Die gelbe Markierung bei dem System FARO Freestyle3D/FARO Scene für das Kriterium „Günstig in der Beschaffung“ bedeutet, dass dieses Kriterium nicht direkt erfüllt wurde. Der Preis ist aber mit 170 Euro Abweichung (1,46%) vernachlässigbar.

Interessant ist, dass es keine eindeutige Korrelation zwischen dem Preis eines Systems und der Erkennungsrate gibt, da die Erkennungsrate bei dem Kinect Sensor höher ist als bei dem teuren ZEB-REVO. Dadurch wird ersichtlich, dass nicht unbedingt teurere Geräte für diesen Zweck angeschafft werden müssen.

Auch gibt es keine Korrelation zwischen der Erkennungsrate und der Zeit, die benötigt wird, um ein solches 3D Modell zu erstellen. Die Erkennungsraten bei der Fotogrammetrie waren zwar bei 100%, doch auch der FARO Freestyle3D mit der RGB-D-Technik hat eine solche Erkennungsrate und hat nur 1,29% der Zeit benötigt.

Somit ist das Gerät FARO Freestyle3D in Kombination mit der Software FARO Scene bzw. FARO Scene Capture das einzige System, das mit seiner verbesserten RGB-D-Technologie als geeignet angesehen werden kann, da es alle Beurteilungskriterien erfüllt. Die Systeme mit Microsoft Kinect und GeoSLAM ZEB-REVO haben das Beurteilungskriterium der Darstellungsqualität nicht erfüllt und da dieses Kriterium zwingend

vorausgesetzt wird, sind diese nicht geeignet. Die Fotogrammetrie ist durch den erheblich hohen Zeitaufwand ungeeignet, da nach dieser Zeitspanne eine Erkundung nur noch wenig Nutzen für die Gefahrenabwehr bringt, da sich die Lage bis dahin weiterentwickelt hat und neue, aktuellere Daten benötigt werden.

Tabelle 13: Beurteilung der Geeignetheit

	FARO Free-style3D + FARO Scene	Microsoft Kinect + FARO Scene	GeoSLAM ZEB-REVO + CloudCompare	Fotogrammetrie + Agisoft PhotoSan
Geeignet?	Ja	Nein	Nein	Nein

## 5.2 Kritische Betrachtung der Methode/Versuche und Fehlerquellen

In den meisten Rekonstruktionen ist es zu Fehlern bzw. nicht abgedeckten Bereichen gekommen. Dies kann dazu führen, dass z.B. Personen, die sich in diesem Bereich befinden, nicht gefunden werden. Dies kann mehrere Gründe haben, die auch nicht im Zusammenhang mit der Technik stehen. So hängt dies entscheidend davon ab, welcher Scanweg gegangen wird, mit welcher Geschwindigkeit und in welche Richtung genau der Scanner gehalten wird. Besonders der Scanweg konnte bei dem Versuch mit dem Microsoft Kinect Sensor nicht gleich gestaltet werden, wie bei den anderen Systemen, was dazu führt, dass eine Vergleichbarkeit an Gewicht verliert und eine unbedingte Wiederholbarkeit eines Experimentes (Kelterborn 1994, S. 8) erschwert wird. Um dennoch eine Wiederholbarkeit zu ermöglichen, wurde in Abschnitt 3.2.3 der abweichende Scanweg angegeben.

Die Ergebnisse können besser sein, wenn die Räumlichkeit länger und umfassender erfasst wird, so dass beispielsweise ein Laserscanner oder eine RGB-D-Kamera eine dichtere Punktwolke erstellen kann. Auch ist eine Live-Vorschau von Vorteil, die schon während des Scans das 3D-Modell zeigt, wodurch erkennbar wird, welche Bereiche noch nicht erfasst wurden. Diese Ansicht, die das Programm FARO Scene Capture bereitstellen kann, wurde jedoch nicht genutzt. Die Problematik einer falschen Scannerführung könnte auch durch eine Erforschung bzw. durch Übungen behoben werden, indem die richtige Scanbewegung bzw. der richtige Scanweg für eine ausreichende Erfassung ermittelt und anschließend geübt bzw. implementiert wird. Eine solche Umsetzung bzw. Einbeziehung der Daten aus Versuchen in die Praxis ist ein wesentlicher Schritt nach einer Versuchsdurchführung, um Prozesse zu optimieren (Quentin 1994, S. 157; Kleppmann 2008, S. 37).

Auch bei der Fotogrammetrie kann es zu anderen Ergebnissen kommen, wenn sich diverse Parameter verändern. Auf Grund der erheblichen Berechnungsdauer wurde auf höhere Qualitätseinstellungen in der Software PhotoScan verzichtet, was unter Umständen zu einer besseren Rekonstruktion, aber auch zu noch längeren Berechnungszeiten, geführt hätte. Außerdem spielt die Anzahl und die Qualität der gemachten Fotos

eine Rolle. Werden mehr Fotos gemacht, so kann das Programm bessere gemeinsame Punkte finden, aber dadurch wird auch die Zeit der Berechnung und die Zeit der physischen Erstellung der Fotos erhöht. Somit ist herauszufinden, ob eine andere Anzahl von Fotos und andere Einstellungen optimalere Ergebnisse erzielen.

Die Zeit bei der Erstellung der Fotos für die Fotogrammetrie ist zu Teilen auch von der persönlichen Arbeitsgeschwindigkeit des Fotografen abhängig und kann deshalb schwer nur auf die Anzahl der zu machenden Fotos zurückgeführt werden. In den Versuchsdurchführungen wurde daher sehr darauf geachtet, dass alle Arbeitsschritte so schnell wie möglich, aber auch immer ordentlich durchgeführt wurden.

Mit einer besseren Hardwarebestückung oder durch Nutzung eines leistungsstärkeren Computers wären einige Berechnungen schneller möglich gewesen. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass in einem Einsatzfall High-End-Rechnersysteme an Einsatzorten zur Verfügung stehen. Zudem ist dieser Punkt nur für die Fotogrammetrie von Belang, die das Beurteilungskriterium bezüglich der Zeit überschritten hat. Diese Überschreitung ist jedoch so vehement, dass wohl auch die Wahl eines leistungsfähigeren Computers nicht zur Erfüllung des Kriteriums geführt hätte, wie auch schon die Betrachtung in Abschnitt 5.1 aufgezeigt hat.

Bei dieser Methodik hat sich als nachteilig erwiesen, dass keine endgültige Aussage darüber getroffen werden kann, ob und welche grundsätzlichen Arten der 3D-Erfassung und Rekonstruktion für die Erkundung von Gebäudeinnenräumen geeignet sind, da nicht alle technischen Möglichkeiten in die Versuchsplanung eingebunden werden konnten. Durch die Fülle an Systemen auf dem Markt, war eine Versuchsdurchführung mit allen Geräten in dieser begrenzten Zeit nicht möglich gewesen und zudem standen dem Autor nicht alle Geräte zur Verfügung. So ist es möglich, dass Systeme, die nicht genutzt wurden, bessere Ergebnisse in dem Versuchsaufbau erzielen und besser für diesen Zweck geeignet sind. Dies gilt ebenso für andere Softwarelösungen. Somit ist in Teilen die externe Validität, die das Maß bezeichnet, mit der ein Ergebnis auch auf andere Gruppen bzw. hier auf andere Systeme übertragen werden können (Eifler 2014, S. 204–205), beeinträchtigt.

