



**LOKALISIERUNG VON MOBILEN**

**ROBOTERSYSTEMEN IM HOCHBAU**

**MITTELS LIDAR-TECHNOLOGIE**

**Institut für Digitales und Autonomes Bauen**  
**Institut für Technische Logistik**

**TUHH**  
*Technische Universität Hamburg*

  
**Hamburg**

Abschlussbericht zur Kurzstudie

LOKALISIERUNG VON MOBILEN  
ROBOTERSYSTEMEN IM HOCHBAU MITTELS  
LiDAR-TECHNOLOGIE

**Technische Universität Hamburg**

Institut für Digitales und Autonomes Bauen

Institut für Technische Logistik



Hamburg

Behörde für  
Stadtentwicklung  
und Wohnen

TUHH

# Inhalt

<b>Grußwort</b> .....	<b>3</b>
<b>Management Summary</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Status quo zu Baufortschrittskontrollen und Bauwerksinspektionen .....	5
1.2 Motivation und Problemstellung .....	6
1.3 Ziel der Studie.....	8
<b>2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund</b> .....	<b>9</b>
2.1 LiDAR-Sensoren .....	9
2.2 Lokalisierung mobiler Roboter.....	10
<b>3 Methode und Technik</b> .....	<b>12</b>
3.1 Untersuchungsmethode.....	12
3.2 Verwendete Technik.....	14
3.2.1 LiDAR-Sensoren und Lokalisierungssoftware .....	14
3.2.2 Motion-Capture-System.....	16
3.3 Testfeld und Messszenarien .....	17
3.4 Analyse der Lokalisierungsdaten .....	19
<b>4 Testergebnisse</b> .....	<b>21</b>
4.1 LiDAR-Sensor: Ouster OS0.....	21
4.1.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit .....	22
4.1.2 Kartenerstellung durch SLAM .....	25
4.2 LiDAR-Sensor: Velodyne Puck Lite .....	26
4.2.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit .....	26
4.2.2 Kartenerstellung durch SLAM .....	29
4.3 LiDAR-Sensor: Slamtec RPLidar A3M1 .....	29
4.3.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit .....	30
4.3.2 Kartenerstellung durch SLAM .....	32
4.4 LiDAR-Sensor: Slamtec RPLidar A2M8.....	33
4.4.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit .....	33
4.4.2 Kartenerstellung durch SLAM .....	35
<b>5 Vergleich und Analyse der untersuchten LiDAR-Sensoren</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Fazit und Ausblick</b> .....	<b>39</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>41</b>
<b>Impressum</b> .....	<b>42</b>

## Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser,

moderne Stadtentwicklung ist ohne Digitalisierung, genauer: ohne digital erstellte und verarbeitete Daten undenkbar geworden. Beim Bau zeigt sich wie nahezu überall: Alte Branchen sind im Umbruch, neue Verfahren und Wissensgebiete, neue Berufsfelder und ganze Wirtschaftszweige entstehen, von denen noch vor wenigen Jahren kaum jemand etwas ahnte.



Neue Kooperationen und der globale Austausch von Ideen und Köpfen eröffnen nie dagewesene Möglichkeiten.

Nicht selten gänzlich neue Blickwinkel und ungeahnte Fortschritts-Sprünge eröffnen sich durch den Umgang mit Geo- und Mobilitätsdaten ebenso wie mittels digitaler Bauleitplanung und der BIM-Modellierung bis hin zu den noch lange nicht ausgeschöpften Chancen der Digitalisierung für die Bürgerbeteiligung an öffentlichen Planungsprozessen – um nur einige wenige Stichworte zu nennen.

Hamburg und die Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen sind bei der Gestaltung dieses Zeitenwandels führend und kooperieren auf nationaler wie internationaler Ebene bei der Entwicklung von Pilotprojekten und neuen Technologien. Der Nutzen soll der gesamten Bevölkerung zugutekommen, Verwaltungen, Unternehmen und Bürgerinnen und Bürgern.

Die vorliegende Kurzstudie zielt in der Analyse bestehender Arbeitsvorgänge und mit experimentellen Untersuchungen auf direkt praxisbezogene Anwendungen, nämlich den Einsatz mobiler Robotersysteme im Hochbau. Untersucht wurde deren möglichst exakte Lokalisierung im Inneren von Gebäuden mithilfe optischer Sensoren. Damit lassen sich Baufortschritte womöglich in nicht allzu ferner Zukunft automatisiert oder sogar autonom überprüfen.

Es freut mich sehr, dass die vorliegende Studie zu diesem vielversprechenden Thema in Zusammenarbeit mit unserer Behörde entstanden ist. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre und danke allen Beteiligten der TU Hamburg und der Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen für ihre verdienstvolle Arbeit.



Dr. Dorothee Stapelfeldt  
Senatorin für Stadtentwicklung und Wohnen

## Management Summary

Da die Digitalisierung auch in der Baubranche immer weiter voranschreitet, finden sich in vielen Bereichen bzw. für viele Prozesse bereits vermehrt Ansätze zur Automatisierung. Großes Potenzial für digital gesteuerte Abläufe liefern beispielsweise Bauwerksbegehungen und Bauwerksinspektionen, für die heute schon mobile Roboter eingesetzt werden. Für einen wirtschaftlichen Einsatz innovativer Technologien ist es jedoch erforderlich, dass die verwendeten Maschinen die Arbeiten weitgehend automatisiert oder sogar vollständig autonom ausführen. Hier spielt die Lokalisierung digitaler Arbeitsgeräte eine wichtige Rolle. Um den aktuellen Stand von Technologien darzulegen, die für die Verortung von Robotern grundlegend relevant sind, wird in der vorliegenden Kurzstudie die Lokalisierung von vierbeinigen Laufrobotern mittels LiDAR-Sensoren (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) untersucht. Bei diesen Sensoren handelt es sich um vielseitig einsetzbare Scanner für optische Abstandsmessungen.

Die Kurzstudie zeigt Forschungsergebnisse, die sich neben der Analyse grundlegender Dokumentationsprozesse im Hochbau auch auf Genauigkeitsmessungen beziehen. Es wurden Abläufe und Technologien analysiert, die für Lokalisierungsvorgänge von mobilen Laufrobotern in Gebäuden in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen werden. Mithilfe von Abstandsmessungen konnten Erkenntnisse zu verschiedenen Lasermessgeräten sowie zur Präzision von mobilen Dokumentationsprozessen erzielt werden. Durch die Untersuchung von insgesamt vier Sensoren konnten darüber hinaus wertvolle Aufschlüsse über Unterschiede in der Lokalisierungsgenauigkeit gewonnen werden.

Die in dieser Kurzstudie eingesetzten LiDAR-Sensoren sind als Messeinheit auf mobile Laufroboter montierbar, so dass sie während Messdurchläufen die direkte Umgebung der Roboter anhand Abstandsmessungen erfassen können. Im Hochbau betrifft dies bspw. nicht nur das Erkennen von Wänden oder Öffnungen, sondern auch das Wahrnehmen spezifischer Bauteile wie Türen oder Fenster, aber insbesondere auch das Erfassen temporär vorhandener Objekte, z. B. Personen. In der vorliegenden Kurzstudie wurden diesbezüglich Positionsdaten ermittelt, mit denen sich Roboter vor Ort eigenständig lokalisieren bzw. zurechtfinden können.

Die vier LiDAR-Sensoren wurden in einem eigens für die Kurzstudie errichteten Testfeld untersucht. Mit jedem Sensor konnten drei Testszenarien durchgeführt werden. Es zeigten sich deutliche Unterschiede beim Ausgleich verschiedener Einflüsse. Generell ist festzuhalten, dass durch die Integration von Daten zusätzlicher Sensoren deutlich bessere Lokalisierungsergebnisse erzielt wurden. Außerdem spielte die Laufgeschwindigkeit für die Qualität der Lokalisierung des mobilen Laufroboters eine große Rolle.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird empfohlen, weitere Untersuchungen mit LiDAR-Sensoren durchzuführen. In weiterführenden Analysen sollte der Fokus nicht nur auf der automatisierten Steuerung von Robotern liegen; auch die Ausstattung mit weiteren Sensoren sowie ein Vergleich unterschiedlicher SLAM-Software zur Lokalisierung ist anzustreben.

# 1 Einleitung

## 1.1 Status quo zu Baufortschrittskontrollen und Bauwerksinspektionen

Regelmäßige Zustandskontrollen spielen in den Lebenszyklen verschiedener Bauwerke stets eine zentrale Rolle. Schon während der Bauausführung erfolgen definierte Kontrollen und Prüfungen, um beispielsweise die einzelnen Baufortschritte zu überwachen bzw. diese zu dokumentieren. So können mithilfe regelmäßiger Begehungen nicht nur Störungen im geplanten Bauablauf behoben werden, auch beugen diese Kontrollmaßnahmen potenziellen Fehlern und damit möglichen Schäden vor. Aber auch nach Abschluss der Bauphase müssen Bauwerke regelmäßig gesichtet werden. So sind beispielsweise während des Betriebs von Infrastrukturbauwerken und öffentlichen Gebäuden stets Inspektionen notwendig, damit eine ausreichende Sicherheit gewährleistet wird.

Welche Aspekte bei Bauwerksbegehungen erfasst und inwiefern diese anschließend ausgewertet werden, hängt in erster Linie vom gewählten Prüfvorgang ab. So verfolgen beispielsweise Baufortschrittskontrollen das primäre Ziel, den aktuellen Bauzustand zu erfassen. Die Aufnahme einer gegenwärtigen Situation – häufig auch als Ist-Zustand bezeichnet – hilft insbesondere bei einem Vergleich mit dem angestrebten Soll-Zustand. Bei Kontrollen vor Ort werden Bauwerke und Bauteile hinsichtlich der vorgesehenen Materialien und Konstruktionen in Bezug auf die geplanten und tatsächlichen Zustände abgeglichen. Ebenfalls kann auch die Einhaltung des angesetzten Zeitplans überprüft werden. Bei Bedarf lassen sich Zeitpläne entsprechend durch regelmäßige Baufortschrittskontrollen anpassen. Ein damit einhergehender und für den weiteren Verlauf von Projekten wesentlicher Vorteil liegt insbesondere darin, dass Probleme und Widersprüche frühzeitig aufgedeckt werden können. Als Erweiterung zu den Baufortschrittskontrollen finden Bauwerksinspektionen während des Betriebs von Bauwerken statt, z. B. zur Erfassung baulicher Maßnahmen oder zur Dokumentation des Status quo. Die mit diesen Prozessen einhergehenden – und bestenfalls zeitlich definierten – Prüfungen helfen insbesondere dabei, unvorhergesehene Schäden frühzeitig zu erkennen, sodass notwendige Schritte zur Behebung eingeleitet werden können. Übergeordnet spielen hier Tragwerkssicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Bauwerke eine wesentliche Rolle.

Abhängig vom Bauwerk selbst – aber vielfach auch von der Sichtweise der Beteiligten – werden die Ergebnisse von Bauwerksbegehungen häufig auf unterschiedliche Art und Weise dokumentiert. So ist es u. a. üblich, Schriftstücke, wie Listen und Protokolle, zu erstellen. Darüber hinaus werden i. d. R. auch Fotografien als häufig eingesetztes Mittel zur Dokumentation aktueller Bauwerkszustände genutzt (Golparvar-Fard et al., 2011). Die Dokumente werden zwar häufig zentral abgelegt, beispielsweise in einem Bautagebuch (z. B. während der Bauausführung) oder einem Bauwerksbuch (z. B. im Betrieb), jedoch besteht die Gefahr, dass die Informationen, die je nach Personal auf unterschiedliche Art und Weise gesammelt werden durch eine nicht vorhandene Verknüpfung untereinander unzureichend festgehalten werden. Darüber hinaus finden klare Zuordnungen von Daten und Dokumenten

häufig nur unter subjektiven Gesichtspunkten statt: Je mehr Personen an einem Bauvorhaben bzw. dessen Überwachung beteiligt sind, desto mehr Möglichkeiten gibt es, die verschiedenen Prozesse zu planen und festzuhalten.

## 1.2 Motivation und Problemstellung

Bei den bereits erwähnten und manuell ausgeführten Fortschrittskontrollen und Inspektionen von Bauwerken sind Expert\*innen damit beauftragt, relevante Vorkommnisse zu sichten und diese zu dokumentieren. In vielen Fällen sind die Aufgaben jedoch sehr zeitintensiv und fehleranfällig, beispielsweise weil die je nach Disziplin ausgerichteten Inspektionen von der jeweiligen Expertise des eingesetzten Personals abhängig sind. Des Weiteren können An- und Abfahrten zu den zu prüfenden Bauwerken viel Zeit in Anspruch nehmen. Darüber hinaus sind in Abhängigkeit von der Art der Bauwerke ebenfalls aufwändige Vorkehrungen zu treffen, z. B. der Einsatz spezifischer Messgeräte oder die notwendige Nutzung von Arbeitsbühnen. Nicht nur, dass Menschen einzelne Fälle von Vorkommnissen verschiedenartig bewerten, es besteht zudem die Gefahr, dass falsche Einschätzungen vorgenommen werden oder dass die Fehleranfälligkeit von komplexen Dokumentationsprozessen ansteigt. So können unter Umständen nicht nur inkonsistente Datenaufzeichnungen, sondern stellenweise auch Informationslücken entstehen, z. B. wenn etwas übersehen wurde. Entsprechende Vorkommnisse wirken sich stets negativ auf nachstehende Datenanalysen bzw. auf die Auswertung der Kontrollen aus. Sie beeinflussen letztendlich die von den Expert\*innen gezogenen Schlüsse für notwendige Maßnahmen oder Anpassungen. Um eine hohe Qualität zu gewährleisten spielt zudem neben der eigentlichen Expertise des eingesetzten Personals auch der Faktor Zeit eine wesentliche Rolle.

Eine Möglichkeit, qualitativ hochwertige Ergebnisse im Rahmen wirtschaftlicher Inspektionen zu erzielen, ist der Einsatz innovativer Robotersysteme. Mithilfe technologiebasierter Vorgänge können unterschiedliche Arten mobiler Roboter vor Ort projektspezifische Dokumentationsprozesse nachhaltig unterstützen (Nguyen et al., 2019; Spencer et al., 2019). Durch die Verwendung verschiedenartiger Robotersysteme ist es möglich, Bauwerke automatisch aufnehmen zu lassen und die zuvor erwähnte Fehleranfälligkeit zu minimieren. Bei der Nutzung von Robotern für Inspektionen muss jedoch die Zuordnung der aufgenommenen Daten mit den verschiedenen Datenaufnahmepositionen (Positionen in der Umgebung, in der sich der Roboter bewegt) sichergestellt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine gute Datenqualität wichtig ist. Exakte Positionsbestimmungen und somit die daraus ableitbaren Lokalisierungen der eingesetzten mobilen Roboter in ihrer Umgebung sind demnach eine Grundvoraussetzung für den Einsatz digitaler Bauwerksinspektionen.

Eine zuverlässige Lokalisierung ist aktuell vor allem beim Einsatz mobiler Roboter im Außenbereich erforscht. Die Nutzung digitaler Arbeits- und Hilfsmittel ermöglicht bereits

heute den Gebrauch der weit verbreiteten GNSS<sup>1</sup>-Technologie zur Positionsbestimmung, bei der durch das Empfangen von Signalen unterschiedlicher Satelliten gute Ergebnisse für Positionsbestimmungen erzielt werden können (Forlani et al., 2018). Bei Baufortschrittskontrollen oder Bauwerksinspektionen ist es häufig notwendig, dass gesamte Gebäude, im Innen- wie im Außenbereich, erfasst werden. Eine kontinuierliche bzw. vergleichbare Genauigkeit der Lokalisierung dieser beiden Bereiche ist unumgänglich, weil die erfassten Daten im Nachhinein zusammengebracht und gemeinsam ausgewertet werden müssen. Gängige Lokalisierungstechniken können im Innenbereich jedoch häufig nicht oder nur mit unzureichender Genauigkeit, allenfalls durch hohen technischen Aufwand eingesetzt werden.

