

„Elektronik- und Sensorsysteme für neuartige Robotikanwendungen (SensoRob)“
des BMBF

**Multi-Sensorsystem zur Umgebungserfassung unter rauen
Bedingungen**

Teilprojekt: Lokalisierung und Datenfusion

LocSens

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Sachbericht

Erstellt durch

Prof. Dr.-Ing. Andreas Wenzel
MSc. Norbert Fränzel
Dipl.-Ing. Christoph Eisenhut
MSc. Antonio Araujo
MSc. Elena Belgradskaia

FRAUNHOFER IOSB-AST

SACHBERICHT LOCSENS

ZE: Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.	Förderkennzeichen: 16ES0920
Vorhabensbezeichnung:	LocSens Teilprojekt: Lokalisierung und Datenfusion
Laufzeit des Vorhabens:	1.1.2019 - 30.11.2022
Berichtzeitraum:	1.1.2019 - 30.11.2022
Erstellung:	Juli 2023

Inhalt

1 Kurzdarstellung	1
1.1 Projektzielstellung und deren Voraussetzungen	1
1.2 Ablauf des Vorhabens	2
1.3 Wesentliche Ergebnisse	2
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2 Eingehende Darstellung	4
2.1 Darstellung der durchgeföhrten Arbeiten im Teilvorhaben	4
2.1.1 Spezifikation	4
2.1.2 Sensor- und Systementwurf	5
2.1.3 3D Umfelderfassung und Lokalisierung	7
2.1.4 Kartierung und Sensordatenfusion	14
2.1.5 Entwicklung Simulation und Demonstratoren	24
2.1.6 Validierung	28
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	35
2.3 voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	35
2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	35
2.5 Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF	35

Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht über den modularen Hardwareentwurf inklusive abstrakter Schnittstellenangabe	6
2	Übersicht der Softwarearchitektur für das Multisensorsystem mit zusätzlichen szenarienspezifischen Komponenten	7
3	Netzwerkaufbau mit Least Squares Methode	9
4	Netzwerkaufbau mit Taylorreihenentwicklung	9
5	Netzwerkaufbau mit TSML	9
6	Vergleich rohe Messdaten oben links zu Signalstärke NLOS Filter unten rechts, unten links und Two Stage Maximum Likelihood Estimation oben rechts	10
7	Ergebnisse des implementierten Sprungfilters: blau Rohdaten, grün gefilterte Ausreißer und Sprünge	11
8	Konzept für die neuen Anchormodule	12
9	CAD der Anchorzusatzmodule	13
10	Mockup Sensoraufbau auf fahrerlosem Transportsystem KATE	14
11	Vergleich Radar-Scan und LiDAR-Scan	15
12	3D-Punktwolke als Referenzmessung. Aufgezeichnet mittels FARO S150	16
13	Vergleich der Radodometrie mit der relativen Lokalisierung mittels RTC und NDT Scanmatchern	17
14	3D Aufnahme des Aufbaus eines Szenarios im HiL(Hardware in the Loop Labor des Fraunhofer IOSB-AST (a) Topview, (b) in Perpektive	18
15	Lokalisierung der Sanmatcher für LiDAR und RaDAR während Sichtbehinderung durch Nebel auf einer Belegtheitskarte (a) LiDAR-Daten in Gelb und Blau, RaDAR-Daten in Weiß (b) Kamerasisicht aus dem Fahrzeug während der Sicht einschränkung	19
16	Vergleich (a) RaDAR- mit (b) LiDAR-Karte des HiL-Labors am Fraunhofer IOSB-AST	21
17	Messaufbau zur Sensorqualitätsbewertung, RTLSAnchor auf schwarzem Stativ, Tachymeter-Referenzmessstation auf gelben Stativ, Fahrplattform mit vorbereiteter Sensortechnik	22
18	Vergleich der RTLS Lokalisierung (a) Line of Sight mit der RTLS Lokalisierung (b) Non Line of Sight	23
19	URDF Modelldarstellung in Simulationsumgebung inkl. modellierter 2D-LiDAR-Sensorik als blaue Strahlen angedeutet	24
20	Baumstruktur URDF Modell	25
21	robotische Drehschemelfahrplattformen der Demoszenarien. Links mit integrierten Kurzhubtisch, rechts Standardausführung	26