## 6 Fazit

Die Forschungsfrage dieser Arbeit ist, ob Technologien zur Erfassung und Rekonstruktion in digitalen 3D-Modellen für die gefahrlose Erkundung und Darstellung von Gebäudeinnenräumen in Notfalleinsätzen geeignet sind. Dies lässt sich hinsichtlich des Systems aus FARO Freestyle3D/FARO Scene mit seiner RGB-D-Technologie mit ja beantworten, da dieses alle Voraussetzungen erfüllt. Es liefert eine 100%ige Erkennungsrate (Personen, Türen, Fenster, Treppen), es ist kostengünstig, liefert korrekte Maßangaben, ist leicht bedienbar, kommt ohne zusätzliche Infrastruktur für Internetverbindun-

gen aus und benötigt eine angemessene Zeit für Scan und Rekonstruktion bzw. liefert schon während der Erfassung Ergebnisse.

Auch wenn die Versuche nicht in einer dunklen Umgebung durchgeführt werden konnten und die Versuchsdurchführungen nicht mit allen anderen, auf dem Markt erhältlichen Systemen (z.B. andere Laserscanner) gearbeitet werden konnte, so ist die RGB-D Technologie die Technik, die für diesen Anwendungszeck am erfolgversprechenden zu sein scheint. Dies ist selbstverständlich noch in realen Szenarien und in Kombination mit anderen Sensoren, wie Gasmessern, und anderen bildgebenden Technologien, wie Wärmebildkameras, zu überprüfen. Zudem muss sich die Technik bezüglich der autonomen Fahrzeuge bzw. Roboter verbessern, damit die Technik unbemannt und zuverlässig in die Gefahrenzonen gebracht werden kann.

Die Fotogrammetrie ist besonders wegen ihres hohen Zeitaufwandes ungeeignet und die Laserscanner-Technologie sollte möglichst direkt in Farbe scannen können, damit diese in der Darstellung von Objekten, die sich nicht direkt von der Umwelt abheben, bessere Ergebnisse erzielt.

Trotz der geringeren Erkennungsrate sticht der Microsoft Kinect Sensor mit seinem sehr günstigen Preis und den ansonsten sehr guten Ergebnissen heraus. Ohne die Fehler in der Darstellung, würde dieses Gerät eine ideale Alternative zur Videoerkundung sein. Dafür müssen die Fehler jedoch z.B. durch bessere, auf diesen Sensor speziell zugeschnittene Software, minimiert werden.

Damit eine komplette Erfassung der Umgebung gelingt, ist es jedoch nötig, dass die richtigen Scanwege und Bewegungen erforscht und geübt werden. Ansonsten kann es zu Gebieten kommen, die nicht erfasst werden und dort wichtige Objekte, wie Personen, übersehen werden. Dafür ist es auch unabdingbar, dass das System keine kabelgebundene Stromversorgung benötigt, die sich nicht behindernd auswirken kann.

Folgende Punkte sind empfohlen zu beachten, wenn eine 3D-Rechnologie für den Erkundungszweck in Gebäudeinnenräumen angeschafft werden soll:

- Geräte müssen mobil und kompakt sein, damit diese einfach in Gebäudeinnenräume transportiert werden können
- Die teuersten Geräte liefern nicht zwingend die besten Ergebnisse
- Die Beurteilungskriterien, die in dieser Arbeit erarbeitet wurden, sind von den Systemen möglichst zu erfüllen
- Ein Training zur Bedienung der Geräte und Software ist, trotz der leichten Bedienung einiger Systeme, zu empfehlen. Dies gilt besonders für die Einhaltung bzw. Ermittlung von korrekten Scanwegen bzw. Bewegungen, damit alle wichtigen Gebiete erfasst werden
- Verschiedene Geräte und Software, auch in Kombination, sollten vor der Beschaffung erprobt werden
- Das Kombinieren mit anderen Sensoren und bildgebenden Technologien ist zu empfehlen

- Autonome Drohen/Roboter sind zu beschaffen, die in der Lage sind die Geräte zu transportieren



# Anhang

## Anhang 1: Anschreiben an Hersteller von Scansystemen

### Jan Bäumer

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Freitag, 20. Januar 2017 16:01  
**An:** 'support+contact@structure.io'  
**Betreff:** Support Bachelor Thesis

Dear Sir or Madam,

My name is Jan Bäumer and I study rescue engineering at the University of Applied Science in Cologne, Germany. At the moment, I am working on my Bachelor Thesis, which examines the technical techniques for 3D detection and reconstruction, and how these are useful for civil protection (e.g. for the Fire Brigade) in exploration of the inside of Buildings. To investigate this, I have to test different systems with regard to certain criteria and thus determine their suitability for this particular application.

In my research, I came across your company and your products "Structure Sensor" and "Canvas" and wanted to ask you if you have the possibility to provide a corresponding device or can it be tested elsewhere? The experiment would only take a maximum of 1 to 2 days and the device will not be damaged. With the device, only the interior of a building will be scanned and reconstructed.

Of course your company would honorably in the thesis.

If you are interested, I would be pleased to provide you with further information on the thesis and the experiment.

I would appreciate a response from you and remain with kind regards.  
Jan Bäumer

### Jan Bäumer

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Freitag, 20. Januar 2017 15:27  
**An:** 'Fragen\_de@lenovo.com'  
**Betreff:** Anfrage Unterstützung Bachelor Thesis

Guten Tag sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Jan Bäumer und ich studiere Rettungsingenieurwesen an der Technischen Hochschule Köln. Zurzeit arbeite ich an meiner Bachelor Thesis, in der ich untersuche, welche technischen Methoden es zur 3D-Erkennung und Rekonstruktion gibt und wie diese für die Gefahrenabwehr (z.B. für die Feuerwehr) bei der Erkundung/Lagedarstellung von Gebäudeinneren nützlich sind. Um dies zu untersuchen, habe ich vor verschiedene Systeme hinsichtlich bestimmter Kriterien zu testen und somit deren Geeignetheit für diesen speziellen Anwendungszweck festzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich auf Ihre Firma und das „Lenovo Phab 2 Pro“ gestoßen, welches Google Tango nutzt und wollte Sie fragen, ob Sie die Möglichkeit haben ein entsprechendes Gerät zur Verfügung zu stellen oder dieses anderweitig getestet werden können/kann? Dieses Gerät würde den aktuellen Kriterien entsprechen und ist somit sehr erfolgsversprechend. Der Versuch würde lediglich maximal 1 bis 2 Tage in Anspruch nehmen und das Gerät wird weder beschädigt und verbleibt in dem Auslieferungszustand. Mit dem Gerät wird nur das Innere eines Gebäudes gescannt und rekonstruiert.

Selbstverständlich würde Ihre Firma in der Thesis lobend erwähnt.

Bei Interesse Ihrerseits kann ich Ihnen gerne noch weitere Informationen zu der Thesis und dem Versuch geben bzw. wäre natürlich auch ein persönliches Gespräch möglich.

Ich würde mich über eine Antwort von Ihnen sehr freuen und verbleibe mit freundlichen Grüßen.