Neben der GNSS-Technologie existieren weitere funkbasierte Optionen, wie WLAN, UWB<sup>2</sup> oder Bluetooth. Jedoch kann die Verwendung dieser Technologien im Hochbau zu Lokalisierungsproblemen führen, da es durch die große Anzahl an Wänden und Decken im Innenbereich zu Abschirmungen kommt, die sich auf die Positionsbestimmungen negativ auswirken. Zudem besteht bei funkbasierten Indoor-Lokalisierungssystemen ein hoher Aufwand, unter anderem bei der Inbetriebnahme durch Anbringung, Vermessung und Verkabelung von Infrastrukturelementen. Zur Untersuchung einer weiteren Möglichkeit zur Positionierung bzw. Lokalisierung wurde daher im Rahmen der vorliegenden Studie der Einsatz von LiDAR-Sensoren in Kombination mit SLAM<sup>3</sup>-Algorithmen untersucht. Der Gebrauch dieser Technologie hat sich in verschiedensten Robotik-Anwendungen bereits etabliert und soll nun hinsichtlich der Anwendungspotentiale auf Baustellen bzw. in Bauwerken untersucht werden. Eine detaillierte Erläuterung der Technologie erfolgt in Abschnitt 2.2.

---

<sup>1</sup> GNSS steht für Globales Navigationssatellitensystem. Informationen finden sich unter anderem in Bauer (2011).

<sup>2</sup> UWB steht für *Ultra-Wideband* (dt.: Ultra-Breitband). Es bezeichnet eine Funktechnik zur Datenübertragung mit geringer Reichweite.

<sup>3</sup> SLAM steht für *Simultaneous Localization and Mapping*. Der Begriff wird in Abschnitt 2.2 genauer erläutert.

### 1.3 Ziel der Studie

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden unterschiedliche LiDAR-Sensoren getestet, die im Zusammenspiel mit SLAM-Algorithmen für die Lokalisierung mobiler Roboter eingesetzt werden können. Die Sensoren wurden dabei hinsichtlich der Genauigkeit bzgl. ihrer Positionsbestimmung im Innenbereich analysiert und miteinander verglichen. In erster Linie lag der Fokus auf der Qualität der Verortungsprozesse, da diese für den Einsatz in Baufortschrittskontrollen und Bauwerksinspektionen eine sehr genaue Lokalisierung der mobilen Roboter erfordern. Hinsichtlich der Genauigkeit gilt diese zudem als essentiell für die autonome Navigation von Robotern.

Durch die Untersuchung verschiedener LiDAR-Sensoren, die sich preislich sehr stark voneinander unterscheiden, wurde die Frage beantwortet, ob die getesteten, kostengünstigen, meist kleinen Sensoren ähnliche Ergebnisse erzielen können wie die teureren Modelle. Zusätzlich zum Vergleich der verschiedenen Sensoren wurde weiterhin eine Analyse von unterschiedlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt, da diese sich ungünstig auf die Qualität der Messdaten auswirken können, z. B. wenn Fenster vorhanden sind. In der Kurzstudie wurden drei Testszenarien durchgeführt, mit Hilfe derer unterschiedliche Aufnahmesituationen auf Baustellen oder in Gebäuden simuliert wurden. In der Studie wurde bewertet, ob die Positionsgenauigkeiten unter Verwendung der verschiedenen LiDAR-Sensoren bzw. im Rahmen der verschiedenen Testfälle für den Einsatz mobiler Roboter für Bauwerksinspektionen ausreichend sind.

Die Studie entstand in einer Kooperation zwischen dem Institut für Digitales und Autonomes Bauen und dem Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg.

## 2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund

Das vorliegende Kapitel dient zur Erläuterung der in der Studie angewendeten Technologien. Zunächst sind einige Grundlagen zu LiDAR-Sensoren skizziert, bevor anschließend die Vorgehensweise zur Lokalisierung mobiler Roboter mittels LiDAR-Sensoren dargelegt werden.

### 2.1 LiDAR-Sensoren

LiDAR-Sensoren (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) sind Sensoren, die sich einer Technik der optischen Abstandmessung bedienen. Der Begriff beschreibt zugleich die Funktionsweise und die Zielsetzung der Technologie, die in vielen unterschiedlichen Branchen bereits Anwendung findet. Weit verbreitet ist der Einsatz vor allem in der Geodäsie (Puenta et al., 2013), aber auch Branchen wie die Automobilindustrie (Li & Ibanez-Guzman, 2020) oder die Robotik (Kumar et al., 2017) bedienen sich der Verwendung von LiDAR-Sensoren als Sicherheitssensorik, zur Navigation bzw. zur automatisierten Steuerung.

Die der LiDAR-Technologie zugrunde liegende Messmethode wird dem Laserscanning zugeordnet. Abstände zwischen Sensor und Umgebung werden dabei mit Laserstrahlen sowie durch Lichtlaufzeitmessungen ermittelt. Ein Sensor sendet einen Lichtimpuls (Laserstrahl) in den Raum, der auf eine Oberfläche trifft und von dieser reflektiert wird. Ein Teil der Reflexion strahlt in Richtung des Sensors zurück, der das reflektierte Signal empfängt und dieses hinsichtlich der Laufzeit des Lasersignals auswerten kann. Über die Laufzeit kann anschließend auf die Entfernung zwischen Sensor und Oberfläche rückgeschlossen werden. Auf diese Weise kann ein LiDAR-Sensor seine Umgebung *erkennen* und die Entfernungen zu den umliegenden Objekten festhalten. Die *Abtastung* der Umgebung erfolgt dabei beispielsweise durch das Ablenken des Laserstrahls mit einem Spiegel, der um die Mittelachse des LiDAR-Sensors rotiert (siehe Abbildung 1, Rotationsachse). Bei ebener Positionierung des Sensors auf einer bestimmten Höhe wird dadurch die Umgebung des Sensors auf derselben Höhe abgetastet. Die Messungen erfolgen zweidimensional, der Sensor kann somit als 2D-LiDAR-Sensor bezeichnet werden. Neben den 2D-Sensoren existieren jedoch auch 3D-Sensoren, bei denen der Laserstrahl zusätzlich in die dritte Raumdimension abgelenkt wird. Die Ablenkung kann ebenfalls durch einen Spiegel erfolgen, der sich um eine weitere Achse bewegt (siehe Abbildung 1, Kippachse).

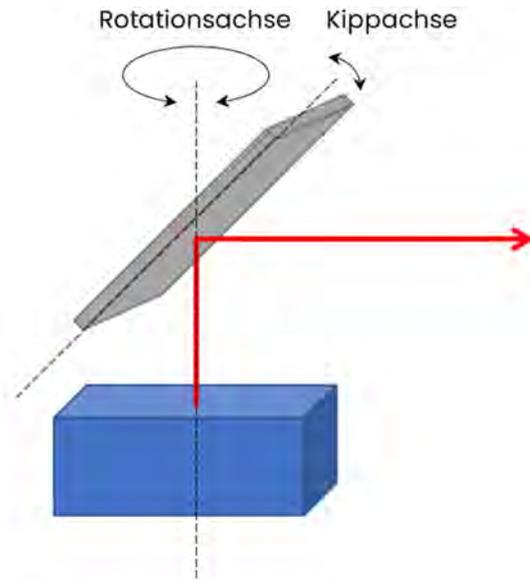


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ablenkung eines Laserstrahls innerhalb eines LiDAR-Sensors

Bei Abstandsmessungen durch LiDAR-Sensoren werden Daten bezogen auf den Ort der Reflexion ermittelt. Somit können sie einem Oberflächenpunkt zugeordnet werden. Die ermittelte Information beschränkt sich zunächst auf den Abstand zwischen Sensor und Oberfläche. Bei bekannter Raumposition des Sensors können mithilfe des Abstands sowie unter Nutzung des Aussende-Winkels des Laserstrahls konkrete Raumkoordinaten für den Oberflächenpunkt ermittelt werden. Die Ablenkung des Laserstrahls in verschiedene Raumrichtungen führt zu einer Abtastung der Umgebung durch den LiDAR-Sensor (Abbildung 1) und erzeugt somit eine zwei- oder dreidimensionale Ausgabe an Oberflächenpunkten. Die aufgenommene Menge an Daten wird als Punktwolke bezeichnet und kann für visuelle Veranschaulichungen genutzt werden. Punktwolken dienen aber auch als Basis für die Erstellung von 3D-Modellen, Umgebungskarten oder – bei stetiger Veränderung der Sensorposition beispielsweise durch die Anbringung an mobilen Robotern – zur Lokalisierung, worauf im nächsten Abschnitt detaillierter eingegangen wird.

## 2.2 Lokalisierung mobiler Roboter

Die Lokalisierung von mobilen Robotern beschreibt den Prozess der Positionsbestimmung bezogen auf ein digitales Referenzsystem. Meist wird das referenzierte System von zweidimensionalen Umgebungskarten repräsentiert, anhand derer ein Positionsabgleich erfolgt. Ähnlich der traditionellen Navigation mittels Karten bei Wanderungen, ist es notwendig sicherzustellen, dass eine initiale Position innerhalb des gesichteten Systems, d. h. eine Karte der momentanen Umgebung, bekannt ist. Darauf aufbauend können mithilfe prägnanter Referenzbereiche ein momentaner Aufenthaltsort bzw. eine exakte Position bestimmt werden. Die mittels Lidar-Sensoren aufgenommenen Umgebungsinformationen erfassen diese ortsspezifischen Referenzpunkte, welche dann zum Positionsvergleich herangezogen werden. Eine solche Positionsbestimmung kann nur durchgeführt werden, sofern die Umgebung zuvor erfasst wurde und somit ein digitales Referenzsystem vorliegt.

Findet eine Lokalisierung in unbekannter oder stark veränderlicher Umgebung statt, wie beispielsweise auf Baustellen, ist eine aktuelle Umgebungskarte nicht existent, was den möglichen Folgeschritt einer Navigation erschwert. Somit ist es vorteilhaft, während der Erfassung von unbekanntem Umgebungen direkt eine Umgebungskarte und somit das Referenzsystem der zur gleichen Zeit laufenden Lokalisierung zu erstellen. Ermöglicht wird dies durch den sogenannten **S**imultaneous **L**ocalization **A**nd **M**apping (SLAM)-Algorithmus. Für die Navigation mobiler Robotik in unbekanntem oder stark veränderlichen Umgebungen hat sich die Anwendung des SLAM-Algorithmus als guter und praxisnaher Ansatz etabliert. Auf Basis von erfassten Sensordaten der Umgebung – wie beispielsweise LiDAR-Messdaten – wird in Echtzeit eine Umgebungskarte abgeleitet und gleichzeitig die Position in Abhängigkeit der Zeit bestimmt. Für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis der Lokalisierung ist es zwingend notwendig, eine präzise Umgebungskarte zu erstellen. Diese Karte kann wiederum nur mit einer präzisen Verortung erstellt werden, womit resultierend eine starke Wechselwirkung zwischen Lokalisierung und Kartierung entsteht. Basierend auf dieser Wechselwirkung können kleinste Fehlkonfigurationen bei Teilprozessen zu massiven Lokalisierungsfehlern führen. Letztendlich wird die allgemeine Qualität der Lokalisierung durch jede einzelne Komponente im Prozess der Positionsbestimmung beeinflusst. Deshalb ist es von großem Interesse direkt bei der Umgebungserfassung auf konsistente Datenqualität zu setzen. Resultierend kann somit die Qualität der Sensoren als eine maßgebende Größe für die Qualität der Lokalisierung abgeleitet werden.

## 3 Methode und Technik

Nachdem die Grundlagen zur Lokalisierung mittels LiDAR-Sensoren in Kapitel 2 erläutert wurden, wird nachfolgend detaillierter auf die Vorgehensweise und Abläufe eingegangen. Zunächst erfolgt eine generelle Erläuterung der Untersuchungsmethode. Anschließend werden Informationen zur verwendeten Technik sowie zur Testumgebung beschrieben. Abschließend erfolgen Ausführungen zur Vorgehensweise bei der Analyse der Lokalisierungsdaten.

### 3.1 Untersuchungsmethode

Da auf dem Markt verschiedene LiDAR-Sensoren in unterschiedlichen Preisklassen angeboten werden, wurde für die vorliegende Kurzstudie eine Auswahl von vier Sensoren getroffen. Es handelt sich dabei um gängige Sensoren in unterschiedlichen Preiskategorien. Zur Beurteilung der Lokalisierungsgenauigkeit der unterschiedlichen LiDAR-Sensoren wurden die Sensoren in drei zuvor festgelegten Testfällen innerhalb eines spezifischen Testfeldes erprobt. Mithilfe eines Datenabgleichs konnte eine möglichst praxisnahe Abbildung von Situationen auf Baustellen erzielt werden. Da sich Baustellen durch ständig wechselnde Umgebungsbedingungen und unterschiedliche Materialumgebungen auszeichnen, wurden in den Testfällen verschiedene Szenarien berücksichtigt.

Die getesteten LiDAR-Sensoren wurden zur Durchführung der Untersuchungen nacheinander auf einen vierbeinigen mobilen Laufroboter, Typ Unitree A1 (UnitreeRobotics, 2020), montiert (Abbildung 2). Für die Analyse eines jeden Sensors ist das zuvor errichtete Testfeld genutzt worden (Abbildung 3). Hier wurde der Laufroboter verwendet, um 2D-Scandaten aufzuzeichnen. Die Steuerung des Roboters erfolgte dabei manuell mit einem Controller, wobei in den nachfolgenden Durchläufen der Testszenarien auf vergleichbare Laufgeschwindigkeiten geachtet wurde.



Abbildung 2: Vierbeiniger mobiler Roboter A1



Abbildung 3: Aufbau des Testfeldes in der Versuchshalle des Instituts für Technische Logistik, TU Hamburg

Nach dem ersten Durchlauf im Testfeld wurden für jeden LiDAR-Sensor zwei weitere Testfälle umgesetzt. Die Scandaten lieferten die Grundlage zur Lokalisierung des Roboters im Testfeld. Dafür wurden die 2D-Scandaten der LiDAR-Sensoren mithilfe eines SLAM-Algorithmus auf der Recheneinheit des Laufroboters verarbeitet. Gleichzeitig wurde die tatsächliche Position des mobilen Roboters mithilfe eines *Motion-Capture-Systems* erfasst. Dabei handelt es sich um ein festinstalliertes Lokalisierungssystem mit hoher Genauigkeit in der Umgebung des Testfeldes, das als Referenz für die Messungen der jeweiligen Testfälle verwendet wird. Die Ergebnisse des Referenzsystems dienen zum Vergleich mit Daten aus den LiDAR-Sensoren mit dem SLAM-Algorithmus und zur Auswertung der Genauigkeiten.

Eine Übersicht über den Ablauf der Messungen im Rahmen der Kurzstudie zeigt Abbildung 4. Als Basis der Untersuchungen dienen die vier LiDAR-Sensoren, der mobile Laufroboter sowie das Motion-Capture-Referenzsystem. Nach der Wahl eines Sensors für eines der Testszenarien wurde das mobile Lokalisierungssystem und das Referenzsystem für die späteren Auswertungen zeitlich synchronisiert. Anschließend konnte ein Testdurchlauf gestartet und die daraus ermittelten Daten gespeichert werden. Nachdem mit den vier LiDAR-Sensoren in allen Testszenarien Scandaten ermittelt wurden, erfolgte eine Auswertung der Daten hinsichtlich der Lokalisierung des Laufroboters.