22	Sensor und Messaufbau der Fahrzeugplattform KATE mit Sensoren zur Kartierung und Loaklisierung mittels LiDAR, RaDAR, UWB und vis. Odometrie	27
23	mech. Adaption des Sensormessaufbau an der Fahrplattform mit Hubvorrichtung für das Evaluationsszenario	29
24	Frontansicht auf das Validierungszenario im HiL-Labor	30
25	durch Nebel teilweise blockierte LiDAR-Daten(weiß) und RaDAR-Daten(cyan) eingeblendet in aktuelle Kameransicht der Versuchsplattform	31
26	Vergleich LiDAR-Lokalisierung mit RaDAR-Lokalisierung bei voller LiDAR Sichtweite	32
27	Fahrplattform mit integrierten 3D Beamformingradar (weiße Boxen) des Partners Indurad	33
28	Vergleich der RTLS-Lokalisierung (a) im Projekt entwickeltes Verfahren mit dem (b) State of the Art Verfahren in Umgebung mit reiner LOS Bedingung	34
29	Vergleich der RTLS-Lokalisierung (a) im Projekt entwickeltes Verfahren mit dem (b) State of the Art Verfahren in Umgebung gemischten LOS NLOS Bedingungen	34

1 Kurzdarstellung

1.1 Projektzielstellung und deren Voraussetzungen

Das Gesamtvorhaben hatte zum Ziel, ein Multi-Sensorsystem zur Umgebungserfassung und Lokalisierung für den Einsatz im industriellen Umfeld, in dem mit Nebel bzw. Staubpartikeln oder anderen Störquellen zu rechnen ist, zu entwickeln. Hierfür sollte innerhalb des Teilprojekts „Lokalisierung und Datenfusion“ ein neuartiges Lokalisierungssystem zur Verwendung in Gebäuden realisiert und als Modul in das Multi-Sensorsystem integriert werden.

Die Aufgaben des Fraunhofer IOSB-AST konzentrierten sich dabei auf

- Analyse der sensorischen Anforderungen für Industrielle Servicerobotikanwendungen
- Entwicklung eines Lokalisierungssystems basierend auf Ultrabreitband (kurz UWB) Funk-signalen
- Entwicklung eines Kartierungs- und Lokalisierungsverfahren basierend auf Radardaten.
- Fusionierung der Lokalisierungsergebnisse der verschiedenen Verfahren
- Unterstützung bei der Anpassung einer bestehenden Roboterplattform für verschiedene Anwendungsszenarien

Hervorzuheben sind vor allem die wissenschaftlichen Fragestellungen der Lokalisierung mittels UWB und RADAR sowie die sich hieraus ableitend notwendige Fusion der einzelnen Lokalisierungsergebnisse. Das entwickelte Güte getriebene Fusionsverfahren soll in der Lage sein, ein Optimum für die Schätzung der Roboterpose aus den Einzelergebnissen zu berechnen.

Sensorisch wird in bisherigen auch industriellen Anwendungen verstärkt auf LiDAR und Kamerasysteme zur Umgebungswahrnehmung und Lokalisierung gesetzt. Die verwendeten Verfahren basieren dabei zumeist auf optischen Spurführungssystemen, wobei ein Kamerasystem einem zuvor markierten Pfad folgt und dabei Positionsfehler ausgeregelt werden. Modernere State of the Art Verfahren verwenden Ein- oder Mehrebenen-LiDAR-Messsysteme, um die Abstände zu Hindernissen bzw. Objekten und Strukturen in der Umgebung zu erfassen und diese dann in einer Folge von Scans zu vergleichen. Ausgehend von diesen Messungen ist es mit so genannten SLAM- (Simultaneous Localisation and Mapping) Verfahren möglich, eine Umgebungskarte bei gleichzeitiger Lokalisierung zu erzeugen. Diese Verfahren setzen dabei auf eine hohe Auflösung und Messgenauigkeit der Einzelsysteme. Die Verwendung von Licht nahe dem sichtbaren Spektrum stellt sich jedoch für industrielle Anwendungen in schwierigen Umgebungen oft als nachteilig heraus, da Nebel, Staub oder Regen die Sensorsicht blockieren können. Die Projektergebnisse sollen dabei helfen, eine Brücke zwischen den bereits etablierten Verfahren und neuer Radar- und UWB-Sensorik zu bauen.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Im Wesentlichen gliederte sich das Projekt die Phasen,:

- Systementwurf,
- Systementwicklung,
- Integration und
- Validierung.