Jan Bäumer

**Jan Bäumer**

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Freitag, 20. Januar 2017 15:31  
**An:** 'info@laserscanning-europe.com'  
**Betreff:** Anfrage Unterstützung Bachelor Thesis

Guten Tag sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Jan Bäumer und ich studiere Rettungsingenieurwesen an der Technischen Hochschule Köln. Zurzeit arbeite ich an meiner Bachelor Thesis, in der ich untersuche, welche technischen Methoden es zur 3D-Erkennung und Rekonstruktion gibt und wie diese für die Gefahrenabwehr (z.B. für die Feuerwehr) bei der Erkundung/Lagedarstellung von Gebäudeinneren nützlich sind. Um dies zu untersuchen, habe ich vor verschiedene Systeme hinsichtlich bestimmter Kriterien zu testen und somit deren Geeignetheit für diesen speziellen Anwendungszweck festzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich auf Ihre Firma und ihrem Angebot an 3D Scannern gestoßen und wollte Sie fragen, ob Sie die Möglichkeit haben ein entsprechendes Gerät, wie z.B. das ZEB-REVO, zur Verfügung zu stellen oder dieses anderweitig getestet werden können/kann? Dieses Gerät würde den aktuellen Kriterien entsprechen und ist somit sehr erfolgsversprechend. Der Versuch würde lediglich maximal 1 bis 2 Tage in Anspruch nehmen und das Gerät wird weder beschädigt und verbleibt in dem Auslieferungszustand. Mit dem Gerät wird nur das Innere eines Gebäudes gescannt und rekonstruiert.

Selbstverständlich würde Ihre Firma in der Thesis lobend erwähnt.

Bei Interesse Ihrerseits kann ich Ihnen gerne noch weitere Informationen zu der Thesis und dem Versuch geben bzw. wäre natürlich auch ein persönliches Gespräch möglich.

Ich würde mich über eine Antwort von Ihnen sehr freuen und verbleibe mit freundlichen Grüßen.

Jan Bäumer

**Jan Bäumer**

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Montag, 23. Januar 2017 17:03  
**An:** 'tango-help@google.com'  
**Betreff:** Support for Bachelor Thesis

Dear Sir or Madam,

My name is Jan Bäumer and I study rescue engineering at the University of Applied Science in Cologne, Germany. At the moment, I am working on my Bachelor Thesis, which examines the technical techniques for 3D detection and reconstruction, and how these are useful for civil protection (e.g. for the Fire Brigade) in exploration of the inside of Buildings. To investigate this, I have to test different systems with regard to certain criteria and thus determine their suitability for this particular application.

In my research, I came across your company and your product „Google Tango“ and wanted to ask you if you have the possibility to provide a corresponding device or can it be tested elsewhere? I also contacted Lenovo, who has the Phab2 Pro as the currently only available device which uses your device. The experiment would only take a maximum of 1 to 2 days and the device will not be damaged. With the device, only the interior of a building will be scanned and reconstructed.

Of course your company would honorably in the thesis.

If you are interested, I would be pleased to provide you with further information on the thesis and the experiment.

I would appreciate a response from you and remain with kind regards.

Jan Bäumer

---

**Jan Bäumer**

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Freitag, 20. Januar 2017 15:48  
**An:** 'info.emea@faro.com'  
**Betreff:** Anfrage Unterstützung Bachelor Thesis

Guten Tag sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Jan Bäumer und ich studiere Rettungsingenieurwesen an der Technischen Hochschule Köln. Zurzeit arbeite ich an meiner Bachelor Thesis, in der ich untersuche, welche technischen Methoden es zur 3D-Erkennung und Rekonstruktion gibt und wie diese für die Gefahrenabwehr (z.B. für die Feuerwehr) bei der Erkundung von Gebäudeinneren nützlich sind, wenn diese nicht betreten werden können. In diesem Fall geht es nicht um Brandursachenermittlung, sondern um den Nutzen während des akuten Einsatzes z.B. nach Erdbeben. Um dies zu untersuchen, habe ich vor verschiedene Systeme hinsichtlich bestimmter Kriterien zu testen und somit deren Geeignetheit für diesen speziellen Anwendungszweck festzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich auf Ihre Firma und Ihre Expertise in 3D Scannern gestoßen, und wollte Sie fragen, ob Sie die Möglichkeit haben ein entsprechendes Gerät, wie z.B. Focus S, Focus 3DX oder Freestyle 3D, zur Verfügung zu stellen oder dieses anderweitig getestet werden können/kann? Dieses Gerät würde den aktuellen Kriterien entsprechen und ist somit sehr erfolgsversprechend. Der Versuch würde lediglich maximal 1 bis 2 Tage in Anspruch nehmen und das Gerät wird nicht beschädigt. Mit dem Gerät wird nur das Innere eines Gebäudes gescannt und rekonstruiert.

Selbstverständlich würde Ihre Firma in der Thesis lobend erwähnt.

Bei Interesse Ihrerseits kann ich Ihnen gerne noch weitere Informationen zu der Thesis und dem Versuch geben bzw. wäre natürlich auch ein persönliches Gespräch möglich.

Ich würde mich über eine Antwort von Ihnen sehr freuen und verbleibe mit freundlichen Grüßen.

Jan Bäumer

---

**Jan Bäumer**

---

**Von:** Jan Bäumer <jbaeumer@th-koeln.de>  
**Gesendet:** Montag, 23. Januar 2017 20:00  
**An:** 'info@cyberport.de'  
**Betreff:** Anfrage Unterstützung Bachelorarbeit

Guten Tag sehr geehrte Damen und Herren,

mein Name ist Jan Bäumer und ich studiere Rettungsingenieurwesen an der Technischen Hochschule Köln. Zurzeit arbeite ich an meiner Bachelor Thesis, in der ich untersuche, welche technischen Methoden es zur 3D-Erkennung und Rekonstruktion gibt und wie diese für die Gefahrenabwehr (z.B. für die Feuerwehr) bei der Erkundung von Gebäudeinneren nützlich sind, wenn diese nicht betreten werden können. In diesem Fall geht es nicht um Brandursachenermittlung, sondern um den Nutzen während des akuten Einsatzes z.B. nach Erdbeben. Um dies zu untersuchen, habe ich vor verschiedene Systeme hinsichtlich bestimmter Kriterien zu testen und somit deren Geeignetheit für diesen speziellen Anwendungszweck festzustellen.

Bei meinen Recherchen bin ich auf Ihren Shop gestoßen, der Partner von Lenovo ist. Lenovo hat das zurzeit einzige Smartphone mit Google Tango, nämlich das Lenovo Phab 2 Plus, welches dementsprechend genau den aktuellen Kriterien entspricht und ist somit sehr erfolgsversprechend. Daher wollte ich Sie fragen, ob Sie die Möglichkeit haben ein entsprechendes Gerät zur Verfügung zu stellen oder dieses anderweitig getestet werden können/kann (Lenovo wurde auch schon von mir kontaktiert)? Der Versuch würde lediglich maximal 1 bis 2 Tage in Anspruch nehmen und das Gerät wird nicht beschädigt. Mit dem Gerät wird nur das Innere eines Gebäudes gescannt und rekonstruiert.

Selbstverständlich würde Ihre Firma in der Thesis lobend erwähnt.

Bei Interesse Ihrerseits kann ich Ihnen gerne noch weitere Informationen zu der Thesis und dem Versuch geben bzw. wäre natürlich auch ein persönliches Gespräch möglich.

Ich würde mich über eine Antwort von Ihnen sehr freuen und verbleibe mit freundlichen Grüßen.