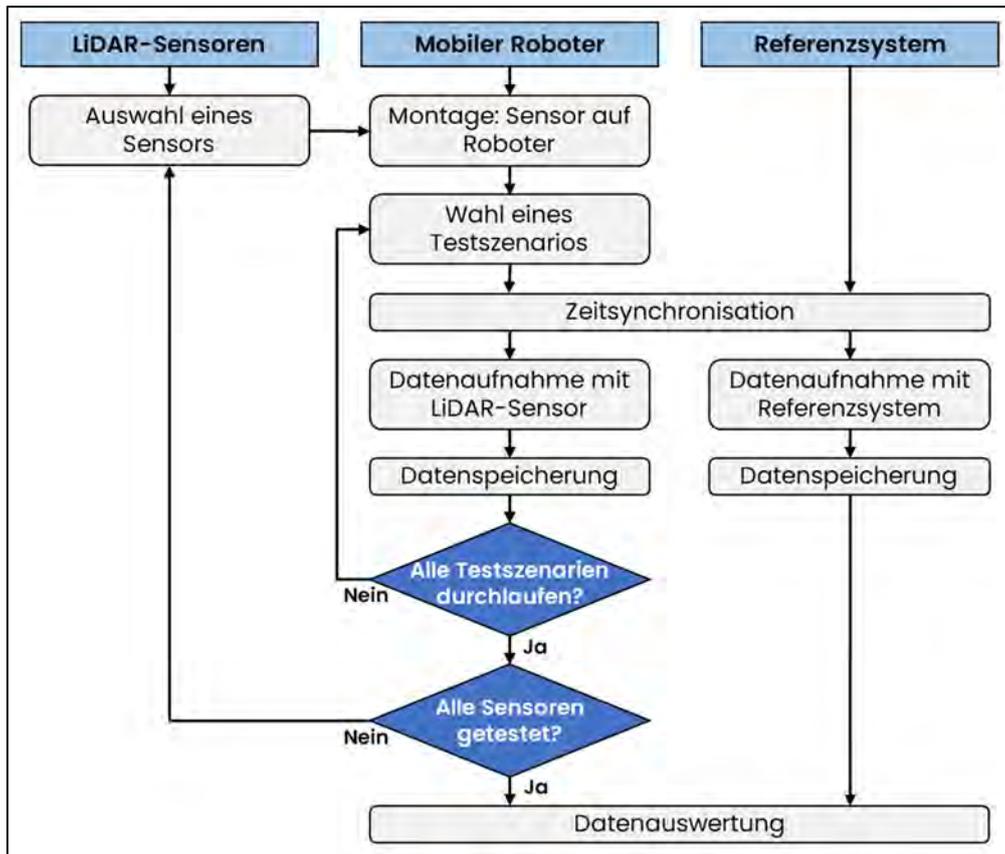


Abbildung 4: Ablauf der Untersuchungen

## 3.2 Verwendete Technik

### 3.2.1 LiDAR-Sensoren und Lokalisierungssoftware

Der Markt für LiDAR-Sensoren bietet eine große Auswahl an unterschiedlichen Modellen, die sich sowohl in ihren Geräteeigenschaften, als auch in ihren Preisen stark unterscheiden. In der vorliegenden Studie wurden Sensoren unterschiedlicher Preiskategorien miteinander verglichen, um eine Aussage darüber zu treffen, welche Genauigkeiten bei der Lokalisierung in den unterschiedlichen Preiskategorien erzielt werden können. Dabei sollte ebenfalls auf die Frage eingegangen werden, ob neben den hochpreisigen Sensoren auch günstige, kleine Sensoren, die mit dem Roboter zu verbinden sind, im Hochbau zur Lokalisierung eingesetzt werden können. In Tabelle 1 und Abbildung 5 werden die eingesetzten LiDAR-Sensoren aufgeführt. Die Preisspanne, in der sich die vier Sensoren bewegen, erstreckt sich von rund 400 € bis mehr als 8.000 €, was einen Preisunterschied mit Faktor 20 zwischen günstigstem und teuerstem Produkt ergibt.

Tabelle 1: Hersteller, Modellbezeichnung und Preise der untersuchten LiDAR-Sensoren

Hersteller	Modell	Preis
Ouster	OS0	Ca. 8.140 €
Velodyne	Puck Lite	Ca. 2.950 €
Slamtec	RPLidar A3M1	Ca. 640 €
Slamtec	RPLidar A2M8	Ca. 390 €



Abbildung 5: Untersuchte LiDAR-Sensoren

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Herstellerangaben der untersuchten Sensoren. Im Gegensatz zu den beiden *RPLidar*-Sensoren, die lediglich eine zweidimensionale Scanoption besitzen, können die hochpreisigen Sensoren (*Ouster* und *Velodyne*) Messpunkte im dreidimensionalen Raum erfassen. Um eine verbesserte Vergleichbarkeit der Sensoren bei den Messungen zu gewährleisten, wurde die Scandimension vom Ouster- und Velodyne-Sensor für die Untersuchungen auf 2D beschränkt. Dagegen zeigen sich bei der Punktgenauigkeit große Unterschiede, was auf die Hypothese führt, dass sich dies direkt auf die Genauigkeit der Lokalisierung auswirkt. Ein weiterer nennenswerter Unterschied zwischen den Sensoren ist die Integration einer inertialen Messeinheit (englisch: *Inertial Measurement Unit*; kurz: IMU). In einer IMU sind mehrere Inertialsensoren, wie Beschleunigungs- oder Drehratensensoren, integriert, deren Daten bei der Lokalisierung berücksichtigt werden können und somit die Lokalisierung verbessern. Von den vier LiDAR-Sensoren, die in dieser Studie untersucht werden, besitzt nur das Produkt OS0 eine IMU.

Tabelle 2: Technische Daten der untersuchten LiDAR-Sensoren im Vergleich

	Ouster	Velodyne	Slamtec A3M1	Slamtec A2M8
Scandimension	3D	3D	2D	2D
Gewicht	445 g	590 g	190 g	190 g
Reichweite	55 m	100 m	0,2-25 m	0,2-12 m
Punktgenauigkeit	1,5-5 cm	3 cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 % der Reichweite (<math>\leq 3</math> m)</li> <li>• 2 % der Reichweite (3-5 m)</li> <li>• 2,5 % der Reichweite (5-25 m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 % der Reichweite (<math>\leq 3</math> m)</li> <li>• 2 % der Reichweite (3-5 m)</li> <li>• 2,5 % der Reichweite (5-12 m)</li> </ul>
Messrate	665.000 Punkte/s	600.000 Punkte/s	10.000-16.000 Punkte/s	8.000 Punkte/s
Zubehör	IMU	Keine IMU	Keine IMU	Keine IMU

Eine weitere technische Komponente ist die Software für die Berechnung des SLAM-Algorithmus. Für dies Kurzstudie wurde diesbezüglich die Open-Source-Software *Cartographer* (Cartographer, 2021) ausgewählt. Es handelt sich dabei um eine Echtzeit-SLAM-Anwendung, die sowohl 2D- als auch 3D-Daten für Lokalisierungen nutzt. Mit der Software wurden im Rahmen der Studie die Positionsschätzungen errechnet. Im Vorfeld der Untersuchungen wurde zudem eine einheitliche Konfiguration erstellt, die je nach LiDAR-Sensor angepasst wurde, um ein bestmögliches Lokalisierungsergebnis zu erhalten.

### 3.2.2 Motion-Capture-System

Zur Bestimmung der absoluten Lokalisierungsgenauigkeit ist die Kenntnis der tatsächlichen Position der LiDAR-Sensoren erforderlich. Die Versuchshalle am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg ist für diese Zwecke mit einem optischen Motion-Capture-System der Firma Qualisys ausgestattet. Das System besteht aus insgesamt acht Infrarot-Kameras, welche ringsum in der Halle installiert sind (Abbildung 6, links). Durch die Verteilung der Kameras an verschiedenen Positionen entsteht in der Mitte der Halle ein Bereich, der von den Sichtfeldern der Kameras abgedeckt wird. Für die Lokalisierung mit dem Motion-Capture-System wurde der mobile Laufroboter mit reflektierenden Markern (graue Kugeln) ausgestattet (Abbildung 6, Mitte). Durch die Detektion von Infrarotstrahlung können die Kameras kontrastreiche Bilder der Markerkonfiguration aufnehmen. Das Motion-Capture-System wertet diese Bilder zunächst hinsichtlich der Markerpositionen im Bild aus. Über Triangulation werden anschließend die Positionen der einzelnen Marker im Raum berechnet (Field et al., 2009). Das System ist in der Lage mehrere Marker gleichzeitig zu erkennen und zu einem Körper mit sechs Freiheitsgraden zusammensetzen. Auf diese Weise können die vier auf dem Roboter platzierten Kugeln zusammen ausgewertet und der Laufroboter lokalisiert werden. Abbildung 6 (rechts) zeigt die Trajektorien<sup>4</sup> der am Roboter angebrachten Marker einer beispielhaften Messdurchführung. Die absolute Genauigkeit des Motion-Capture-Systems liegt im Bereich von wenigen Millimetern (Field et al., 2009), sodass das System als Referenzsystem für diese Studie geeignet ist.



Abbildung 6: Bestandteile des Motion-Capture-Systems (Links: Fest installierte Infrarot-Kamera; Mitte: Marker auf Laufroboter; Rechts: Trajektorien der Marker)

<sup>4</sup> Bei einer Trajektorie handelt es sich um eine *Bahnkurve*, an der sich ein Punkt bewegt.

### 3.3 Testfeld und Messszenarien

Um Umgebungsbedingungen im Hochbau zu simulieren, wurden im Zuge der vorliegenden Studie mit dem in Abbildung 2 gezeigten vierbeinigen Roboter eigens für die Untersuchung präparierte Räume durchlaufen. Da eine Umsetzung auf Baustellen oder in Gebäuden im Betrieb zu unerwarteten und vor allem unregelmäßigen Einflüssen führen würde, wäre die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen nicht gegeben. Des Weiteren ist die Nutzung von Motion-Capture-Systemen nicht für die betrieblichen Praxis geeignet. Daher wurde sich für den Aufbau eines Testfeldes unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen durch Testszenarien entschieden. Realisiert wurde der Aufbau mithilfe großer Kartons, die als Wände interpretiert werden. Eine Aufnahme des Testfeldes ist in Abbildung 3 und eine 3D-Modell in Abbildung 7 (links) zu finden. Die präparierten Wände wurden so errichtet, dass der Laufroboter mehrere Bereiche durchlaufen konnte. Auf Türen wurde im gesamten Testfeld verzichtet. Insgesamt erstreckt sich das Testfeld auf einer Fläche von ca. 6,30 m x 7,00 m.

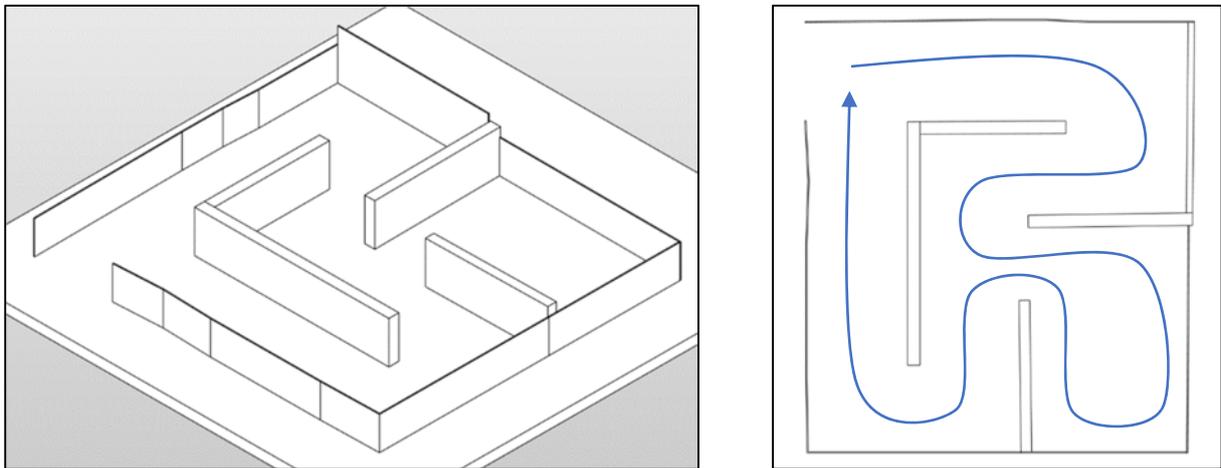


Abbildung 7: Ansichten des Testfeldes (Links: 3D-Modell des Testfeldes; Rechts: Draufsicht mit Trajektorie)

Das in Abbildung 7 dargestellte 3D-Modell wurde mithilfe einer Punktwolke modelliert. In der daraus erstellten Draufsicht ist die geplante Trajektorie für einen Testdurchlauf dargestellt (Abbildung 7, rechts). Bei der Festlegung des Pfades wurde darauf geachtet, dass es zu einem sogenannten *loop closure* kommt. Das bedeutet, dass der Pfad wie eine Schleife (*Loop*) geplant wird und sich am Ende schließt (*Closure*). Durch das Zurückkehren an eine zuvor bereits bekannte Position, kann die gesamte Lokalisierung aktualisiert und verbessert werden (Valencia & Andrade-Cetto, 2018). Die Trajektorie wurde demnach als Schleife geplant, sodass Start- und Endpunkt eines Durchlaufes an der gleichen Position liegen konnten. Ein weiterer *loop closure* ist durch das Betreten und Verlassen des Raumes in der rechten unteren Ecke gegeben (siehe Abbildung 7, rechts). Durch die manuelle Steuerung des Laufroboters wurde die geplante Trajektorie in jedem Durchlauf jedoch nur angenähert. Die Trajektorien der Testdurchläufe unterscheiden sich demnach leicht voneinander, in

ihrem generellen Ablauf entsprechen sie sich aber, sodass der zweifache *Loop Closure* bei allen Messungen gegeben ist.

Um verschiedene Umgebungseinflüsse auf Baustellen oder im Betrieb von Hochbauten in die Messungen einfließen zu lassen, wurde das Testfeld zwischen den einzelnen Messungen drei verschiedenen Szenarien angepasst. Im ersten Durchlauf wurde das Testfeld als eine für die LiDAR-Sensoren optimale Umgebung aufgebaut. Das bedeutet, dass die Räume auf allen Seiten durch Kartons begrenzt wurden. Die Begrenzungen stellen eine vertikal ausgerichtete Wandoberfläche dar, auf der das Lasersignal gut reflektiert werden konnte. Das erste Testszenario kann zwar als optimal für die LiDAR-Sensoren eingestuft werden, es entspricht aber nur in geringem Maße der Realität auf Baustellen. Daher wurde ein zweites Szenario durchgeführt. Der Einbau einer Fensterfront im Testfeld sollte dem Rechnung tragen (Abbildung 8). Insbesondere in modernen Gebäuden finden Fensterfronten großen Anklang, was vielfach auch durch den Einbau bodentiefer Fenster zu beobachten ist. Beim Einsatz von LiDAR-Sensoren in einer Umgebung mit Fenstern können jedoch Probleme auftreten. Die spiegelnde Oberfläche kann zu Fehlern in der Reflexion der Lasersignale führen, sodass die Sensoren Raumpunkte errechnen, die nicht existieren und beispielsweise außerhalb des Testfeldes liegen. Bei einer großen Menge an fehlerhaften Raumpunkten besteht die Gefahr, dass nicht existente Raumobjekte, wie Wände oder Möbel, erkannt werden. Sind diese fälschlicherweise bei der Lokalisierung berücksichtigt, wirkt sich dies negativ auf die eigentliche Positionsbestimmung aus. Für eine eindeutige Unterscheidung der Testszenarien 1 und 2 zeigt Abbildung 9 den Aufbau der beiden Szenarien in der Draufsicht des Testfeldes.