Diese Phasen teilten sich wiederum in klassische Arbeitspakete mit Unterarbeitspaketen für die verschiedenen Teilproblematiken auf. In der Phase des Systementwurfs war ein sehr intensiver und enger Austausch der Partner untereinander notwendig. In den meist online abgehaltenen Treffen wurde anhand der ausgearbeiteten Szenariendefinition eine Anforderungsanalyse mit anschließender gemeinsamer Funktionsdefinition durchgeführt. Diese mündeten letztlich in einem Lastenheft, mit welchem die Partner untereinander in die Lage versetzt wurden, die Teilproblematiken zu bearbeiten. Für das Teilprojekt des IOSB-AST konnten so die Randbedingungen für die UWB- und Radarlokalisierung wie Schnittstellen und Einsatzumgebung erarbeitet werden. In der anschließenden Systementwicklung fanden zunächst die notwendigen Voruntersuchungen zu den Sensoreffekten im Radar- und Ultrabreitbandspektrum statt. Die unterschiedlichen Domänen UWB und Radar wurden dabei stets getrennt voneinander betrachtet. Dabei fand die Datenerhebung sowohl simulativ als auch real in einem leerstehenden Bürogebäude statt. Für die Untersuchungen zur UWB-Lokalisierung fand das bereits vorhandene RTLS-Flare-Evaluierungskit Anwendung. Um die Untersuchungen zur Radarlokalisierung durchführen zu können, stellte der Partner Indurad zwei seiner etablierten Drehspiegelradarsysteme zur Verfügung. Auf Basis dieser Ergebnisse konnten schließlich die Entwürfe von Hard-, Firm- und Software stattfinden. Die Entwurfs- und Umsetzungsphase musste durch nicht vorhersehbare Umstände verlängert werden, was letztlich auch zur Verlängerung der gesamten Projektbearbeitungszeit führte. Die abschließende Integration der Einzellkomponenten zum gesamtheitlichen Lokalisierungssystem mit anschließender Validierung gingen im Projekt 3 definierte Meilensteine voraus. Der erste Meilenstein markierte den ersten realisierbaren Systementwurf. Der zweite Meilenstein war als Halbzeitmeilenstein ausgewiesen, an welchem die Labormuster der Partner soweit gereift sind, dass sie in ein Gesamtsystem integrierbar sind. Der letzte Meilenstein des Projekts markierte den Beginn der Validierungsphase im Projektverlauf.

1.3 Wesentliche Ergebnisse

Durch das Projekt konnten für eine stabilisierte Lokalisierung in rauen Umgebungen verschiedene Ansätze zur RaDAR-Lokalisierung entwickelt und erprobt werden. Verschiedene Scanmatcher

wurden hierfür speziell auf die Herausforderungen der physikalisch bedingten niedrigen Auflösung der RaDAR-Systeme angepasst. Durch diese konnte eine relative Lokalisierung in Form einer Radarodometrie sowie eine kartenbasierte absolute Lokalisierung entwickelt werden. Im Zusammenspiel mit der im Projektverlauf verbesserten UWB-Funk-Lokalisierung der RTLS-Flare-Systeme wurde so eine Möglichkeit geschaffen, die Lokalisierung für mobile robotische Anwendungen im Industriebereich auch in rauen Umgebungen zu realisieren.

Eine weitere Errungenschaft des Projektes ist das verbesserte automatisierte Einmessverfahren der RTLS-Flare-Systeme im Einzelnen. Durch dies ist es ohne weitere Hilfsmittel möglich, die Positionen der unbewegten Flares (Ancors) während des Aufbaus zu bestimmen. Allein durch deren inhärente Messung und Kommunikation untereinander werden die Anchorpositionen ermittelt und tragen so zum Aufspannen eines Koordinatensystems bei.