Jan Bäumer

## Anhang 2: Ausgefüllte Dokumentationsbögen der Versuche

# Dokumentationsbogen für Versuchsdurchführung

**Technisches System: Fotogrammetrie**

**Datum der Durchführung: 10.02.2017**

1. Scanvorgang

Bedienungsschritte:

- Abfotografieren gemäß Karte für Kamerapositionen bzw. den Anweisungen
- Alle 60 cm 3 Fotos (90°, 70°, 110°), wie in der Abbildung für die Kamerawinkel
- Somit alle 60 cm: Stativ umstellen, 3 Mal Winkel Einstellen und 3 Mal Fotos machen
- Anzahl der gemachten Bilder: 334
- Bilder auf einen Computer kopieren

Zeit für Scan [min:sek]: 67:11

2. Nachverarbeitung

Software für Nachverarbeitung: Agisoft PhotoScan

Bedienungsschritte:

- **Fotos hinzufügen**
- **Align Fotos (Medium Accuracy) 5 Stunden 44**
- **Dichte Punktwolke erzeugen (mittel) 2 Stunden 42**
- **Mesh erzeugen (Mittel; Quelldaten Dichte Punktwolke; Oberflächenart Frei;Flächenzahl Hoch) 11 Stunden 10**
- **Textur erzeugen (Allgemein, Mosaik, 4096) 15:57**
- **Abschneiden der Decke, damit eine Vogelperspektive möglich ist**

Zeit für Verarbeitung [min:sek]: 1980 + 153 Minuten= 2286 Minuten

Zusatzinformationen:

- Tool für die Ermittlung von Maßen
- 

3. Befragung für Darstellungsqualität

Erkennung der Person: 5 von 5 Befragten

Erkennung der Türen/Zugänge (alle!): 5 von 5 Befragten

Erkennung des Treppenhauses: 5 von 5 Befragten

# Dokumentationsbogen für Versuchsdurchführung

**Technisches System: Freestyle 3D RGB-D Kamera**

**Datum der Durchführung: 17.2.2017**

1. Scanvorgang:

Software für Erfassung: Faro Scene Capture

Bedienungsschritte:

- Knopf an Freestyle betätigen
- Scannen
- Knopf betätigen

Zeit für Scan [min:sek]: 17:07

Zusatzinformationen:

- Maße messen

2. Nachverarbeitung:

Software für Nachverarbeitung: Faro Scene

Bedienungsschritte:

- Projektpunktwolke erstellen

Zeit für Verarbeitung [min:sek]: 13 s

3. Befragung für Darstellungsqualität

Erkennung der Person: 5 von 5 Befragten

Erkennung der Türen/Zugänge (alle!): 5 von 5 Befragten

Erkennung des Treppenhauses: 5 von 5 Befragten

# Dokumentationsbogen für Versuchsdurchführung

**Technisches System: Kinect RGB-D Kamera**

**Datum der Durchführung: 10.2.2017**

4. Scanvorgang:

Software für Erfassung: Faro Scene Capture

Bedienungsschritte:

- Aufnahmeknopf in der Software betätigen
- Räume scannen
- Scan beenden
- Scan wird vom Programm gespeichert (Kein wirklicher Bedienungsschritt)

Zeit für Scan [min:sek]: 20:11 min

Zusatzinformationen:

- Messen von Punktentfernungen, die sehr genau die tatsächlichen Abstände wiedergeben

5. Nachverarbeitung:

Software für Nachverarbeitung: Faro Scene

Bedienungsschritte:

- Projektpunktwolke erstellen

Zeit für Verarbeitung [min:sek]: \_4:01\_\_\_\_\_

Zusatzinformationen:

- Messen von Punktentfernungen, die sehr genau die tatsächlichen Abstände wiedergeben

6. Befragung für Darstellungsqualität mit Nachverarbeitung:

Erkennung der Person: 5 von 5 Befragten

Erkennung der Türen/Zugänge (alle!): 5 von 5 Befragten

Erkennung des Treppenhauses: 3 von 5 Befragten

# Dokumentationsbogen für Versuchsdurchführung

**Technisches System: GeoSlam ZEB REVO Laserscanner**

**Datum der Durchführung: 17.2.2017**

1. Scanvorgang

Software für Erfassung: GeoSlam Desktop (Offline)

Bedienungsschritte:

- Knopf an Handscanner betätigen
- Scannen
- Knopf an Handscanner betätigen
- USB an Speichereinheit
- USB an PC
- Scandaten in Software laden
- Save AS

Zeit für Scan [min:sek]: 9:29

2. Nachverarbeitung

Software: CloudCompare

Bedienungsschritte:

- Decke abschneiden von Punktwolke 9s
- Compute Normals Triangulär 4:31(Quadric) 15:35
- Surface Reconstruction (Octree Depth 11) 3:38
- Ausschneiden durch Scalar field 10s
- Exportieren des Meshes 10s

Zeit für Verarbeitung [min:sek]: 21:14

Zusatzinformationen:

- Abstandsmessung in Cloud-Darstellung

3. Befragung für Darstellungsqualität (5 Befragte)

Erkennung der Person: 5 von 5 Befragten

Erkennung der Türen/Zugänge (alle!): 0 von 5 Befragten

Erkennung des Treppenhauses: 5 von 5 Befragten

# Quellenverzeichnis

## Literaturverzeichnis

3D CAD GmbH (2017): FARO Hardware 3D Laserscanner & Zubehör. Nürnberg. Online verfügbar unter <http://www.3dcad-gmbh.de/3d-laserscan/laserscanner-kauf-miete/3d-laserscan-system-kaufen.html>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2017, zuletzt geprüft am 27.02.2017.

3Dicons (2014): Kutuklu Baba Tekkesi -. Heritage Asset. Athena Research Centre. Online verfügbar unter [http://3d\\_icons.ipet.gr/3dicons/index.php?id=ARC3DICONNS\\_3D\\_1Kiou&res=UL](http://3d_icons.ipet.gr/3dicons/index.php?id=ARC3DICONNS_3D_1Kiou&res=UL), zuletzt geprüft am 28.02.2017.

Abbas, Mohd Azwan; Lichti, Derek D.; Chong, Albert K.; Setan, Halim; Majid, Zulkepli; Lau, Chong Luh et al. (2017): Improvements to the accuracy of prototype ship models measurement method using terrestrial laser scanner. In: *Measurement* 100, S. 301–310. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.12.053.

Agisoft LLC (2016): Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 1.2. Online verfügbar unter [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2017.

Ahmad, Alexandre; Balet, Olivier; Himmelstein, Jesse; Boin, Arjen; Schaap, Maaïke; Brivio, Paolo et al. (2012): Interactive Simulation Technology for Crisis Management an Training: The INDIGO Project. In: Leon Rothkrantz, Jozef Ristvej und Zeno Franco (Hg.): ISCRAM 2012 conference proceedings book of papers. 9th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management. Vancouver: Simon Fraser University.

AlHaza, T.; Alsadoon, A.; Alhusinan, Z.; Jarwali, M.; Alsaif, K. (2015): New Concept for Indoor Fire Fighting Robot. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 195, S. 2343–2352. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.191.

Amazon (o.J.): Xbox 360 - Kinect Sensor inkl. Kinect Adventures. Online verfügbar unter <https://www.amazon.de/Xbox-360-Kinect-Sensor-Adventures/dp/B003H4QT7Y>, zuletzt geprüft am 26.02.2017.

Arnold, Jörg; Braun, Marcel (2007): 3D-Scanner und Fotogrammetrie in der Forensik. 3D-Unfallaufnahmeverfahren. In: *POLZEI-heute* (3), S. 108–112.

ASUSTeK Computer Inc. (2012): ASUS Xtion. User Manual. Online verfügbar unter [http://dlcdnet.asus.com/pub/ASUS/MM/Xtion\\_Pro/U6929\\_Xtion\\_user\\_manual.zip](http://dlcdnet.asus.com/pub/ASUS/MM/Xtion_Pro/U6929_Xtion_user_manual.zip), zuletzt geprüft am 27.02.2017.

Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung (2008): Feuerwehrdienstvorschrift 3. FwDV 3, vom 21.02.2008.