Abbildung 8: Integration einer Fensterfront für den Testfall Fenster

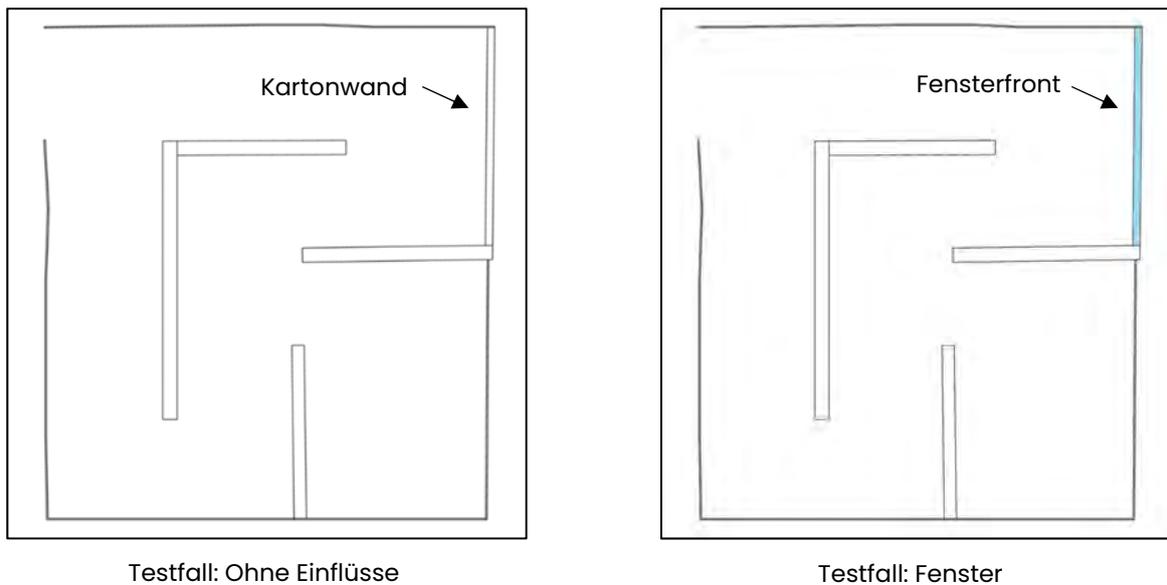


Abbildung 9: Unterscheidung der Testfälle Ohne Einflüsse und Fenster

Für mögliche negative Auswirkungen auf die Lokalisierung wurde im dritten Szenario ein weiterer Einfluss hinzugezogen, indem Personenbewegung in unmittelbarer Nähe des LiDAR-Sensors stattgefunden haben. Für diesen Testfall bewegte sich eine Person während der Messung innerhalb des Testfeldes in ständiger Nähe zum Laufroboter. Eine Übersicht über die drei verschiedenen Testszenarien ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht über die verschiedenen Testfälle

Testszenario 1 – Ohne Einflüsse	Testszenario 2 – Fenster	Testszenario 3 – Person
Optimales Szenario, bei dem alle Wände des Testfeldes mit Hilfe von Kartons simuliert wurden	Szenario mit Einflüssen durch eine Fensterfront im Testfeld	Szenario mit Einflüssen durch eine Fensterfront im Testfeld sowie durch eine Person in unmittelbarer Nähe zum Laufroboter

### 3.4 Analyse der Lokalisierungsdaten

Zur Beurteilung der LiDAR-Sensoren hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit zur Lokalisierung von mobilen Robotern wurden die Messdaten aus den unterschiedlichen Testfällen mit SLAM-Algorithmen verarbeitet. Realisiert wurde dies mit dem Robot Operating System, das als Standard in der Datenverarbeitung im Bereich der Robotik angesehen werden kann. Daraus ergaben sich Positionsdaten in zeitlicher Abhängigkeit. Für eine Evaluation der Qualität der Ergebnisse wurden die Referenzpositionsdaten des Motion-Capture-System herangezogen. Die Lokalisierungssysteme – LiDAR-Sensoren mit SLAM-Algorithmus sowie das Motion-Capture-System – erzeugen in bestimmten Frequenzen sogenannte *PoseStamped*-Nachrichten. In diesen Nachrichten werden Positionsdaten gemeinsam mit der Orientierung und Zeitinformationen abgespeichert. Die Frequenzen, in denen die Daten erfasst werden,

unterscheiden sich jedoch zwischen den Systemen, sodass je System eine unterschiedliche Anzahl an PoseStamped-Daten gespeichert wird. Da in jeder Nachricht neben den ermittelten Raumkoordinaten, also X-, Y- und Z-Wert, auch die Zeit gespeichert ist, können zusammengehörige Werte ermittelt und die Lokalisierungsdaten verglichen werden.

Als Ergebnis wurden euklidische Abstände zwischen den Positionsschätzungen (LiDAR-Sensoren und SLAM-Algorithmen) und den Referenzpositionen (Motion-Capture-System) ausgegeben (*Absolute Position Error*, kurz: APE), anhand derer die Genauigkeit der Lokalisierung bewertet werden kann. Die Ergebnisse der Lokalisierung sind außerdem in Form von Trajektorien darstellbar. Dafür werden die ermittelten Lokalisierungsdaten mittels einer Polylinie miteinander verbunden. Der Vergleich der Trajektorien kann Positionen mit großen Abweichungen zwischen den Lokalisierungssystemen aufdecken und Aufschlüsse über mögliche Fehlerquellen in der Lokalisierung geben.

## 4 Testergebnisse

Wie bereits zuvor erläutert, wurden für die vier untersuchten LiDAR-Sensoren nacheinander Messungen in allen Testszenarien durchgeführt. Durch den Vergleich des Referenzsystems mit den LiDAR-Sensoren und dem SLAM-Algorithmus konnten Abweichungen zwischen den Positionsbestimmungen ermittelt werden. Zur Auswertung der Ergebnisse wurden Mittelwert, Median sowie Standardabweichung bzw. Varianz für jeden Messdurchlauf berechnet. Anhand der Positionsdaten der beiden Lokalisierungssysteme wurden Trajektorien erzeugt, die nachfolgend dargestellt und erörtert werden. Des Weiteren konnten Umgebungskarten aus den Messdaten erzeugt werden. Da sie der Auswertung der Lokalisierung dienen, werden sie ebenfalls im Folgenden aufgeführt.

Die Ausgabe der Positionsdifferenzen und Trajektorien erfolgte mittels eines Python-Pakets mit dem Namen *evo* (Grupp, 2022), das für die Auswertung von Odometrie und SLAM entwickelt wurde. In den folgenden Legenden wird die Trajektorie des Referenzsystems mit *pose* bezeichnet und die Trajektorie des LiDAR/SLAM-Systems mit */poseStamped\_node*. Abbildung 10 zeigt die Legende der Trajektorien, wie sie auch in den nachfolgenden Abbildungen zu finden ist.



Abbildung 10: Erläuterung der Legende der folgenden Abbildungen (links: Durch das „evo“-Paket erzeugt; rechts: Bedeutung für diese Studie)

### 4.1 LiDAR-Sensor: Ouster OS0

Die Untersuchung der LiDAR-Sensoren beginnt mit dem Sensor *Ouster OS0*. Es handelt sich um einen 3D-LiDAR-Sensor, dessen Messung – wie bereits zuvor erwähnt – aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit auf zwei Dimensionen beschränkt wurde. Entsprechend der technischen Herstellerangaben (siehe Tabelle 2), kann eine hohe Genauigkeit der Punkterfassung (1,5 cm – 5 cm) über eine Reichweite von 50 m erreicht werden. Die Inbetriebnahme des *Ouster OS0* setzt eine Spannung von 24 V voraus, die mittels eines externen DC-DC-Spannungswandlers erzeugt wird. Der Datentransfer zwischen Sensor und Berechnungseinheit wird mittels Ethernet-Port und interner Netzwerkverbindung realisiert. Aufgrund der frei erhältlichen Softwarelösung des Herstellers wird der Konfigurationsaufwand zur Inbetriebnahme geringgehalten. Eine Darstellung des mobilen Roboters mit dem montierten Ouster-Sensor ist in Abbildung 11 aufgeführt.

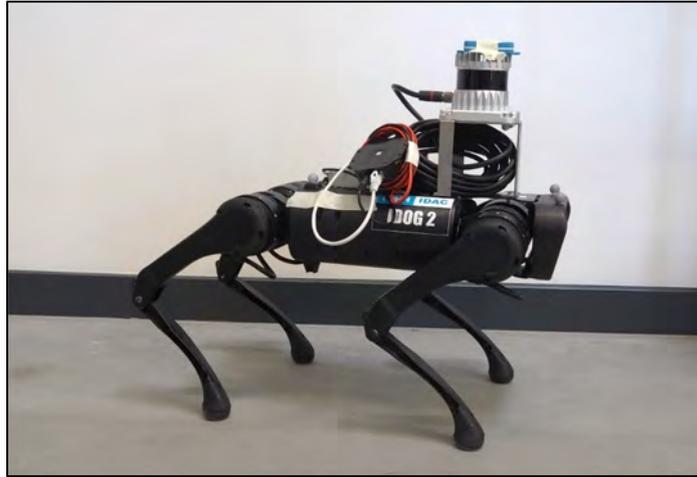


Abbildung 11: Vierbeiniger Laufroboter mit LiDAR-Sensor Ouster OS0

#### 4.1.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit

Abbildung 12 zeigt eine Übersicht der erzielten Trajektorien mittels der Messdaten des *Ouster OS0*. Generell können die errechneten Ergebnisse als zufriedenstellend angesehen werden, da die ermittelten SLAM-Positionen meist mit den exakten Aufenthaltsorten des Roboters in guter Näherung übereinstimmen. Das reine Erscheinungsbild der Trajektorien impliziert, dass die Qualität der Ergebnisse von *Messung 1 (Testfall: Ohne Einflüsse)* bis *Messung 3 (Testfall: Person)* abnimmt.

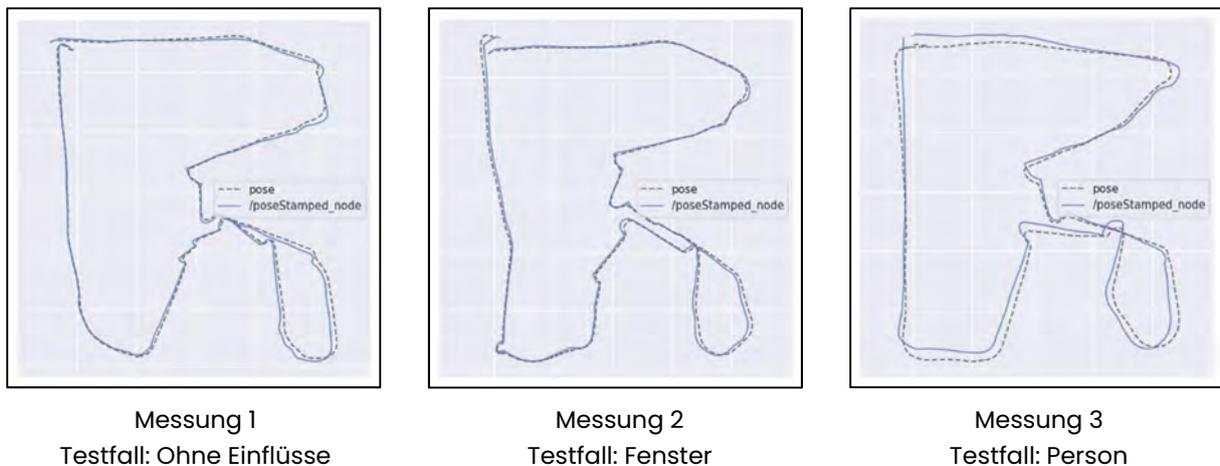


Abbildung 12: Qualitative Übersicht der erzielten Trajektorien des SLAM-Algorithmus mit Ouster OS0

Detailliertere Erkenntnisse können mithilfe von Tabelle 4 und den ermittelten Differenzen der Positionsschätzungen gewonnen werden. Entgegen der augenscheinlichen Vermutung, dass die Qualität mit steigendem Schwierigkeitsgrad der Testfälle abnimmt, ist deutlich zu erkennen, dass die Differenzen der Positionsschätzungen zwischen Messung 1 und 2 der Annahme widersprechen. Trotz vorhandener Fensterfront im Testfeld sind die errechneten Positionen präziser. Zurückzuführen ist dieses Ergebnis auf die 25-sekündige Differenz der Messzeitspanne zwischen den beiden Messungen und der damit verbundenen geringeren Bewegungsgeschwindigkeit im Testfall *Fenster*. Durch die verringerte Geschwindigkeit konnten bei der zweiten Messung die einzelnen Messdaten durch den SLAM-Algorithmus

besser verarbeitet werden, da die Daten eine größere Überschneidung aufgezeigt haben. Unter Einbezug der unterschiedlichen Randbedingungen in den Testfällen sowie der Zeitspanne zeigt sich, dass die Geschwindigkeit den ausschlaggebenden Einflussfaktor darstellt, sodass keine signifikanten Einflüsse durch die Fensterfront identifiziert werden konnten.

Tabelle 4: Differenz der Positionsschätzungen zwischen LiDAR-Sensor Ouster OS0 und Referenzsystem

Messung/ Testfall	Mittelwert [cm]	Median [cm]	Varianz [cm]	Zeitspanne [s]	Anmerkung ↓ = Reduktion der Geschwindigkeit
1. Ohne Einflüsse	6,64	5,40	4,04	100	-
2. Fenster	5,53	5,21	3,21	125	-
3. Person	7,36	7,34	3,70	85	-

Der Einfluss von beweglichen Objekten im Sichtfeld des Ouster OS0-Sensors ist mittels des dritten Testfalls *Person* untersucht worden. Im Vergleich zu den Messungen 1 und 2 ist eine mittlere Differenzerhöhung von ca. 11 % zu verzeichnen. Somit ist ein geringer Einfluss durch bewegliche Objekte im Sichtfeld des LiDAR-Sensors dokumentierbar. Nichtsdestotrotz ist darauf hinzuweisen, dass eine zeitliche Differenz von mindestens 15 Sekunden zwischen dem Testfall *Person* und den vorhergehenden Testfällen existiert.

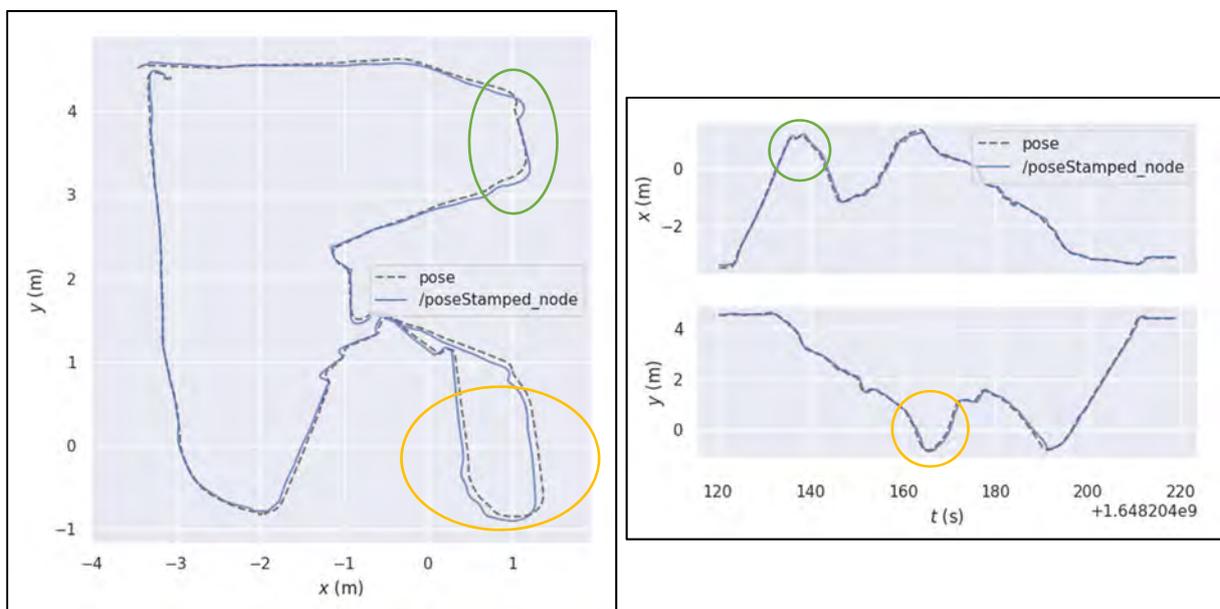


Abbildung 13: Differenzen der Trajektorien (links) sowie Positionsdifferenzen in X- und Y-Richtung (rechts) für Messung 1

Bei genauerer Betrachtung der Trajektorie von Messung 1 sowie der separierten Darstellung der Differenzen in X- und Y-Richtung (Abbildung 13) lassen sich spezifische Orte mit starker Positionsabweichung genauer analysieren. Es zeigt sich, dass in den markierten Bereichen (gelbe und grüne Hervorhebung in Abbildung 13, links) die größten Differenzen zwischen den Lokalisierungssystemen bestehen. Gleichzeitig tritt eine erhöhte Geschwindigkeit in

Kombination mit einem Richtungswechsel auf. Die Zunahme äußert sich durch einen starken Anstieg bzw. Abfall der Kurven in Abbildung 13 (rechts). Ein Richtungswechsel zeichnet sich hingegen in den Diagrammen durch das Auftreten von Extremstellen ab. Demnach wirken sich hohe Geschwindigkeiten mit gleichzeitig auftretenden Richtungswechseln negativ auf die Lokalisierung mittels LiDAR-Sensor und verwendeter SLAM-Software aus.