Durch das übergeordnet eingesetzte Filter zur Sensordatenfusion der einzelnen Lokalisierungsmethoden wurde für das Gesamtsystem der Mehrwert geschaffen, weitere Lokalisierungsquellen zur Stärkung der Robustheit einzubeziehen. Eine Zusatzhardware, die ebenfalls im Projektverlauf entstanden ist, bietet die Möglichkeit, die RTLS-Flare-Systeme durch einen Uplink direkt in ein bestehendes Netzwerk einzubinden. So können die Daten beispielsweise direkt an ein Produktionsleitsystem angebunden werden.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit ergab sich nicht die Möglichkeit, mit anderen als den geplanten Stellen zusammen zu arbeiten. Planmäßig konnten mit der Technischen Universität Ilmenau im speziellen der Fakultät für Informatik und Automatisierung sowie mit der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik insgesamt 3 Qualifikationsarbeiten zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science bearbeitet und betreut werden. Alle drei haben den Fokus auf die Lokalisierung entweder mittels RaDAR- oder UWB-Funktechnologie.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Darstellung der durchgeführten Arbeiten im Teilverhaben

Nachfolgend sind die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse des Teilverhabens beschrieben. Dabei orientiert sich die Beschreibung an den im Konsortium abgestimmten Arbeitspaketen.

2.1.1 Spezifikation

Da die Entwicklung im Projekt anwendungsgetrieben erfolgen sollte, wurden unterschiedliche Bereiche für Servicerobotik untersucht und letztlich zwei Szenarien im Projekt LocSens definiert. Ein Szenario orientiert sich im Bereich der Logistik und das zweite im Bereich der industriellen Reinigung von Anlagenteilen der Lebensmittelindustrie.

Im vorliegendem Teilprojekt wurde vornehmlich das Logistikszenario betrachtet. Es zeichnet sich durch Material- bzw. Güterumschlag aus. Dabei spielt der autonome Transport, d. h. die Anfahrt einer definierten Zielposition, die größte Rolle. Um dies zu gewährleisten, benötigen fahrerlose Transportsysteme, abgekürzt FTS, zu jeder Zeit eine hinreichend genaue Lokalisierung. Stand der Technik ist je nach Anwendung im Außen- oder Innenbereich die optische Spurführung mittels Markierung, GPS Navigationstechniken und die auf LiDAR-Systemen beruhenden Navigationslösungen. Die Anwendungen in der Logistik sind dabei stark skalierbar. So existieren moderne FTS in Größenordnungen vom Transportsystem für Kleinladungsträgern, wie beispielsweise Euroboxen, bis hin zu Sattelschleppern oder Muldenkippern. Hauptziel des spezifizierten Szenarios soll die Evaluierung und Darstellung der stabilen Lokalisierung unter schwierigen Bedingungen wie Staub, Schmutz und Nebel sein, da hier die etablierten optischen und LiDAR-Systeme versagen. Die meisten Anwendungen, in denen mit einer erhöhten Belastung durch Staub und Nebel zu rechnen ist, liegen bei den großen Transportsystemen wie z. B. im Tagebau oder bei der Abfallbeseitigung. Jedoch gibt es auch Anwendungen für kleinere Fahrzeuge im Innenbereich, wie beispielsweise Papierfabriken bzw. beim Übergang von normal temperierten Produktionshallen zu Kühllagern. Nicht zuletzt aus Kosten- bzw. Platzgründen wurde daher während des Projekts von Kleinladungsträgern als Transportgüter bis max. 50 kg ausgegangen. Um die industriellen Ansprüche an Wiederholgenauigkeiten darzustellen, beinhaltet das spezifizierte Szenario die Übernahme und Übergabe der Transportgüter an definierten Stationen. Am Fraunhofer IOSB-AST stand das „*Hardware in the Loop*“ Labor zur Umsetzung des Szenarios zur Verfügung. Mit Hilfe von Messeschnellbauwänden wurde das Labor so umgerüstet, dass ein Parcours für ein FTS mit dem zu entwickelnden Sensorsystem entstanden ist. Mit dem Einbringen künstlichen Bodennebels in das Szenario konnten die erschwerten Sichtbedingungen demonstriert und die Lokalisierungsergebnisse validiert werden.