Autodesk (2016a): Autodesk 123D Catch | Generate 3d model from photos. Online verfügbar unter <http://www.123dapp.com/catch>, zuletzt geprüft am 06.02.2017.

Autodesk (2016b): Autodesk Remake. Getting Started Guide.

Axelsson, Peter (1999): Processing of laser scanner data—algorithms and applications. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), S. 138–147. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00008-8.

Bezirksregierung Köln (2017): 3D-Gebäudemodelle. Online verfügbar unter [http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/hoeihenmodelle/3d\\_gebaeudemodelle/index.html](http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoeihenmodelle/3d_gebaeudemodelle/index.html), zuletzt aktualisiert am 16.01.2017, zuletzt geprüft am 29.01.2017.

Boin, Arjen; Bynander, Fredrik; Pintore, Giovanni; Ganovelli, Fabio; Leventakis, George; Ahmad, Alexandre; Balet, Olivier: Building an IT platform for strategic crisis management preparation. In: 2014 IEEE 10th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). Larnaca, Cyprus, S. 20–27.

DIN 14675, 01.04.2012: Brandmeldeanlagen - Aufbau und Betrieb, zuletzt geprüft am 01.02.2017.

BrandSchutz/Deutsche Feuerwehrzeitung (Hg.) (2015): Das Feuerwehr-Lehrbuch. Grundlagen - Technik - Einsatz ; 104 Tabellen. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer (BrandSchutz).

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hg.) (2013): BBK-Glossar. Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes. Deutschland. Stand/Auflage 02/2013. Bonn (Praxis im Bevölkerungsschutz, 8). Online verfügbar unter [http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis\\_Bevoelkerungsschutz/Band\\_8\\_Praxis\\_BS\\_BBK\\_Glossar.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_8_Praxis_BS_BBK_Glossar.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 05.03.2017.

Chen, Liang-Chien; Wu, Chia-Hao; Shen, Tzu-Sheng; Chou, Chien-Cheng (2014): The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 45, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2014.01.003.

Chong, T. J.; Tang, X. J.; Leng, C. H.; Yogeswaran, M.; Ng, O. E.; Chong, Y. Z. (2015): Sensor Technologies and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). In: *Procedia Computer Science* 76, S. 174–179. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.336.

Dai, Angela; Nießner, Matthias; Zollhöfer, Michael; Izadi, Shahram; Theobalt, Christian (2016): BundleFusion: Real-time Globally Consistent 3D Reconstruction using On-the-fly Surface Re-integration.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2016): In 2 Sekunden zum 3D-Modell. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Online verfügbar unter

[http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10376/684\\_read-18927#/gallery/23972](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10376/684_read-18927#/gallery/23972), zuletzt aktualisiert am 05.08.2016, zuletzt geprüft am 03.02.2017.

Domeyer GmbH & Co. KG (2017): Rosenbauer Wärmebildkameras. Argus 4. Online verfügbar unter [https://www.gfd-katalog.com/domeyer\\_bremen/pdf](https://www.gfd-katalog.com/domeyer_bremen/pdf), zuletzt aktualisiert am 20.02.2017, zuletzt geprüft am 20.02.2017.

Eichler, Hermann (2011): Hämotherapeutische Versorgung der schweren Blutung. Universitätsklinikum Saarland. Online verfügbar unter [http://www.uniklinikum-saarland.de/fileadmin/UKS/Einrichtungen/Kliniken\\_und\\_Institute/Chirurgie/Haemostaseologie/Studentisches/Hauptvorlesung\\_Chirurgie\\_Haemostaseologie\\_II\\_\\_WS11\\_12.pdf](http://www.uniklinikum-saarland.de/fileadmin/UKS/Einrichtungen/Kliniken_und_Institute/Chirurgie/Haemostaseologie/Studentisches/Hauptvorlesung_Chirurgie_Haemostaseologie_II__WS11_12.pdf), zuletzt aktualisiert am 22.11.2011, zuletzt geprüft am 16.02.2017.

Eifler, Stefanie (2014): Experiment. In: Nina Baur und Jörg Blasius (Hg.): Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer VS, S. 195–209.

Elgan, Mike (2016): How Google's Project Tango will change your life. Online verfügbar unter <http://www.computerworld.com/article/3018733/mobile-wireless/how-googles-project-tango-will-change-your-life.html>, zuletzt aktualisiert am 04.01.2016, zuletzt geprüft am 06.02.2017.

Emili, Katrin (2016): Unbemannte Luftfahrtsysteme im Bevölkerungsschutz. Anwendungsmöglichkeiten und rechtliche Beschränkungen. Crisis Prevention. Online verfügbar unter <http://crisis-prevention.de/bos-katastrophenschutz/unbemannte-luftfahrtsysteme-im-bevoelkerungsschutz>, zuletzt aktualisiert am 03.08.2016, zuletzt geprüft am 27.01.2017.

Faessler, Matthias; Fontana, Flavio; Forster, Christian; Mueggler, Elias; Pizzoli, Matia; Scaramuzza, Davide (2016): Autonomous, Vision-based Flight and Live Dense 3D Mapping with a Quadrotor Micro Aerial Vehicle. In: *J. Field Robotics* 33 (4), S. 431–450. DOI: 10.1002/rob.21581.

FARO Technologies Inc. (2011): FARO Laser Scanner Focus3D. Manual.

FARO Technologies Inc. (2016): Freestyle3D und Software. Bedienungsanleitung.

Feuerwehr- und Katastrophenschutzschule Rheinland-Pfalz (2010): Lehrgang: Truppmannausbildung Teil 1. Gefahren an der Einsatzstelle. Verhalten bei Gefahr. Online verfügbar unter [http://internet.lfks-rlp.de/fileadmin/user\\_upload/Redakteur/kreisausbildung/grundausbildung/folienvorlagen/Teil%207%20Verhalten%20bei%20Gefahr.pps](http://internet.lfks-rlp.de/fileadmin/user_upload/Redakteur/kreisausbildung/grundausbildung/folienvorlagen/Teil%207%20Verhalten%20bei%20Gefahr.pps), zuletzt geprüft am 27.01.2017.

DIN 14095, 01.05.2007: Feuerwehrpläne für bauliche Anlagen, zuletzt geprüft am 01.02.2017.

Fireboard GmbH (2016): Die Lage übersichtlich dargestellt mit dem Lagekarten-Modul. Online verfügbar unter [http://fireboard.net/fileadmin/media/Entdecken/Lagekarte/Fireboard\\_Modul\\_Lagekarte.pdf](http://fireboard.net/fileadmin/media/Entdecken/Lagekarte/Fireboard_Modul_Lagekarte.pdf), zuletzt geprüft am 03.02.2017.