Ein detaillierter Vergleich der Szenarien 1 und 3 (Abbildung 14) lässt weitere Rückschlüsse auf den Einfluss der jeweiligen Testfälle zu. Es ist klar zu erkennen, dass bei Messung 1 (Testfall *Ohne Einflüsse*) die Trajektorien nur in den eben erläuterten Bereichen starke Differenzen aufweisen. Messung 3 (Testfall *Person*) zeigt dagegen kontinuierliche Abweichungen zwischen den Trajektorien während der gesamten Messung. Diese Beobachtung kann auch durch die Median-Differenz der Positionsschätzung bestätigt werden, die sich durch die Robustheit gegenüber Ausreißern auszeichnet. Messung 1 weist eine Differenz von 5,40 cm auf, wohingegen Messung 3 Differenzen von 7,34 cm zeigt.

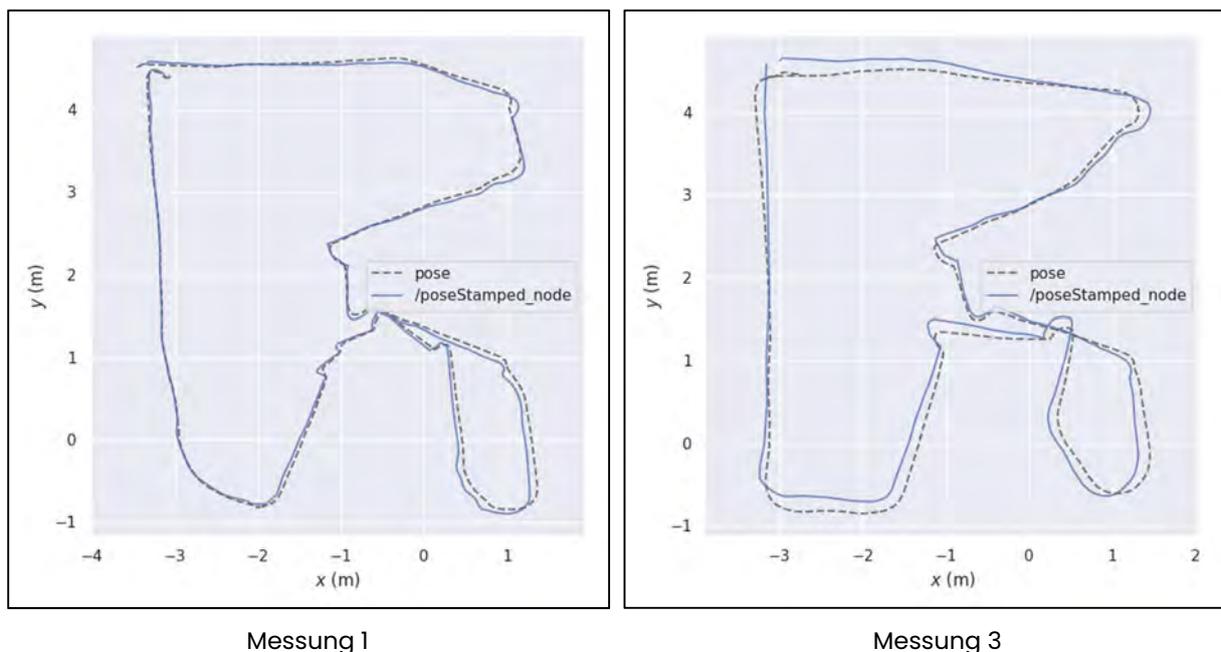


Abbildung 14: Vergleich der Trajektorien von Messung 1 (Ohne Einflüsse) und Messung 3 (Person)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse des *Ouster OS0* nicht signifikant durch die Fensterfront im Testfeld beeinflusst wurden, was sich auch in den ermittelten Umgebungskarten widerspiegelt, die im folgenden Abschnitt genauer erläutert werden.

## 4.1.2 Kartenerstellung durch SLAM

In Abbildung 15 sind zwei Ergebniskarten nach dem Durchlauf der Testfälle *Fenster* sowie *Person* dargestellt. Generell ist der Grundriss beider Karten gut zu erkennen und entspricht dem Aufbau des Testfeldes. Bei genauerer Betrachtung fallen jedoch kleine Unterschiede auf. Der Testfall *Fenster* (links) zeigt eine Karte mit den geringsten, ermittelten Positionsabweichungen zum eigentlichen Aufenthaltsort des Roboters. Auf der rechten Seite ist die vergleichsweise ungenaueste Karte für die Messungen mit dem *Ouster OS0* abgebildet. Mittels eingezeichneter Hilfslinien wird ersichtlich, dass die Karte der Messung 3 im oberen Bereich eine geringe Neigung im Vergleich zur linken Karte aufweist. Hieraus resultiert eine Darstellung der linken Begrenzungen, die nicht parallel zu den restlichen Wänden des Testfeldes verläuft, für den Testfall *Person*. Eine Ursache dafür ist die fehlerhafte Registrierung einzelner Punktwolken während des Testdurchlaufs, da nicht genügend übereinstimmende Punkte vorhanden sind. Ausgelöst wird dies durch die Person in unmittelbarer Nähe zum Laufroboter (Testfall *Person*). Ein weiterer relevanter Aspekt ist die Aufnahme der Fensterfront (rot gestrichelt), die in beiden Karten vollständig als lückenloses Hindernis abgebildet ist. Der *Ouster OS0*-Scanner war demnach trotz der Lichtdurchlässigkeit und Spiegelung von Glas in der Lage, ein Begrenzungsobjekt zu erkennen. Eine weitere Auffälligkeit in beiden Karten ist, dass der LiDAR-Sensor Objekte über den Wandaufbau des Testfeldes hinweg erfasst hat. Zu erkennen ist dies anhand der abgebildeten Flächen außerhalb des Testfeldes. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass auch Messdaten außerhalb des Testfeldes durch den SLAM-Algorithmus ausgewertet werden. Daraus resultierend werden teilweise Abschnitte der Testfeldwände gelöscht (grün umrandet). Die Qualität der Lokalisierung wird dadurch jedoch kaum beeinflusst und die Karten konnten nahezu lückenlos erzeugt werden.

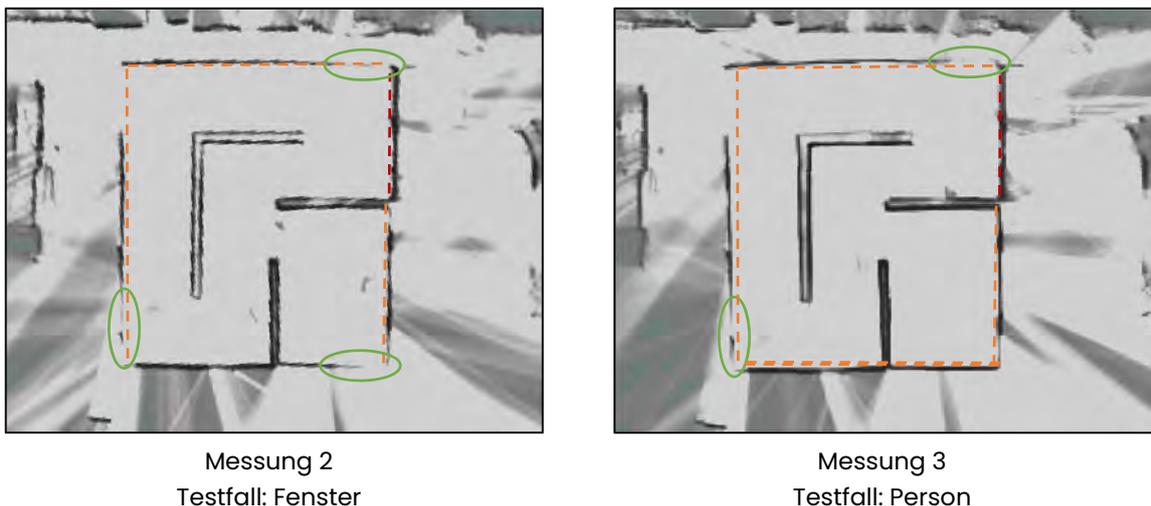


Abbildung 15: Erzeugte Umgebungskarten mit SLAM-Software Cartographer unter Verwendung des LiDAR-Sensors Ouster OS0

## 4.2 LiDAR-Sensor: Velodyne Puck Lite

Beim *Velodyne Puck Lite* handelt es sich ebenfalls um einen 3D-LiDAR-Sensor, der jedoch – im Gegensatz zum Ouster-Sensor – nicht mit einer internen IMU ausgestattet ist. Weiterhin wird der Puck Lite-Sensor mit einer 12 V Spannung betrieben, welche durch den Laufroboter ohne zusätzlicher Spannungswandler gestellt wird. Abbildung 16 zeigt den Laufroboter mit dem untersuchten Sensor. Die Punktgenauigkeit liegt laut Herstellerangaben mit 3 cm in einem ähnlichen Bereich wie der Ouster-Sensor. Aufgrund der Reichweite können Messpunkte in bis zu 100 m Entfernung erfasst werden, was in der vorliegenden Kurzstudie jedoch nicht zum Tragen kommt, da das Testfeld eine maximale Entfernung zwischen zwei Wänden von ca. 7 m aufweist.

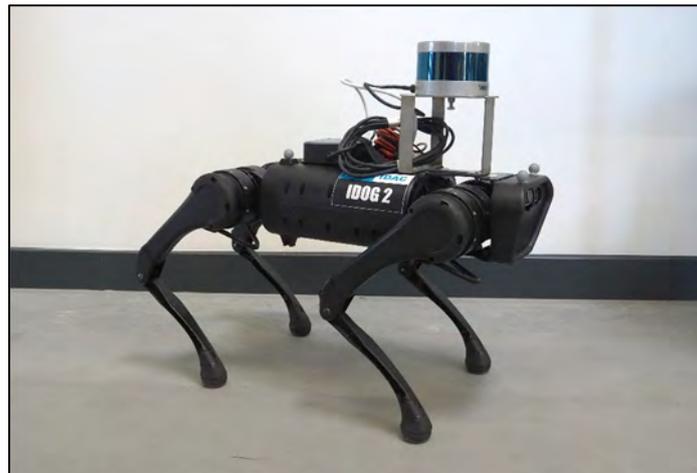
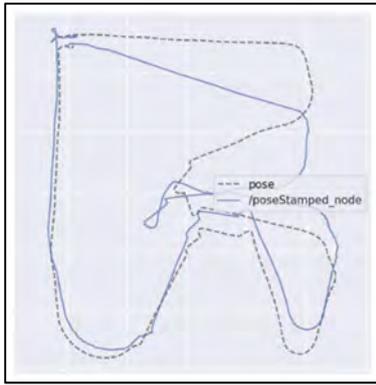


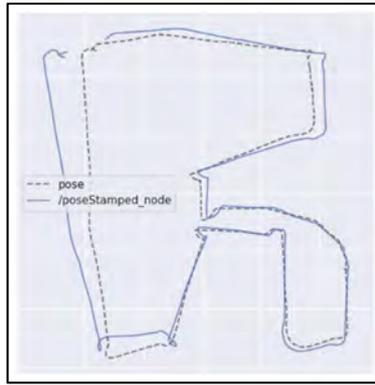
Abbildung 16: Aufbau vierbeiniger Laufroboter mit LiDAR-Sensor Velodyne Puck Lite

### 4.2.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit

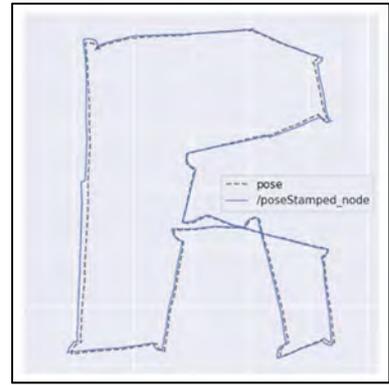
Bei der Betrachtung der Ergebnisse, die mit den Messdaten des Velodyne-Sensors erzeugt wurden, (Abbildung 17) fallen große Unterschiede in der Qualität der Trajektorien auf. *Messung 1 (Testfall: Ohne Einflüsse)*, *Messung 4 (Testfall: Fenster)* und *Messung 6 (Testfall: Person)* zeigen deutliche Abweichungen der SLAM-Positionen im Vergleich zum Referenzsystem. Unter Einbezug der gewonnenen Informationen (Tabelle 5) wird deutlich, dass die Messungen in „normaler“ Geschwindigkeit, vergleichbar mit den Messungen des Ouster-Sensors, durchgeführt wurden. Da zusätzlich zu den geplanten Messdurchläufen einzelne Daten stichprobenartig überprüft wurden, konnte bereits zu diesem Zeitpunkt eine geringe Qualität der Positionsschätzungen festgestellt werden. Daher wurden nachfolgend Messungen mit reduzierter Geschwindigkeit durchgeführt, zu denen auch *Messung 2, 3 und 5* zählen (Abbildung 17). Bereits durch die alleinige Betrachtung der Trajektorien ist eine deutliche Verbesserung in den Positionsschätzungen zu erkennen. Die Ergebnisse in Tabelle 5 bestätigen diese Einschätzung. Für eine detailliertere Auswertung werden die Messungen 2, 3 und 5 im Folgenden genauer untersucht.



Messung 1  
Testfall: Ohne Einflüsse



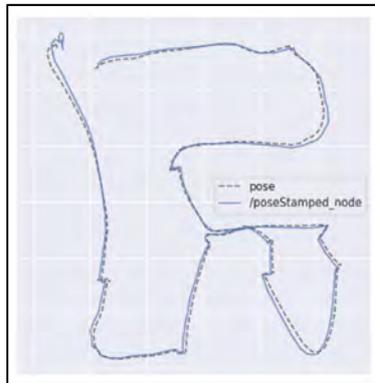
Messung 2  
Testfall: Ohne Einflüsse



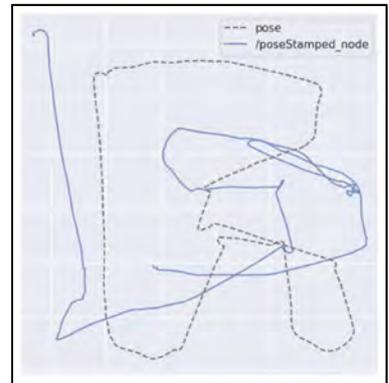
Messung 3  
Testfall: Ohne Einflüsse



Messung 4  
Testfall: Fenster



Messung 5  
Testfall: Fenster



Messung 6  
Testfall: Person

Abbildung 17: Qualitative Übersicht der erzielten Trajektorien des SLAM-Algorithmus mittels LiDAR-Sensor Velodyne Puck Lite

Tabelle 5: Differenz der Positionsschätzungen zwischen dem LiDAR-Sensor Velodyne Puck Lite und dem Referenzsystem

Messung/ Testfall	Mittelwert [cm]	Median [cm]	Varianz [cm]	Zeitspanne [s]	Anmerkung ↓ = Reduktion der Geschwindigkeit
1. Ohne Einflüsse	45,48	37,49	26,77	100	-
2. Ohne Einflüsse	20,95	14,13	16,25	115	↓ Laufgeschwindigkeit
3. Ohne Einflüsse	10,60	11,16	4,02	200	↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit
4. Fenster	-	-	-	95	-
5. Fenster	4,62	3,92	2,92	130	↓ Laufgeschwindigkeit
6. Person	-	-	-	100	-

Die Differenzen der Positionsschätzung in Tabelle 5 zeigen einen direkten Einfluss der Laufgeschwindigkeit auf die Genauigkeit der Lokalisierung mittels LiDAR/SLAM-System. So

konnte die Positionsschätzung von einem Mittelwert von 45,48 cm auf 10,60 cm verbessert werden. Abbildung 18 gibt darüber hinaus weitere Hinweise über den Messablauf. Hier ist deutlich zu sehen, dass in Messung 2 die Geschwindigkeit reduziert wurde, in Kurvenbereichen die Vorwärtsbewegung und Rotation jedoch weiterhin gleichzeitig ausgeführt wurden. Dies führt zu Ergebnissen mit überwiegend abgerundeten Trajektorien. Im Gegensatz dazu steht die Trajektorie der Messung 3, die eckiger erscheint. Grund dafür ist die Reduzierung der Bewegung des Laufroboters auf eine reine Rotation sowie eine verringerte Geschwindigkeit. In der Darstellung der Positionsdifferenz in X- und Y-Richtung sind zu den Zeitpunkten der reinen Rotation eine Art von Plateaus zu finden (gelb markiert).