Die Analyse der notwendigen Anforderungen erfolgte in enger Abstimmung mit allen Partnern

im Konsortium. So entstand ein Systemkonzept, welches für eine breite Masse von Anwendungen einsetzbar ist. Die Szenarien bildeten dabei jeweils die Grundlagen der Überlegungen und Diskussionen. Es mussten Abwägungen hinsichtlich der Sensorreichweite und der verwendbaren Sendeleistung des Radars getroffen werden, da für die Anwendung auf den mobilen Robotersystem noch genügend Kapazität für die Ausführung von Transport-, Logistik- oder Reinigungsaufgaben vorhanden sein muss.

Die spezifizierten Anforderungen wurden schließlich in einem projektinternem Pflichtenheft zusammengefasst und so für die Entwicklung der Subsysteme und des Gesamtsystems dokumentiert.

2.1.2 Sensor- und Systementwurf

Auf Basis des Pflichtenhefts erfolgte auch die Zusammenfassung und Überprüfung der unterschiedlichen Anforderungen auf mögliche Schnittmengen, die so vereinheitlicht werden konnten. In beiden Szenarien dient der RaDAR-Sensor als primäre Quelle zur Erfassung von Umgebungsinformationen, die für die nachfolgende Kartenerstellung und Lokalisierung genutzt werden. Zusätzliche Positionsinformationen werden aus dem UWB-Lokalisierungssystem gewonnen. So konnte eine robuste Lokalisierung auch unter erschwerten Bedingungen erreicht werden.

In beiden Szenarien wurde von ähnlichen Umgebungsbedingungen ausgegangen, wobei das Reinigungsszenario von wesentlich stärkerem Sprühnebel, Feuchtigkeit und auch Reinigungsschaum geprägt ist. Die Anforderungen der Lebensmittelindustrie verlangen hinsichtlich des „*Hygienic Design*“ eine sehr hohe Kompatibilität mit Reinigungsmitteln und Chemikalien. Dieses Kriterium sollte die Arbeiten an dem Lokalisierungssystem nicht dominieren, einige grundlegende Aspekte bzgl. Wasserdichtheit flossen in der Entwurfsphase mit ein. So konnten auch die geplanten Tests in Produktionsanlagen der Lebensmittelindustrie mit abgedeckt werden.

Um Synergien bei der Entwicklung der Anwenderszenarien und der Integration der Lokalisierungssysteme stärker nutzen zu können, wurden für die Szenarien identische Roboterplattformen als Basis verwendet. Die Fahrplattform bzw. deren Antriebseinheit wurde dabei so gewählt, dass sie bereits bestehenden industriellen Standards für FTS entspricht.

Größere Abweichungen im Systementwurf gab es nur im Bereich des vom Projektpartner Fraunhofer IVV entwickelten Verschmutzungssensors für die Lebensmittelindustrie. Eine zusätzliche Überwachung des Verschmutzungsgrades in einer Produktions- oder Lagerhalle ist zwar denkbar, jedoch durch die dort notwendigen Beleuchtungsintensitäten nicht praktikabel.

Zur Entwicklung entschloss sich das Konsortium für einen modularen Systementwurf. Hauptsächlich wurde der Entschluss auf der Basis der später möglichen Austausch- und Erweiterbarkeit getroffen. Die Abbildung 1 zeigt das entworfene Schema. Während der Erarbeitung des Konzepts wurden verschiedene Ansätze diskutiert und bewertet. Der in Abb. 1 gezeigt Entwurf erfordert den Einsatz von mind. 3 Rechenkomponenten pro Szenario: Ein Rechner im Roboter, ein Zweiter

für die Leitstelle, das so genannte Cockpit und ein Dritter für die Mensch-Maschine-Schnittstelle.