- FLIR Systems (2016): Benutzerhandbuch FLIR Kx5-Serie. Online verfügbar unter <http://80.77.70.144/DocDownload/Assets/dl/t559946-de-de.pdf>, zuletzt geprüft am 16.02.2017.
- FliteTest (2016): 3D Mapping - Intro to Drone Deploy. Online verfügbar unter <http://flitetest.com/articles/intro-to-drone-deploy>, zuletzt aktualisiert am 14.03.2016, zuletzt geprüft am 06.02.2017.
- Furukawa, Yasutaka; Hernández, Carlos (2013): Multi-View Stereo. A Tutorial. In: *FNT in Computer Graphics and Vision* 9 (1-2), S. 1–148. DOI: 10.1561/06000000052.
- Gao, Xiang; Zhang, Tao (2015): Robust RGB-D simultaneous localization and mapping using planar point features. In: *Robotics and Autonomous Systems* 72, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.robot.2015.03.007.
- GeoSLAM Ltd (2015): A Survey REVOLUTION. Introducing the ZEB-REVO mobile indoor mapping system. Online verfügbar unter <http://www.geoslam.com/wp-content/uploads/2015/11/ZEB-REVO-Brochure-v1.0.2.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2017.
- GeoSLAM Ltd (2017a): GeoSLAM Desktop. V3. SLAM registration at your fingertips. Online verfügbar unter <http://geoslam.landmark.com.gr/wp-content/uploads/2017/02/GeoSLAM-Desktop-V3-Brochure.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2017.
- GeoSLAM Ltd (2017b): ZEB-REVO - Lightweight Revolving Laser Scanner. Online verfügbar unter <http://www.geoslam.com/hardware-products/zeb-revo/>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2017, zuletzt geprüft am 20.02.2017.
- Giovanni Pintore; Enrico Gobbetti; Fabio Ganovelli; Paolo Brivio (2012): 3DNSITE: A networked interactive 3D visualization system to simplify location awareness in crisis management. In: *Proceedings of the 17th International Conference on 3D Web Technology*, S. 59–67.
- Girardeau-Montaut, Daniel (2015): CloudCompare. User Manual. Version 2.6.1. Online verfügbar unter <http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2017.
- Google (2017): Tango. Online verfügbar unter <https://get.google.com/tango/>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2017, zuletzt geprüft am 06.02.2017.
- Grottke, Oliver; Frietsch, T.; Maas, M.; Lier, H.; Rossaint, R. (2013): Handlungsempfehlung. Umgang mit Massivblutungen und assoziierten perioperativen. In: *Anästhesiologie & Intensivmedizin* 54, S. 147–157, zuletzt geprüft am 15.02.2017.
- Hamp, Quirin; Reindl, Leonhard; Henning, Jörg; Gorgis, Omar; Chen, Ling; Zhang, Rui et al. (2012): I-LOV Abschlussbericht. Intelligentes, sicherndes Lokalisierungssystem für die Rettung und Bergung von Verschütteten. Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg.

- Hedman, Peter; Ritschel, Tobias; Drettakis, George; Brostow, Gabriel (2016): Scalable inside-out image-based rendering. In: *ACM Trans. Graph.* 35 (6), S. 1–11. DOI: 10.1145/2980179.2982420.
- Herbold, Ralf (2000): Technische praxis und wissenschaftliche Erkenntnis. Bielefeld: Books On Demand.
- Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (2012): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Praxis). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-8635-4>.
- Hirtl, Nicole (2009): Genauigkeitsuntersuchung Terrestrischer Laserscanner zur Dokumentation von Restaurierungsarbeiten. Diplomarbeit. Technischen Universität Wien, Wien. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung. Online verfügbar unter [https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_182015.pdf](https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_182015.pdf), zuletzt geprüft am 05.02.2017.
- Höfer & Bechtel GmbH (2012): Laserscanning 3.0 – eine junge Technologie wird erwachsen. In: *In Kürze* (7), S. 1–6. Online verfügbar unter [http://www.hoeferbechtel.de/IN%20KUERZE/Ausgaben%20IN%20KUERZE/InK%C3%BCrze\\_07\\_120724\\_einzel.pdf](http://www.hoeferbechtel.de/IN%20KUERZE/Ausgaben%20IN%20KUERZE/InK%C3%BCrze_07_120724_einzel.pdf), zuletzt geprüft am 05.02.2017.
- Holowko, Elwira; Januszkiewicz, Kamil; Bolewicki, Pawel; Sitnik, Robert; Michonski, Jakub (2016): Application of multi-resolution 3D techniques in crime scene documentation with bloodstain pattern analysis. In: *Forensic science international* 267, S. 218–227. DOI: 10.1016/j.forsciint.2016.08.036.
- InGeoForum; Kommission 3D-Stadtmodelle: 3D-Stadtmodelle. Online verfügbar unter <http://www.ingeoforum.de/files/3d-stadtmodelle.pdf>, zuletzt geprüft am 24.01.2017.
- Institut der Feuerwehr NRW (2015): Das Lagedarstellungssystem NRW. Eine Einführung in das Taktische Arbeitsblatt. Online verfügbar unter [http://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/lagedarstellungssystem\\_nrw/einfuehrung\\_in\\_das\\_taktische\\_arbeitsblatt\\_v1.pdf](http://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/lagedarstellungssystem_nrw/einfuehrung_in_das_taktische_arbeitsblatt_v1.pdf), zuletzt aktualisiert am 19.05.2015, zuletzt geprüft am 03.02.2017.
- Jianhao, Du; Meiqin, Liu; Weihua, Sheng (2015): Efficient exploration for real-time robot indoor 3D mapping. In: Qianchuan Zhao (Hg.): 34th Chinese Control Conference (CCC), 2015. 34th Chinese Control Conference (CCC). Hangzhou, China, 28 - 30 Juli 2015. Kongzhi-Lilun-Zhuanye-Weiyuanhui; Chinese Control Conference; CCC; Zhongguo Kongzhi Huiyi. Piscataway, NJ: IEEE, S. 6078–6083.
- Kalyan, T. Sri; Zadeh, Puyan A.; Staub-French, Sheryl; Froese, Thomas M. (2016): Construction Quality Assessment Using 3D as-built Models Generated with Project Tango. In: *Procedia Engineering* 145, S. 1416–1423. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.178.
- Kang, Sing Bing; Li, Yin; Tong, Xin; Shum, Heung-Yeung (2006): Image-Based Rendering. In: *FNT in Computer Graphics and Vision* 2 (3), S. 173–258. DOI: 10.1561/06000000012.

- Kazhdan, Michael; Hoppe, Hugues (2013): Screened poisson surface reconstruction. In: *ACM Trans. Graph.* 32 (3), S. 1–13. DOI: 10.1145/2487228.2487237.
- Keller, Philipp; Maass, Thorsten; Reichard, Marcus; Witte, Daniel (2012): Wärmebildkameras im Einsatz. WBK-Ausbilderhandbuch Feuerwehr. 1. Aufl. Köln. Online verfügbar unter [http://www.ff-ladis.at/docs/WBK\\_Ausbilderhandbuch\\_Feuerwehr\\_1.1.pdf](http://www.ff-ladis.at/docs/WBK_Ausbilderhandbuch_Feuerwehr_1.1.pdf), zuletzt geprüft am 16.02.2017.
- Kelterborn, Peter (1994): Was ist ein wissenschaftliches Experiment? In: *Anzeiger AEAS*, S. 7–9.
- Kleppmann, Wilhelm (2008): Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren. 5., überarb. Aufl. München, Wien: Hanser (Praxisreihe Qualitätswissen).
- Kohler, Christian (2016): Shopping Mall, Switzerland - Thunderhead Engineering. Thunderhead Engineering. Online verfügbar unter <http://www.thunderheadeng.com/2016/02/shopping-mall-switzerland/>, zuletzt geprüft am 31.01.2017.
- Kongar, Indranil; Esposito, Simona; Giovinazzi, Sonia (2017): Post-earthquake assessment and management for infrastructure systems. Learning from the Canterbury (New Zealand) and L'Aquila (Italy) earthquakes. In: *Bull Earthquake Eng* 15 (2), S. 589–620. DOI: 10.1007/s10518-015-9761-y.
- Koutsoudis, Anestis; Vidmar, Blaž; Ioannakis, George; Arnaoutoglou, Fotis; Pavlidis, George; Chamzas, Christodoulos (2014): Multi-image 3D reconstruction data evaluation. In: *Journal of Cultural Heritage* 15 (1), S. 73–79. DOI: 10.1016/j.culher.2012.12.003.
- Krause, Ole (2017): Mitteilung von Preisen der Geräte. Köln, 20.02.2017. E-Mail an Jan Bäumer.
- Kulich, Miroslav; Juchelka, Tomáš; Přeučil, Libor (2015): COMPARISON OF EXPLORATION STRATEGIES FOR MULTI-ROBOT SEARCH. In: *Acta Polytech* 55 (3), S. 162–168. DOI: 10.14311/AP.2015.55.0162.
- Lai, Chun C.; Su, Kuo L. (2016): Development of an intelligent mobile robot localization system using Kinect RGB-D mapping and neural network. In: *Computers & Electrical Engineering*. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2016.04.018.
- Landesfeuerwehrverband Nordrhein-Westfalen e.V. (2001): Hinweise und Empfehlungen für die Anfertigung von Brandschutzbedarfsplänen für die Gemeinden des Landes Nordrhein-Westfalen. Version 6.0.
- Large, Andrew R. G.; Heritage, George L. (2009): Principles of 3D Laser Scanning. In: George L. Heritage und Andrew R. G. Large (Hg.): *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell, 31-30.
- Laserscanning Europe (Hg.) (2017): Funktionsweise eines Laserscanners. Online verfügbar unter <http://www.laserscanning-europe.com/de/glossar/funktionsweise-eines-laserscanners>, zuletzt aktualisiert am 05.02.2017, zuletzt geprüft am 05.02.2017.