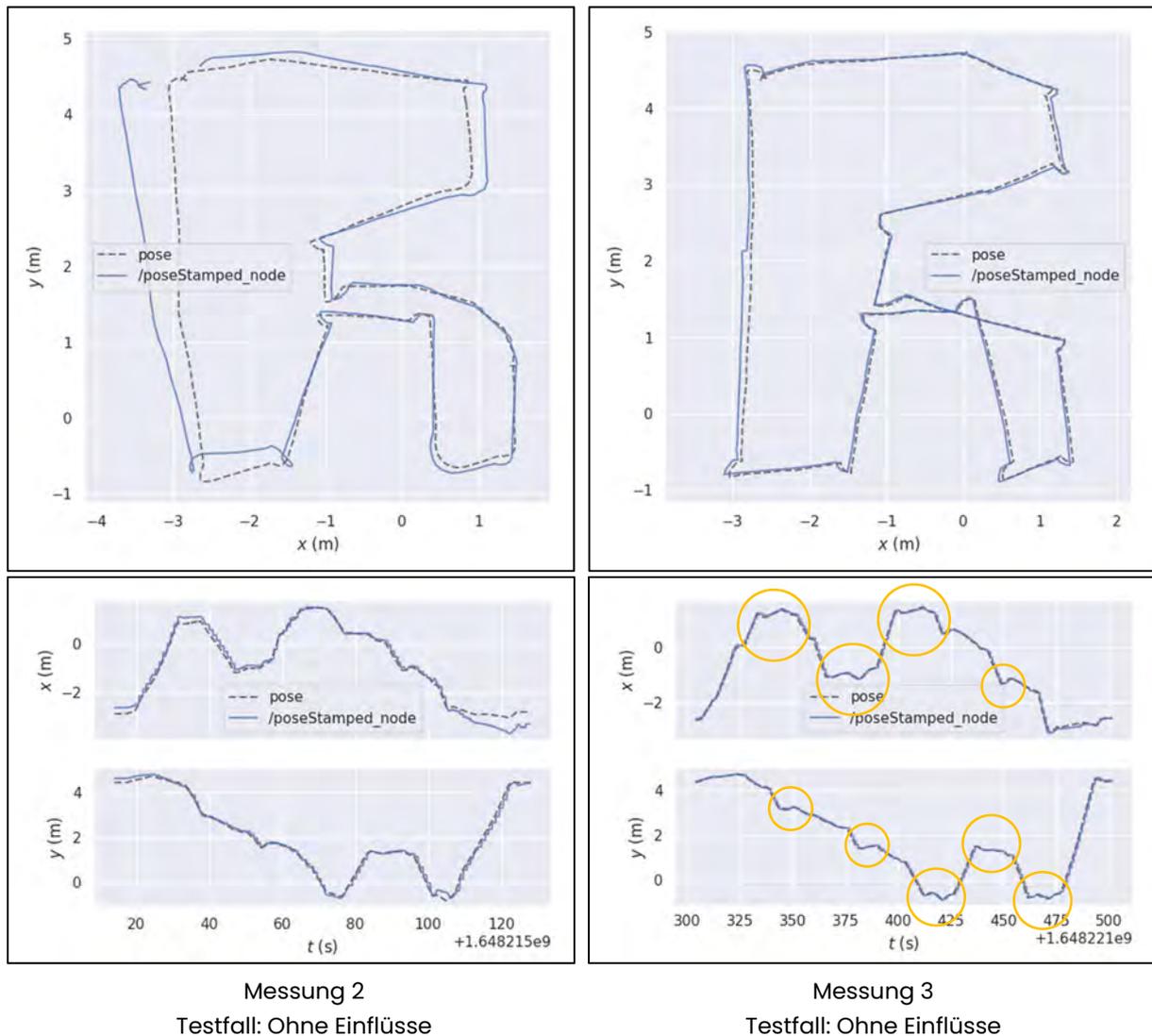


Abbildung 18: Vergleich der Trajektorien und Positionsdifferenzen in X- und Y-Richtung

Tabelle 5 zeigt, dass Messung 5 die besten Ergebnisse in der Lokalisierungsgenauigkeit liefert. Trotz der zusätzlichen Einflüsse durch das Fenster und der nur leicht verringerten Laufgeschwindigkeit konnte eine mittlere Differenz der Positionsschätzungen von 4,62 cm erreicht werden. Da bei jedem Messdurchlauf eine leicht veränderte Trajektorie – ausgelöst durch die manuelle Steuerung – erzielt wird, können unterschiedliche Einflüsse bei der

Ergebnisberechnung eine Rolle spielen. Durch Messung 5 zeigt sich, dass sehr gute Ergebnisse mit dem Velodyne-Sensor erreicht werden können.

#### 4.2.2 Kartenerstellung durch SLAM

Abbildung 19 zeigt digital erzeugte Karten für zwei Messungen mit dem Velodyne-Sensor. Auf der linken Seite sind die Daten der Messung 1 zu sehen. Durch eine fehlerhafte Zuordnung werden einzelne Scanbereiche verdreht dargestellt. Dies führte zu einer unbrauchbaren Umgebungskarte. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Karte nicht korrekt erzeugt wurde. Zwei auffällige Bereiche wurden in der Abbildung markiert. Aufgrund der falschen Zuordnung ergeben sich falsche Positionsschätzungen, die zu den großen Differenzen der Messung 1 in Tabelle 5 führen. Im Gegensatz dazu steht das Ergebnis der Messung 5, deren Umgebungskarte auf der rechten Seite abgebildet ist. Der Grundriss des Testfeldes ist klar zu erkennen und es können kaum fehlerhafte Stellen ausfindig gemacht werden. Eine Verdrehung eines Wandbereiches (orange umrandet) kann im oberen Teil angenommen werden. Des Weiteren wurden bei der Kartenerstellung kleine Teile des oberen Wandabschnittes gelöscht (grün umrandet). Ganzheitlich gesehen, konnte jedoch eine sehr realistische Karte des Testfeldes erzeugt werden, bei der auch die Fensterfront als Objekt korrekt abgebildet wird (rot gestrichelt).

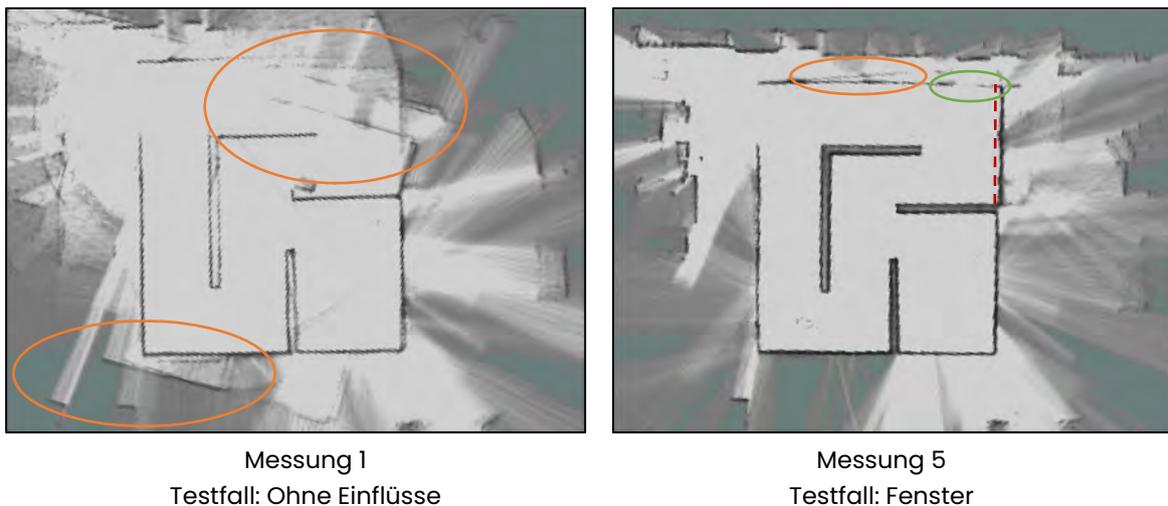


Abbildung 19: Erzeugte Umgebungskarten mittels der SLAM-Software Cartographer unter Verwendung des LiDAR-Sensors Velodyne Puck Lite

#### 4.3 LiDAR-Sensor: Slamtec RPLidar A3M1

Der nächste untersuchte LiDAR-Sensor ist der *RPLidar A3M1* des Herstellers *Slamtec* (Abbildung 20). Es handelt sich um einen Sensor von geringer Baugröße und Gewicht, was zu einer einfachen Montage des Sensors auf dem Laufroboter führt. Zudem kann der Sensor per USB-Anschluss direkt über den Roboter mit einer Spannung von 5 V versorgt werden. Er benötigt kein zusätzliches externes Zubehör. Des Weiteren befindet sich der Sensor in der unteren Preiskategorie und weist eine zweidimensionale Scandimension auf. Mit einer Reichweite bis zu 25 m liegt er deutlich unter den Reichweiten des Ouster- oder Velodyne-Sensors, kann jedoch aufgrund der geringen Entfernungen im Testfeld der Kurzstudie

problemlos eingesetzt werden. Die Herstellerangaben bezüglich der Punktgenauigkeit (Tabelle 2) zeigen auf, dass Objekte in unmittelbarer Umgebung besser erfasst werden können als weiter entfernte. Die reduzierte Punktgenauigkeit bei größeren Entfernungen lässt Auswirkungen auf die Lokalisierung bzw. die Erstellung von Umgebungskarten vermuten.



Abbildung 20: Aufbau vierbeiniger Laufroboter mit LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A3M1

#### 4.3.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit

Die Trajektorien der Lokalisierung mit dem Slamtec-Lidar A3M1 sind in Abbildung 21 dargestellt. Messung 1 zeichnet sich dabei eindeutig von den anderen beiden Messungen ab. Mit einer durchschnittlichen Genauigkeit der Positionsschätzung von ca. 35 cm weicht die Trajektorie des LiDAR/SLAM-Systems stark von den Werten des Referenzsystems ab. Der Vergleich mit Messung 2 zeigt, dass die Reduktion der Lauf- und Rotationsgeschwindigkeit die Genauigkeit verbessert.

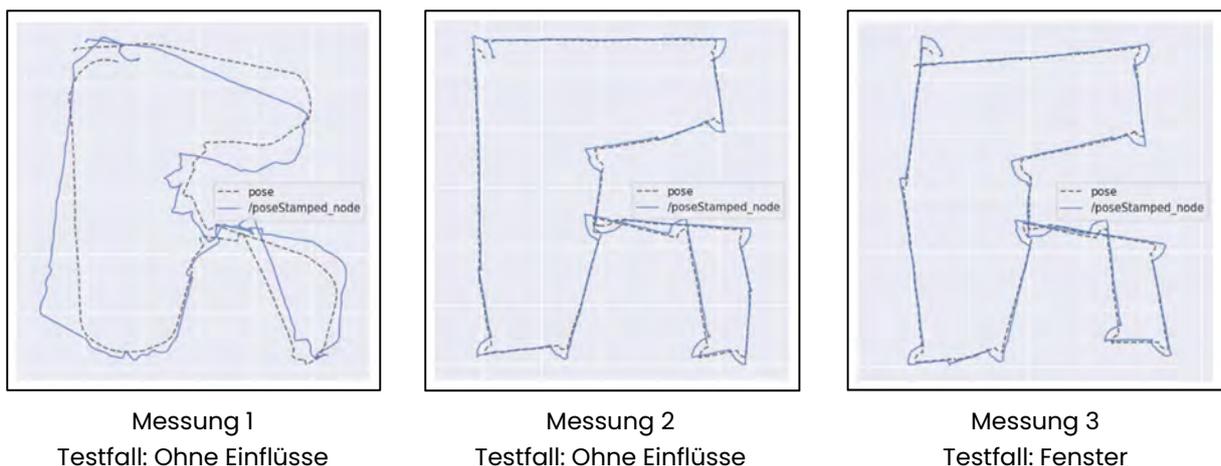


Abbildung 21: Qualitative Übersicht der erzielten Trajektorien des SLAM-Algorithmus mittels LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A3M1

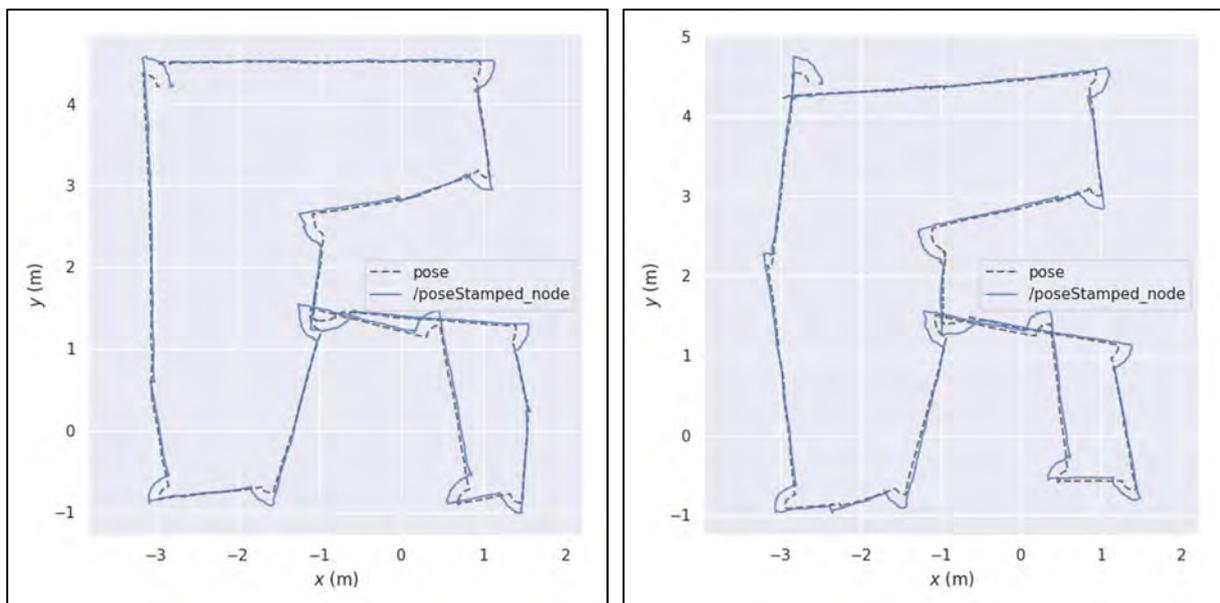
Die Differenz der Positionsschätzungen beträgt bei Messung 2 nur noch ca. 11 cm. Ähnlich verhalten sich die Ergebnisse der Messung 3 (Testfall: Fenster). Die Genauigkeit fällt mit 12,49

cm etwas schlechter aus, es können jedoch keine großen Unterschiede zwischen Messung 2 und 3 ausfindig gemacht werden. Für den Testfall *Person* konnte aufgrund fehlerhafter Daten keine Auswertungen stattfinden.