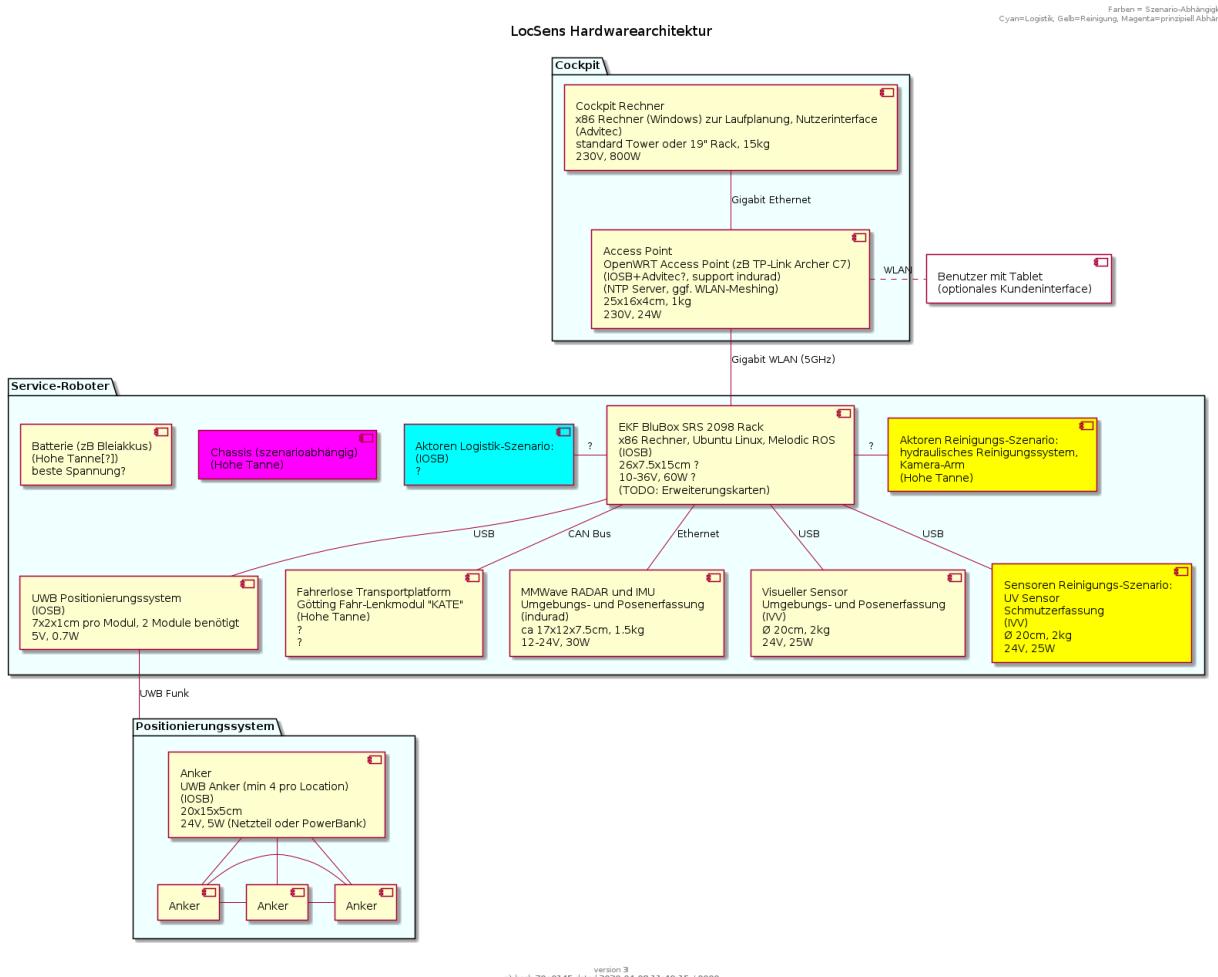


Abbildung 1: Übersicht über den modularen Hardwareentwurf inklusive abstrakter Schnittstellenangabe

Eine nicht weiter verfolgte Alternative bestand im Aufbau als Verbund aus Rechnerkomponenten, sodass jedes Sensorelement auch seinen eigenen Rechner zur Ansteuerung und Auswertung mitbringt, die dann im Fahrzeug per Netzwerk zusammen arbeiten. Aus Sicht der Softwareintegration wäre dieser Weg wesentlich einfacher gewesen, allerdings hätte der Platzbedarf für die einzelnen Komponenten und der Gesamtenergiebedarf des Systems deutlich größere Fahrzeuge erfordert.