Lenovo (2016): Lenovo Phab 2 Pro | The World's First Google Tango-Enabled Smartphone | Lenovo® US. Online verfügbar unter <http://shop.lenovo.com/us/en/tango#phone>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2017, zuletzt geprüft am 06.02.2017.

Litomisky, Krystof (2012): Consumer RGB-D Cameras and their Applications. University of California. Online verfügbar unter <http://alumni.cs.ucr.edu/~klitomis/files/RGBD-intro.pdf>, zuletzt geprüft am 06.02.2017.

Liu, J.; Ma, B.-Y.; Fry, N.; Pickering, A.; Whitehead, S.; Somjit, N. et al. (2015): Exploration Robots for Harsh Environments and Safety. In: *IFAC-PapersOnLine* 48 (10), S. 41–45. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.08.105.

Microsoft Corporation (2010): Kinect Sensor. Handbuch und Garantie. Online verfügbar unter [http://download.microsoft.com/download/0/C/2/0C21CEBE-0031-489E-966E-513E6070995A/kinect\\_en\\_fr-FR\\_de-DE\\_it-IT\\_es-ES.pdf](http://download.microsoft.com/download/0/C/2/0C21CEBE-0031-489E-966E-513E6070995A/kinect_en_fr-FR_de-DE_it-IT_es-ES.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2017.

Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr Nordrhein-Westfalen (2016): Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten. SBauVO, vom 05.01.2017.

Ministerium für Inneres und Kommunales NRW (10.03.1999): Feuerwehrdienstvorschrift 100. FwDV 100, zuletzt geprüft am 27.01.2017.

Mittelblöck, Manfred; Knoth, Laura; Vockner, Bernhard: 3D-Enterprise-Geodateninfrastruktur- Basis für die transparente, kontextbasierte Informationsbereitstellung im Indoor- /Outdoor-Bereich. In: *AGIT - Journal für angewandte Geoinformatik*, 2-2016, S. 173–178.

Newcombe, Richard A.; Davison, Andrew J.; Izadi, Shahram; Kohli, Pushmeet; Hilliges, Otmar; Shotton, Jamie et al. (2011): KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking. In: 2011 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Basel, 26.-29.10.2011, S. 127–136.

Occipital (2014): STRUCTURE SENSOR & SDK. Fact Sheet. Online verfügbar unter <https://www.poligonmuhendislik.com/wp-content/uploads/2016/07/FactSheet-StructureSensor-SDK.pdf>, zuletzt geprüft am.

Ondruska, Peter; Kohli, Pushmeet; Izadi, Shahram (2015): MobileFusion: real-time volumetric surface reconstruction and dense tracking on mobile phones. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 21 (11), S. 1251–1258. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2459902.

Optical Survey Equipment (2017): FARO Scanner Freestyle 3D. Online verfügbar unter <http://surveyequipment.com/faro-scanner-freestyle-3d/>, zuletzt geprüft am 01.03.2017.

Pan, Hailong; Guan, Tao; Luo, Yawei; Duan, Liya; Tian, Yuan; Yi, Liu et al. (2016): Dense 3D reconstruction combining depth and RGB information. In: *Neurocomputing* 175, S. 644–651. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.10.104.

- Peng, Tao; Gupta, Satyandra K. (2007): Model and Algorithms for Point Cloud Construction Using Digital Projection Patterns. In: *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* 7 (4), S. 372. DOI: 10.1115/1.2798115.
- Popescu Raluca, Claudia; Lungu, Arian (2014): Real-Time 3D Reconstruction Using a Kinect Sensor. In: *Computer Science and Information Technology* 2 (2), S. 95–99.
- Quentin, Horst (1994): Versuchsmethoden im Qualitäts-Engineering. Braunschweig: Vieweg (Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagement).
- Rauner, Felix (1985): Experimentierendes Lernen in der technischen Bildung. In: Klaus Steffens (Hg.): Experimentelle Statik an Fachhochschulen. Didaktik, Technik, Organisation, Anwendung, Bd. 6. Alsbach/Bergstr.: Leuchtturm-Verl. (Hochschuldidaktische Materialien M, 6), S. 15–29.
- Rejas, José-Ignacio; Sanchez, Alberto; Glez-de-Rivera, Guillermo; Prieto, Manuel; Garrido, Javier (2015): Environment mapping using a 3D laser scanner for unmanned ground vehicles. In: *Microprocessors and Microsystems* 39 (8), S. 939–949. DOI: 10.1016/j.micpro.2015.10.003.
- Rivas Casado, Monica; Leinster, Paul (2017): Using drones for catastrophe situation reporting and damage assessment. Cranfield University. Online verfügbar unter <https://www.cranfield.ac.uk/som/sitecore/content/university/home/research-projects/drones-catastrophe-relief>, zuletzt geprüft am 27.01.2017.
- Rosenbauer International AG (2015): EMEREC. Informationsmanagement für Einsatzkräfte. Online verfügbar unter [http://www.rosenbauer.com/fileadmin/sharepoint/products/telematics/emerec/Dokument\\_e/Prospekte\\_und\\_Datenblätter/EMEREC/Prospekt\\_EMEREC\\_DE.pdf](http://www.rosenbauer.com/fileadmin/sharepoint/products/telematics/emerec/Dokument_e/Prospekte_und_Datenblätter/EMEREC/Prospekt_EMEREC_DE.pdf), zuletzt geprüft am 03.02.2017.
- Sauer, Joachim (2013): Kompaktkamera Maginon SZ 24 bei Aldi Süd im Angebot - PC Magazin. pc-magazin. Online verfügbar unter <http://www.pc-magazin.de/news/kompaktkamera-maginon-sz-24-aldi-sued-angebot-1907384.html>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2013, zuletzt geprüft am 26.02.2017.
- Scharstein, D.; Szeliski, R. (2003): High-accuracy stereo depth maps using structured light. In: CVPR 2003: Computer Vision and Pattern Recognition Conference. Madison, WI, USA, 18-20 June 2003, S. 195–202.
- Schöps, Thomas; Sattler, Torsten; Häne, Christian; Pollefeys, Marc (2016): Large-scale outdoor 3D reconstruction on a mobile device. In: *Computer Vision and Image Understanding*, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.cviu.2016.09.007.
- Seitz, S. M.; Curless, B.; Diebel, J.; Scharstein, D.; Szeliski, R. (2006): A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. In: Cordelia Schmid, Stefano Soatto und Carlo Tomasi (Hg.): 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition workshops. CVPR workshops ; New York, New York, USA, 17 - 22 June 2006. 2006 IEEE Computer Society Conference on

Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 1 (CVPR'06). New York, NY, USA, 17-22 June 2006. Computer Society. Piscataway, NJ: IEEE, S. 519–528.