Tabelle 6: Differenz der Positionsschätzungen zwischen dem LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A3MI und Referenzsystem

Messung/ Testfall	Mittelwert [cm]	Median [cm]	Varianz [cm]	Zeitspanne [s]	Anmerkung ↓ = Reduktion der Geschwindigkeit
1. Ohne Einflüsse	35,02	33,71	16,63	95	-
2. Ohne Einflüsse	10,71	11,07	3,71	185	↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit
3. Fenster	12,49	13,05	4,31	175	↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit

Auch durch eine detailliertere Untersuchung der Messungen 2 und 3 (Abbildung 22) wurden keine markanten Unterschiede zwischen den Lokalisierungsgenauigkeiten deutlich. Ein Einfluss der Fensterfront ist demnach nicht festzustellen. Es ist jedoch zu erkennen, dass in beiden Messungen die Trajektorien während den Rotationen abweichen. Hier treten die größten Differenzen zwischen den Positionsdaten der Lokalisierungssystemen auf. Während der Fortbewegung ohne Rotation kann der Laufroboter hingegen mit hoher Genauigkeit lokalisiert werden.



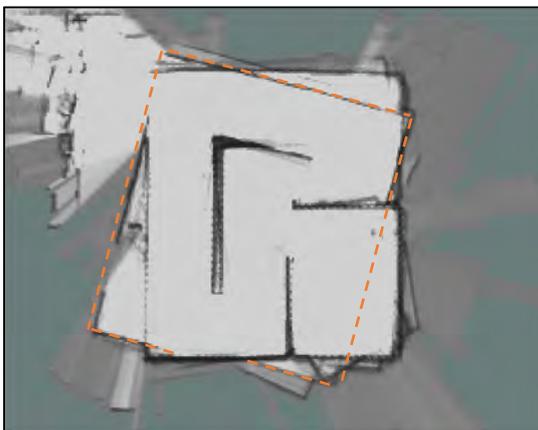
Messung 2  
Testfall: Ohne Einflüsse

Messung 3  
Testfall: Ohne Einflüsse

Abbildung 22: Vergleich der Trajektorien von Messung 2 (Ohne Einflüsse) und Messung 3 (Fenster)

### 4.3.2 Kartenerstellung durch SLAM

Bei der Erzeugung von Umgebungskarten anhand der Messdaten spiegelt sich die Lokalisierungsgenauigkeit in der Qualität der Karten wieder. Abbildung 23 zeigt einen Vergleich zwischen Messung 1 und Messung 2, die beide dem Testfall *Ohne Einflüsse* entsprechen. Die Darstellung der Messung 1 zeigt deutlich eine fehlerhafte Abbildung des Testfeldes, die durch die Verdrehung der Scanbereiche zueinander entstanden ist. Aufgrund der hohen Lauf- und Rotationsgeschwindigkeit in Messung 1 konnten die Punktwolken nicht korrekt zugeordnet werden. Dabei entstanden vermehrt Fehler bei schnellen Rotationen des Laufroboters, die dazu führen, dass der zugehörige Scan im Vergleich zur restlichen Karte verdreht ist. Zur Veranschaulichung wurde eine Verdrehung in Abbildung 23 orange hervorgehoben. Hier ist neben der Verdrehung zusätzlich erkennbar, dass im unteren Bereich keine durchgängige Wand ermittelt wurde und die beiden kurzen orangefarbenen Striche versetzt zueinander sind. Neben der fehlerhaften Umgebungskarte resultiert zudem die fehlerhafte Lokalisierung durch das LiDAR/SLAM-System. Im Gegensatz dazu steht die Umgebungskarte von Messung 2. Die Daten wurden unter den gleichen Umgebungsbedingungen wie bei Messung 1 aufgenommen, jedoch in einer fast doppelt so langen Zeitspanne der Datenaufnahme. Die Verringerung der Fortbewegungsgeschwindigkeit führt zu einem deutlich besseren Ergebnis, bei dem eine korrekter Grundriss des Testfeldes erzeugt werden konnte. Zudem werden kaum Objekte der Versuchshalle außerhalb des Testfeldes erfasst, was auf die geringe Aufbauhöhe von Laufroboter und LiDAR-Sensor zurückzuführen ist. Eine mögliche Verdrehung einer Scanpunktswolke im oberen Bereich des Testfeldes ist durch die Markierung hervorgehoben.



Messung 1  
Testfall: Ohne Einflüsse



Messung 2  
Testfall: Ohne Einflüsse

Abbildung 23: Erzeugte Umgebungskarten mittels der SLAM-Software Cartographer unter Verwendung des LiDAR-Sensors Slamtec RPLidar A3M1

## 4.4 LiDAR-Sensor: Slamtec RPLidar A2M8

Abschließend wurde der *Slamtec*-Sensor *RPLidar A2M8* untersucht, der mit weniger als 400 € den kostengünstigsten Sensor dieser Studie repräsentiert. Er entspricht in Größe und Gewicht dem *RPLidar A3M1* und ist demnach ebenfalls ein recht kleiner und leichter Sensor, der ohne großen Aufwand auf dem Laufroboter befestigt werden kann (Abbildung 24). Dies wird unterstützt durch eine leichte Inbetriebnahme des Sensors, der mittels USB-Anschluss (Spannung von 5 V) mit der Recheneinheit des Roboters verbunden wird. Der Sensor wird als 2D-LiDAR-Sensor eingesetzt mit einer Reichweite von 12 m, wobei sich die Entfernung der zu messenden Objekte auf die Punktgenauigkeit auswirkt (Tabelle 2).



Abbildung 24: Aufbau vierbeiniger Laufroboter mit LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A2M8

### 4.4.1 Vergleich und Analyse der Lokalisierungsgenauigkeit

Für die drei Testfälle *Ohne Einflüsse*, *Fenster* und *Person* ist eine Übersicht der ausgegebenen Trajektorien in Abbildung 25 dargestellt. Eine erste visuelle Einschätzung lässt keine großen Unterschiede zwischen den drei Messungen erkennen.

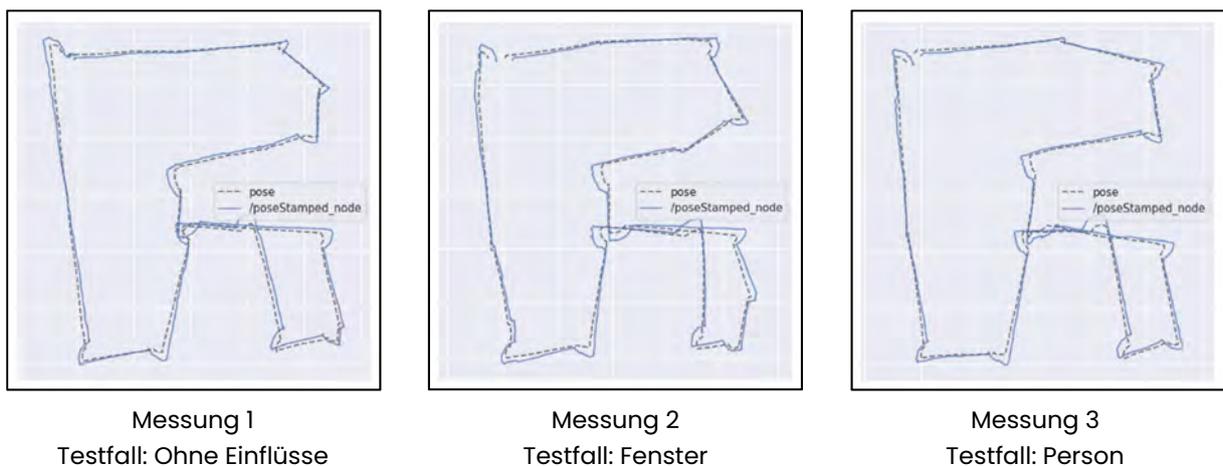


Abbildung 25: Qualitative Übersicht der erzielten Trajektorien des SLAM-Algorithmus mittels LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A2M8

Weiterhin wird dies durch die Ergebnisse der Genauigkeiten in Tabelle 7 unterstützt. Mit einem mittleren Differenzwert von 10,47 cm kann die Messung 1 als bester Durchlauf angesehen werden. Die größte mittlere Differenz tritt bei Messung 3 auf. Die Abweichung zwischen Messung 1 und 3 beschränkt sich jedoch auf 1,6 cm, sodass kein signifikanter Unterschied besteht. Der etwas geringere Wert bei Messung 1 kann außerdem auf die längere Zeitspanne zurückgeführt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass alle drei Messungen mit geringen Lauf- und Rotationsgeschwindigkeiten ausgeführt wurden und die Ergebnisse der Positionsgenauigkeit keine markanten Unterschiede aufweisen.

Tabelle 7: Differenz der Positionsschätzungen zwischen dem LiDAR-Sensor Slamtec RPLidar A2M8 und Referenzsystem

Messung/ Testfall	Mittelwert [cm]	Median [cm]	Varianz [cm]	Zeitspanne [s]	Anmerkung ↓ = Reduktion der Geschwindigkeit
1. Ohne Einflüsse	10,47	10,39	3,65	220	↓↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit
2. Fenster	11,66	11,56	5,31	200	↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit
3. Person	12,07	12,62	4,38	185	↓↓ Lauf-/ Rotationsgeschwindigkeit

Abbildung 26 zeigt eine vergrößerte Darstellung der Trajektorien aus Messung 2 (Testfall *Fenster*). Es ist anhand der eckigen Trajektorienform klar zu erkennen, dass während den Rotationen in den Kurvenbereichen des Testfeldes die Laufgeschwindigkeit minimiert wurde. Trotz der Reduktion der Laufgeschwindigkeit treten in diesen Bereichen die größten Unterschiede zwischen der LiDAR/SLAM-Lokalisierung und der des Referenzsystems auf.

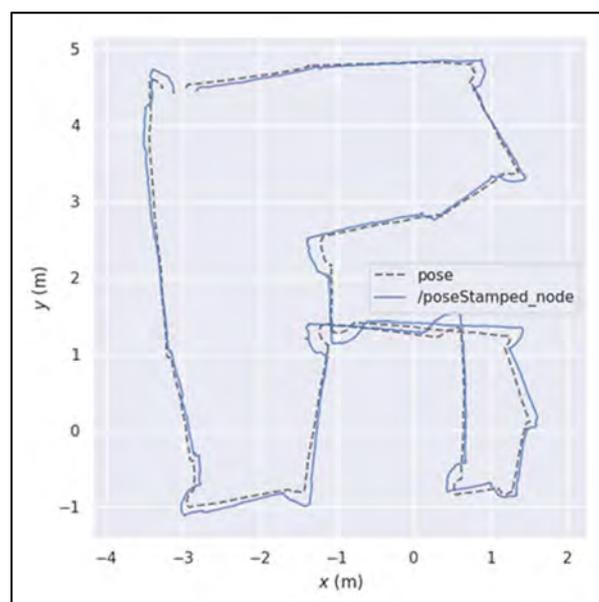


Abbildung 26: Trajektorie der Messung 2 (*Fenster*)

#### 4.4.2 Kartenerstellung durch SLAM

Ähnliche Lokalisierungs-genauigkeiten zeigen sich auch in den erstellten Umgebungskarten (Abbildung 27). Die Daten der Messungen 1 und 2 führen zu guten Ergebnissen und es können eindeutige Karten der Testfeldumgebung erzeugt werden. Auch wenn die Abbildung von Messung 2 leicht gedreht ist, ist die Karte in sich stimmig und die Wände werden parallel dargestellt. Das gute Ergebnis beider Karten ist auf die Wahl der geringen Laufgeschwindigkeit zurückzuführen. Dennoch lassen sich kleine Unterschiede in den Darstellungen finden. Die Karte der Messung 2 (Testfall *Fenster*) zeigt in zwei Bereichen (orange umrandet) eine Verdrehung eines einzelnen Scans. Dieser wurde nicht korrekt an den restlichen Daten ausgerichtet. Zusätzlich ist im Bereich der Fensterfront zu erkennen (grün umrandet), dass der LiDAR-Sensor den Bereich hinter dem Fenster erfasst und das Fenster nicht als durchgängiges Objekt abbildet. Bei reiner Betrachtung der Karte, ohne Vorkenntnisse über das Testfeld, besteht die Gefahr, dass dieser Bereich fehlinterpretiert und als Öffnung wahrgenommen wird. Es kann demnach festgehalten werden, dass mit dem A2M8-Sensor Schwierigkeiten bei der Erkennung von Glas auftreten. In der Abbildung zu Messung 1 wurde im oberen Bereich ebenfalls ein Bereich orange markiert, da hier eine Verdrehung vermutet werden kann. Auch im Inneren des Testfeldes sind einzelne Bereiche eines Scans zu erkennen, die fehlerhaft abgebildet werden. Des Weiteren sind in beiden Karten an einigen Stellen (gelb umrandet) Objekte der Versuchshalle außerhalb des Testfeldes erfasst worden, die für die Karte des Testfeldes jedoch nicht weiter relevant sind. Für beide Messungen konnten demnach korrekte Karten erstellt werden.

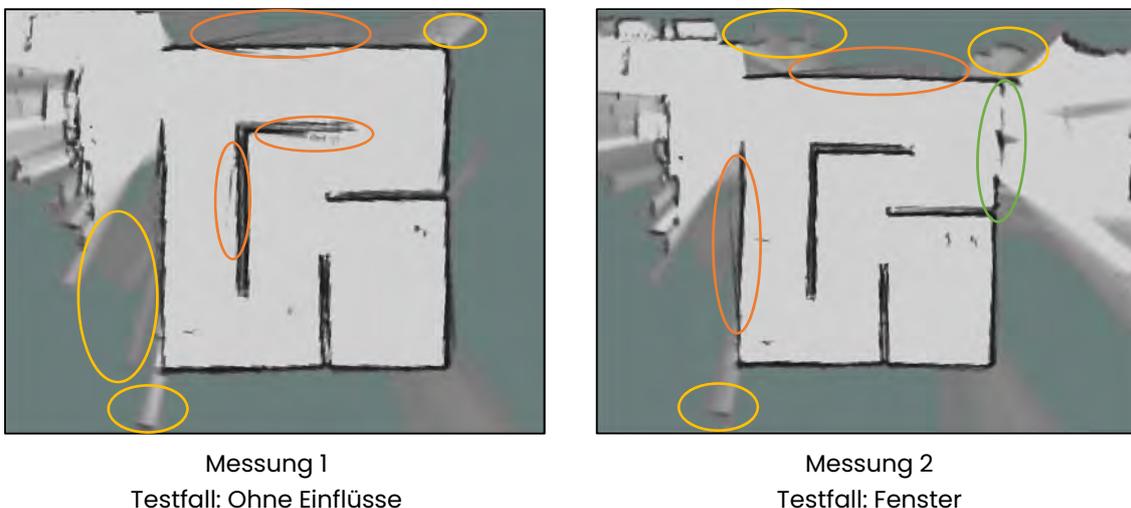


Abbildung 27: Erzeugte Umgebungskarten mittels der SLAM-Software Cartographer unter Verwendung des LiDAR-Sensors Slamtec RPLidar A2M8



Sensoren wiesen dagegen eine recht konstante Genauigkeit zwischen 10 und 12 cm auf. Voraussetzung dafür war jedoch die reduzierte Geschwindigkeit, sowohl bei den Slamtec- als auch beim Velodyne-Sensor.