Entsprechend der Modularität erfolgt die Realisierung des Softwaresystems innerhalb des so genannten „*Robot Operating System (ROS)*“, einzelne Programmteile oder Knoten konnten so relativ einfach ausgetauscht bzw. angepasst werden. Damit war auch die verteilte Entwicklung an den unterschiedlichen Subsystem relativ einfach manageable.

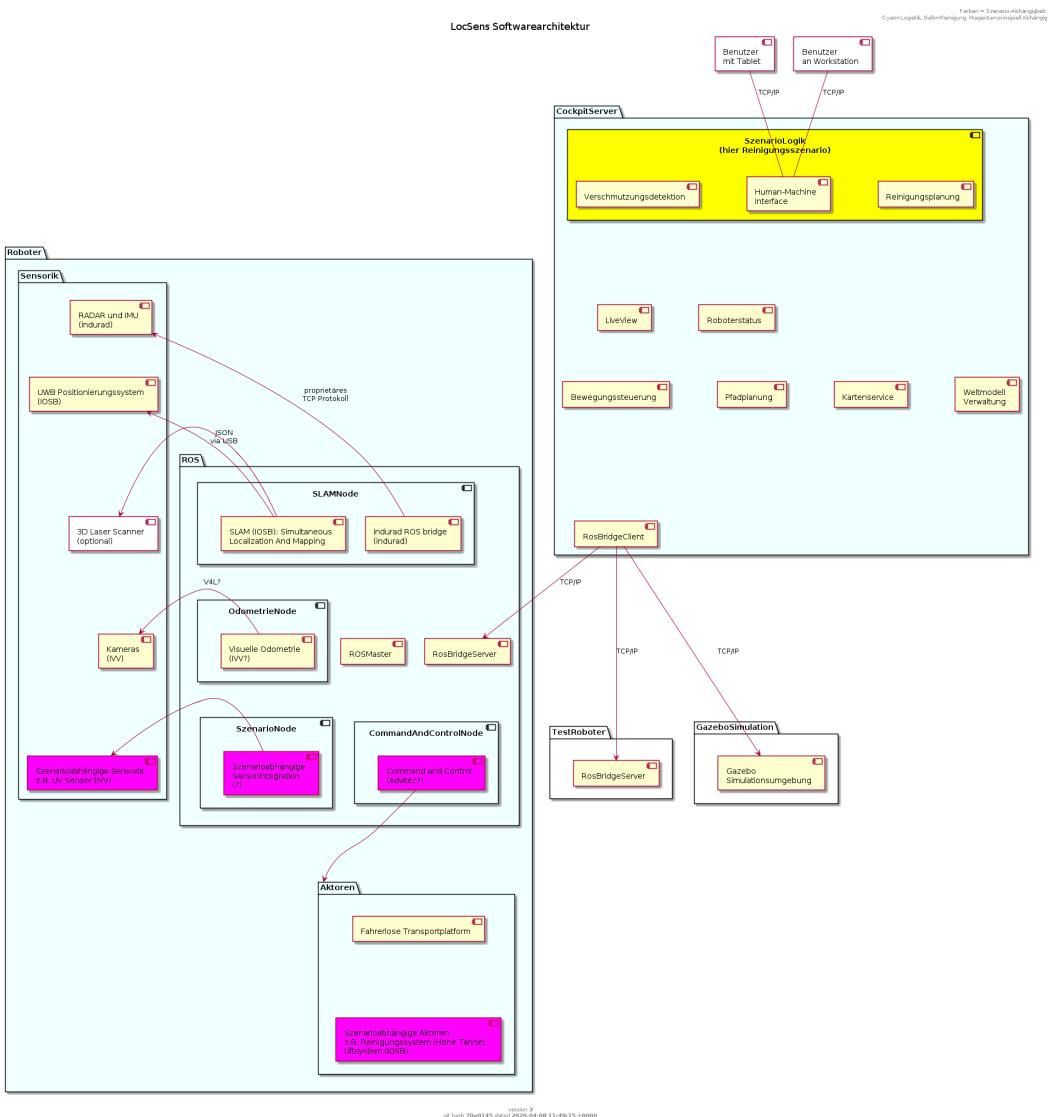


Abbildung 2: Übersicht der Softwarearchitektur für das Multisensorsystem mit zusätzlichen szenarienspezifischen Komponenten

2.1.3 3D Umfelderfassung und Lokalisierung

Innerhalb dieses Arbeitspaket erfolgten die Untersuchungen und Bewertung von verschiedenen Methoden für einen Netzaufbau und für die Positionsbestimmung sowie Hard- und Firmwareentwicklung.