Sra, Misha; Garrido-Jurado, Sergio; Schmandt, Chris (2016): Procedurally generated virtual reality from 3D reconstructed physical space. In: Dieter Kranzlmüller und Gudrun Klinker (Hg.): Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology, VRST 2016. München, Deutschland, 2-4.11.2016, S. 191–200.

Staatliche Feuerweherschule Würzburg (Hg.) (2008): Taktikschema. Merkblatt für die Feuerwehren Bayerns. 14. Aufl. Staatliche Feuerweherschule Würzburg. Online verfügbar unter [http://www.sfs-w.de/downloads/merkblaetter-broschueren.html?no\\_cache=1&download=05\\_05\\_2011-07-14.pdf&did=36](http://www.sfs-w.de/downloads/merkblaetter-broschueren.html?no_cache=1&download=05_05_2011-07-14.pdf&did=36), zuletzt geprüft am 01.02.2017.

Stadt Köln (Hg.) (2016): Haushalt 2016/2017. Band 1. Köln. Online verfügbar unter [http://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/pdf20/2016-2017/haushaltsplan\\_2016\\_2017\\_band\\_1.pdf](http://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/pdf20/2016-2017/haushaltsplan_2016_2017_band_1.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2017.

Stock, Boris; Wallasch, Karl (2008): Das Fire Dynamics Simulator Handbuch. Brandsimulationen mit FDS. 1. Aufl. Norderstedt: Books On Demand.

Striebel, Hans W. (2015): Operative Intensivmedizin. Sicherheit in der klinischen Praxis ; mit 273 Tabellen. 2., komplett überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Schattauer. Online verfügbar unter [http://www.schattauer.de/fileadmin/assets/buecher/Musterseiten/9783794524808\\_kap2.pdf](http://www.schattauer.de/fileadmin/assets/buecher/Musterseiten/9783794524808_kap2.pdf).

Stumpf, A.; Malet, J.-P.; Allemand, P.; Pierrot-Deseilligny, M.; Skupinski, G. (2015): Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. In: *Geomorphology* 231, S. 130–145. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.10.039.

Supra Foto-Elektronik-Vertriebs-GmbH (2013): MAGINON SZ 24. Bedienungsanleitung. Online verfügbar unter [http://www.supra-electronics.com/typo3/?eID=pi\\_dl&urn=urn%3Adoc%3API%3ACustItemAbstractBranded\\_404%3AMaginon%2520SZ%252024%2520BDA%2520DE.pdf](http://www.supra-electronics.com/typo3/?eID=pi_dl&urn=urn%3Adoc%3API%3ACustItemAbstractBranded_404%3AMaginon%2520SZ%252024%2520BDA%2520DE.pdf), zuletzt geprüft am 20.02.2017.

Taurob GmbH (2016): Taurob Tracker. Ex - geschützter Roboter für gefährliche Einsätze. Online verfügbar unter [http://taurob.com/wp-content/uploads/TAUROB\\_Roboter\\_web.pdf](http://taurob.com/wp-content/uploads/TAUROB_Roboter_web.pdf), zuletzt geprüft am 27.01.2017.

Thelen, Susanne; Gullotta, Giulio (2014): 3D-Druck im Bevölkerungsschutz? Gedanken über eine gar nicht mehr so neue Technik. In: *Bevölkerungsschutz* (1), S. 45–48.

Thill, Jean-Claude; Dao, Thi Hong Diep; Zhou, Yuhong (2011): Traveling in the three-dimensional city. Applications in route planning, accessibility assessment, location ana-



lysis and beyond. In: *Journal of Transport Geography* 19 (3), S. 405–421. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2010.11.007.

Thomas, Diego; Sugimoto, Akihiro (2016): Modeling large-scale indoor scenes with rigid fragments using RGB-D cameras. In: *Computer Vision and Image Understanding*. DOI: 10.1016/j.cviu.2016.11.008.

Trometer, Stefan; Mensinger, Martin (2014): Simulation von Detonationsszenarien im urbanen Umfeld. In: Thomas H. Kolbe (Hg.): *Geoinformationssysteme 2014*. Beiträge zur 1. Münchner GI-Runde ; [der Runder Tisch GIS e.V. an der Technischen Universität München ... lädt am 24. und 25. Februar 2014 ... zur Münchner GI-Runde 2014 ein]. Berlin: Wichmann, S. 150–164.

Tully, David; Rhalibi, Abdennour; Carter, Christopher; Sudirman, Sud (2015): Hybrid 3D Rendering of Large Map Data for Crisis Management. In: *IJGI* 4 (3), S. 1033–1054. DOI: 10.3390/ijgi4031033.

Vivekandan, S.; Santhosh, G.; Jarnarth Kumar, S.; Shiva Shankar, S.; Vinod Kumar, S. (2016): A Novel Camera Based Mobile Robot With Obstacle Avoidance And Fire Extinguish Control. In: *Int. Journal of Engineering Research and Applications* 6 (4), S. 5–7.

Wagner, Herbert (2011): *Thermografie. Sicher einsetzen bei der Energieberatung, Bauüberwachung und Schadensanalyse : mit 46 Tabellen*. Köln: R. Müller.

Wang, Dongshu; Wang, Haitao; Liu, Lei (2016): Unknown environment exploration of multi-robot system with the FORDPSO. In: *Swarm and Evolutionary Computation* 26, S. 157–174. DOI: 10.1016/j.swevo.2015.09.004.

Zarre, Doris (2016): Canvas App by Occipital Lets You Take 3D Scans of Your Home to Create CAD Files - 3Printr.com. Online verfügbar unter <https://www.3printr.com/canvas-app-occipital-lets-take-3d-scans-home-create-cad-files-0944067/>, zuletzt aktualisiert am 15.11.2016, zuletzt geprüft am 28.01.2017.

Zhang, Zhengyou (2012): Microsoft Kinect Sensor and Its Effect. In: *IEEE Multimedia* 19 (2), S. 4–10. DOI: 10.1109/MMUL.2012.24.

Zhu, Cheng; Ding, Rong; Lin, Mengxiang; Wu, Yuanyuan (2015): A 3D Frontier-Based Exploration Tool for MAVs. In: 2015 IEEE 27th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). Vietri sul Mare, Italy, S. 348–352.

Zlatanova, Sisi; Vosselman, George (2015): Smart 3D indoor models to support crisis management in large public buildings. SIMs3D (Smart Indoor Models in 3D). Online verfügbar unter [http://www.sims3d.net/publications/pdfs/2015/M4S\\_SIMs3D\\_fullproposal\\_web.pdf](http://www.sims3d.net/publications/pdfs/2015/M4S_SIMs3D_fullproposal_web.pdf), zuletzt geprüft am 03.02.2017.

# Persönliche Erklärung

Ich versichere, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Köln,

**Ort, Datum**

**Unterschrift**