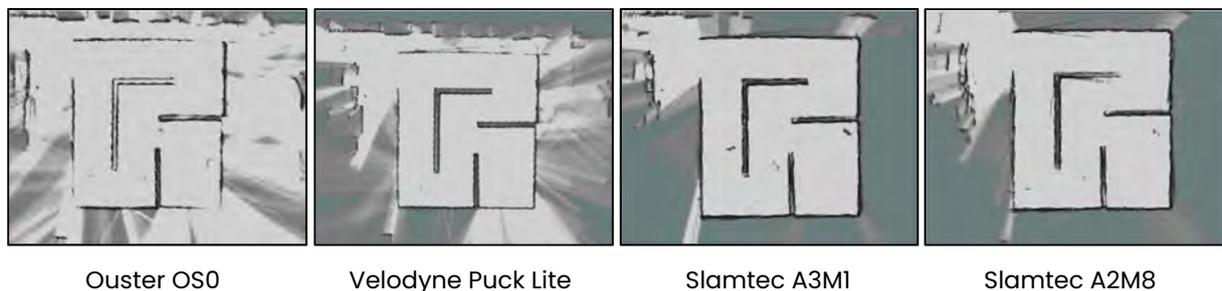


Abbildung 29: Vergleich der Umgebungskarten aus den besten Messungen der untersuchten LiDAR-Sensoren

Neben der Gegenüberstellung der Trajektorien können auch die Umgebungskarten der verschiedenen Messungen verglichen werden (Abbildung 29). Zunächst ist ersichtlich, dass bei den beiden teuren Sensoren die Umgebung außerhalb des Testfeldes erfasst wurde. Bei den Slamtec-Sensoren beschränkt sich die Karte hingegen auf das Testfeld. Grund hierfür ist die Aufbauhöhe des Laufroboters mit Ouster- bzw. Velodyne-Sensor, die nur etwas geringer war als die Höhe der Testfeldwände. Durch die Bewegung des Roboters während des Laufens wurden die Sensoren leicht aus der horizontalen Ebene bewegt und konnten so über die Testfeldwände hinweg Objekte erfassen. Diese Punktwolkendaten wurden anschließend in den SLAM-Algorithmus mit einbezogen und haben demnach Auswirkung auf die Lokalisierung. Zudem führte diese Maßnahme dazu, dass bei der Erstellung der Karten im Zuge der Messung Wandbereiche des Testfeldes gelöscht wurden (Abbildung 15 und Abbildung 19) und somit der Grundriss leichte Lücken aufweist. Bei den Slamtec-Sensoren war dies nicht der Fall. Da die Geräte eine geringere Höhe haben wurde überwiegend nur der Testfeldbereich erfasst. Ein direkter Vergleich der Qualität der Karten ist somit nur eingeschränkt möglich, da sich die Ausgangsbedingungen unterscheiden. Es ist anzunehmen, dass bei höherem Wandaufbau die Kartenqualität beim Ouster- und Velodyne-Sensor zunimmt.

Eine weitere Auffälligkeit ist die Auswertung der Scandaten im Bereich der Fensterfront. Die beiden preisintensiveren Sensoren konnten die Fensterfront vollständig erfassen. Demnach konnten keine negativen Auswirkungen auf die Lokalisierung festgestellt werden und die Fenster wurden als vollständiges Objekt in den Karten dargestellt. Bei den Slamtec-Sensoren konnte hingegen eine leichte Abnahme in der Qualität der Positionsschätzung im Testfall *Fenster* nachgewiesen werden. Die Karte des Sensors A2M8 in Abbildung 27 zeigt zudem eine lückenhafte Darstellung der Fensterfront, die ebenfalls bei der Messung des A3M1-Sensors im Testfall *Fenster* vorliegt. Eine korrekte Erfassung der Fensterfront ist somit bei den Slamtec-Sensoren nicht gegeben.

Eine direkte Gegenüberstellung der Genauigkeitsauswertungen der untersuchten LiDAR-Sensoren bzw. der Testszenarien zeigt Abbildung 30. Hier sind die mittleren Differenzen der

Positionsschätzung einzelner Messungen zu erkennen. Es bestätigte sich, dass der Ouster-Sensor durchschnittlich die besten Ergebnisse erzielt und, unter den richtigen Bedingungen, es auch mit dem Velodyne-Sensor möglich ist, Genauigkeiten in einem ähnlichen Bereich zu erzielen. Die Anpassung der Laufgeschwindigkeit, die in Abbildung 30 nicht dargestellt ist, muss in einer Gesamtauswertung jedoch berücksichtigt werden. Die Genauigkeiten der Slamtec-Sensoren weisen keine großen Unterschiede auf. Allerdings erzielten die Messungen im Testfall *Ohne Einflüsse* die besten Ergebnisse; sie verschlechterten sich leicht durch das Berücksichtigen einer Fensterfront. Der Testfall *Person* resultiert für den Slamtec A2M8-Sensor aus der ungenauesten Positionsschätzung. Eine leicht negative Tendenz dieses Testfalls ist auch in den Messungen mit dem Ouster-Sensor erkennbar.

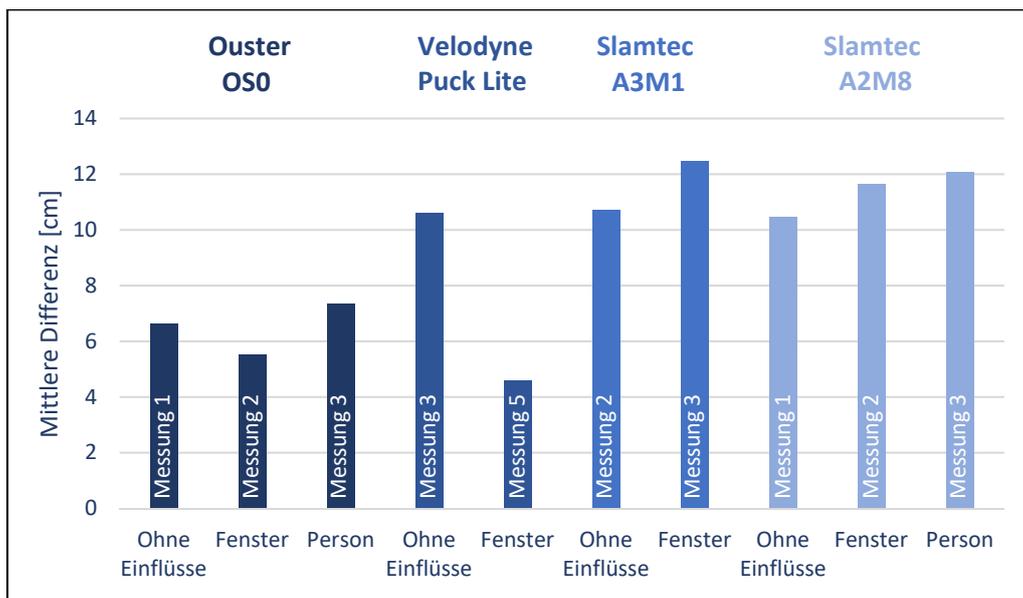


Abbildung 30: Vergleich der mittleren Differenz ausgewählter Positionsschätzungen für die untersuchten LiDAR-Sensoren

## 6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Kurzstudie war es, die Lokalisierung mobiler Roboter mithilfe der LiDAR-Technologie (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) zu untersuchen und empirisch fundierte Aussagen über Lokalisierungsgenauigkeiten von LiDAR-Sensoren verschiedener Preiskategorien zu treffen. Anhand der durchgeführten Analysen hat sich herausgestellt, dass es mit allen vier untersuchten LiDAR-Sensoren möglich ist, gute Lokalisierungen zu erzeugen. Jedoch unterscheiden sich die Qualität der Lokalisierung zwischen den Sensoren und unter gewissen Umgebungseinflüssen bzw. Randbedingungen kann der Einsatz einzelner Sensoren als ungeeignet angesehen werden.

Grundsätzlich hat sich der kostenintensivste LiDAR-Sensor (Ouster) als beste Option für eine möglichst genaue Lokalisierung herauskristallisiert. Ungeachtet der verschiedenen Testfälle konnten bei einer mittleren Laufgeschwindigkeit des mobilen Roboters gute Ergebnisse erzielt werden. Der getestete Sensor kann demnach zur Lokalisierung in verschiedensten Bauumgebungen sowie für unterschiedliche Aufgaben mobiler Roboter eingesetzt werden. Die restlichen drei Sensoren zeigten im Vergleich zum Ouster-Scanner schlechtere Lokalisierungsergebnisse. Dies kann auf die fehlende IMU zurückgeführt werden, die für die Positionsbestimmung wichtige Zusatzinformationen liefert. Durch eine verringerte Lauf- und Rotationsgeschwindigkeit konnten die Lokalisierungen jedoch stets verbessert werden. Bei den Auswertungen der beiden günstigen Sensoren (jeweils Slamtec) zeigte sich, dass vor allem die Rotationsgeschwindigkeit starke Auswirkungen auf eine gute Positionsschätzung hat. Bei zu schnellen Drehungen des Laufroboters konnten die Scandaten nicht mehr korrekt zugeordnet werden, was zu einer fehlerhaften Lokalisierung führte. Zusätzlich stellte sich heraus, dass die Slamtec-Sensoren die im Testfeld errichtete Fensterfront nur unvollständig erfassen konnten. Ein Einsatz zur Lokalisierung mobiler Roboter in unbekanntem Umgebungen mit Fensterfronten ist demnach nicht empfehlenswert.

Durch die Untersuchungen in dieser Kurzstudie konnten bereits einige Aussagen über den Einsatz der verschiedenen LiDAR-Sensoren zur Lokalisierung getroffen werden. Dennoch ergaben sich mehrere Aspekte, die mithilfe weiterer Analysen neue Erkenntnisse liefern müssen. Durch zusätzliche Untersuchungen sollte zunächst auf eine verbesserte Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen geachtet werden. Hierfür bietet sich eine Automatisierung der Robotersteuerung an, um gleichbleibende Geschwindigkeiten und genauere Trajektorien zu gewährleisten. Da nur einer der untersuchten LiDAR-Sensoren mit einer IMU ausgestattet ist, kann eine Integration separater Sensoren bei der Verwendung der drei restlichen LiDAR-Sensoren in Erwägung gezogen werden. Dieser Aspekt erscheint in erster Linie für den Velodyne-Sensor von Bedeutung, da bei einem Messdurchlauf bereits ohne IMU gute Lokalisierungsergebnisse erzielt werden konnten. Zusätzlich sollte die Höhe der Testfeldwände angepasst bzw. eine Messung in einem realen Gebäude in Erwägung gezogen werden. Angesichts des Testfeldes bzw. der unterschiedlichen Testfälle bietet sich außerdem eine Untersuchung unterschiedlich großer Fensterfronten an. In dieser Kurzstudie wurde eine relativ kleine Fensterfront untersucht. Eine Ausweitung der Fensterfläche über mehrere Seiten bzw. auch im Inneren des Messbereiches könnte zu neuen Rückschlüssen

über die Einsatzmöglichkeiten der LiDAR-Sensoren führen, Scandaten von Fensterbereichen auszuwerten. In Bezug auf die Qualität der Datenauswertung bietet sich außerdem die Untersuchung einer weiteren Lokalisierungssoftware an. Neben der verwendeten, freizugänglichen Software Cartographer existieren viele weitere Möglichkeiten zur Anwendung des SLAM-Algorithmus. Zusätzlich zum Vergleich der LiDAR-Sensoren sollte demnach ein Vergleich von Lokalisierungssoftware in kommende Analysen integriert werden.

Die vorliegende Kurzstudie hat gezeigt, dass der Einsatz mobiler Laufroboter zur Unterstützung von Bauaufnahmen und Baufortschrittskontrollen im Hochbau sinnvoll eingesetzt werden kann. Die Nutzung von LiDAR-Systemen kann durch die Unabhängigkeit der Dokumentationsvorgänge von stationären funkbasierten Lokalisierungsmethoden hier als Vorteil genannt werden, da vor der Verwendung entsprechender Sensoren keine zusätzlichen Maßnahmen getroffen werden müssen. Sollten jedoch größere Bauvorhaben dokumentiert bzw. vermessen werden – um bspw. Toleranzen besser im Blick zu haben –, ist es stets sinnvoll Georeferenzen zu globalen Vermessungssysteme, z. B. GNSS, herzustellen oder Lokalisierungsmethoden zu kombinieren. Die im Rahmen der Studie erzielten Genauigkeiten der Positionsschätzungen belegen insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht eine erfolgreiche Lokalisierung von mobilen Robotern in unterschiedlichen bzw. dynamischen Umgebungen, die bei analog durchgeführten Bauaufnahmen bzw. Baufortschrittskontrollen nicht erzielt werden können.

Mithilfe von LiDAR-Sensoren ist es bereits möglich, akkurate digitale Abbilder von Bauwerken zu erstellen. Mehrwerte ergeben sich dabei nicht nur für die Beteiligten vor Ort, z. B. für Vermessungsingenieur\*innen oder Facharbeiter\*innen, sondern auch für alle weiteren Akteurinnen und Akteure, die an den stets unikalen Bauprojekten beteiligt sind. Neben Planenden und Ausführenden betrifft dies insbesondere Behörden, aber auch Bauherrinnen und Bauherren, da diese von zukünftigen Robotereinsätzen ebenfalls profitieren können – sowohl im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit als auch hinsichtlich Qualität.

Es wird empfohlen, dass die in dieser Kurzstudie dargestellten Ansätze zur Lokalisierung von Baurobotern in weiteren Forschungsvorhaben weitergehend untersucht werden, damit neben den wirtschaftlichen Zugewinnen durch den vermehrten Einsatz von Baurobotik, die stets projektspezifischen Baufortschrittskontrollen und Inspektionen in Zukunft auf einem hohen qualitativen Niveau automatisiert oder autonom durchgeführt werden können.

## Literaturverzeichnis

- Bauer, M. (2011). Vermessung und Ortung mit Satelliten: globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme (6., neu bearb. und erw. Aufl.). Berlin Offenbach: Wichmann.
- Cartographer. (2021). Cartographer. Zugriff am 28.4.2022. Verfügbar unter: <https://google-cartographer.readthedocs.io/en/latest/>
- Field, M., Stirling, D., Naghdy, F. & Pan, Z. (2009). Motion capture in robotics review. 2009 IEEE International Conference on Control and Automation (S. 1697–1702). Gehalten auf der 2009 IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Christchurch, New Zealand: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2009.5410185>
- Forlani, G., Dall'Asta, E., Diotri, F., Cella, U. M. di, Roncella, R. & Santise, M. (2018). Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. *Remote Sensing*, 10(2), 311. <https://doi.org/10.3390/rs10020311>
- Golparvar-Fard, M., Bohn, J., Teizer, J., Savarese, S. & Peña-Mora, F. (2011). Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction*, 20(8), 1143–1155. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.016>
- Grupp, M. (2022). evo. Github. Zugriff am 28.4.2022. Verfügbar unter: <https://github.com/MichaelGrupp/evo>
- Kumar, G., Patil, A., Patil, R., Park, S. & Chai, Y. (2017). A LiDAR and IMU Integrated Indoor Navigation System for UAVs and Its Application in Real-Time Pipeline Classification. *Sensors*, 17(6), 1268. <https://doi.org/10.3390/s17061268>
- Li, Y. & Ibanez-Guzman, J. (2020). Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(4), 50–61. <https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2973615>
- Nguyen, A., Kodikara, K. T. L., Chan, T. H. & Thambiratnam, D. P. (2019). Deterioration assessment of buildings using an improved hybrid model updating approach and long-term health monitoring data. *Structural Health Monitoring*, 18(1), 5–19. <https://doi.org/10.1177/1475921718799984>
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J. & Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7), 2127–2145. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.03.006>
- Spencer, B. F., Hoskere, V. & Narazaki, Y. (2019). Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
- UnitreeRobotics. (2020). Robot A1. Unitree. Zugriff am 10.5.2022. Verfügbar unter: <https://www.unitree.com/products/a1/>
- Valencia, R. & Andrade-Cetto, J. (2018). Mapping, Planning and Exploration with Pose SLAM (Springer Tracts in Advanced Robotics) (Band 119). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60603-3>

# Impressum

## Herausgeber\*innen:

Technische Universität Hamburg  
Institut für Digitales und Autonomes Bauen  
Blohmstraße 15, 21079 Hamburg  
Webseite: [www.tuhh.de/idab](http://www.tuhh.de/idab)  
E-Mail: [idad-info@tuhh.de](mailto:idad-info@tuhh.de)

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



Freie und Hansestadt Hamburg  
Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen  
E-Government – ABH 2011  
Neuenfelder Straße 19  
21109 Hamburg



## Autor\*innen:

Johanna Hofer, Mathias Worm, Dr. Thomas Kölzer, Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly  
Jakob Schyga, Dr. Johannes Hinckeldeyn, Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreutzfeldt

ISBN: 978-3-00-072456-5

Januar 2023