Für den Aufbau des Lokalisierungsnetzwerks, d. h. für die Ausbringung von Anchorn, die Positionsbestimmung der Anchor und für den Informationsaustausch innerhalb des Netzwerks sind verschiedene Verfahren möglich. Die Anchor können dauerhaft und fest in Anlagen installiert sein oder nur bei Bedarf aufgebaut werden. Die Positionsbestimmung der Anchor kann extern erfol-

gen, indem beispielsweise deren Position mit einem Tachymeter bestimmt werden. Im Gegensatz dazu ist auch das automatisierte Einmessen durch die Anchor selbst möglich, wenn bestimmte Randbedingungen eingehalten werden können. Hinsichtlich des Informationsaustauschs zur Anchorverfügbarkeit und deren Position sind im Projektverlauf zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze realisiert worden:

Nach dem Einmessvorgang der Anchor wird deren Positionsinformation aufbereitet und den Tags zur Verfügung gestellt, sodass dies einem zusätzlichen Vorgang entspricht, der nicht weiter parallelisiert werden kann.

Im Gegensatz dazu kann eine Anchorposition auch drahtlos mittels UWB-Übertragung sofort in der Nähe des Anchors propagiert werden, sobald diese bekannt ist. Somit ist kein separater Austauschvorgang erforderlich. Bei diesem Verfahren konnte zugleich auch die Datenmenge, die verteilt und gespeichert werden muss, reduziert werden, da die Information nur lokal begrenzt vorliegt und nicht global vorgehalten werden muss. Tags, die nicht in Funkreichweite sind, können die Information ohnehin nicht nutzbringend für eine Positionsbestimmung verwenden, da dann auch keine Abstandsbestimmung möglich ist.

Für den automatisierten Netzwerkaufbau müssen die Anchor in zwei Betriebsarten operieren. Initial starten diese als stationäre Tags und bestimmen ihre Position mit Hilfe von bereits vorhandenen Anchorn. Sobald der Einmessvorgang abgeschlossen und die Güte der Positionsbestimmung ausreichend hoch ist, wechselt das Modul in den Anchormodus, verteilt seinen aktuellen Status an die Netzwerkteilnehmer in seiner Nähe und dient weiteren Tags als Referenzstation für die Positionsbestimmung. So kann mit Hilfe von 3 Anchormodulen ein Koordinatensystem zur Lokalisierung aufgespannt werden. Für den 3-dimensionalen Fall ist ein zusätzliches vieres Modul erforderlich, das außerhalb der XY-Ebene positioniert ist und analog zum vorherigen Modul seine eigene Position ermittelt. Nachdem sich alle Basismodule positioniert haben, ist die Mindestanzahl von Anchorn erreicht, um für einen Tag den Schnittpunkt der Kreise oder Sphären, die sich aus deren Abstandsbestimmung ergeben, zu berechnen. Das so entstehende Gleichungssystem kann mit verschiedenen Verfahren gelöst werden. Im Rahmen des Projekts wurden die Verfahren (*Least Squares Estimation (LS)*), die Taylorreihenentwicklung (TS) und *Two-Stage Maximum Likelihood Estimation (TSML)* für den automatisierten Netzwerkaufbau untersucht. Mit Hilfe einer Simulation wurden die theoretisch erreichbaren Genauigkeiten hinsichtlich der Anchorpositionsgenauigkeit untersucht. Entsprechend der nachfolgenden Diagramme verhalten sich im ungestörten Zustand, d.h. unter reiner Sichtbedingung im Hinblick auf die Abstandsbestimmung, die LS- und die TSML- Schätzungen ähnlich. Die TS-Schätzung liefert schlechtere Ergebnisse. [Frä21]

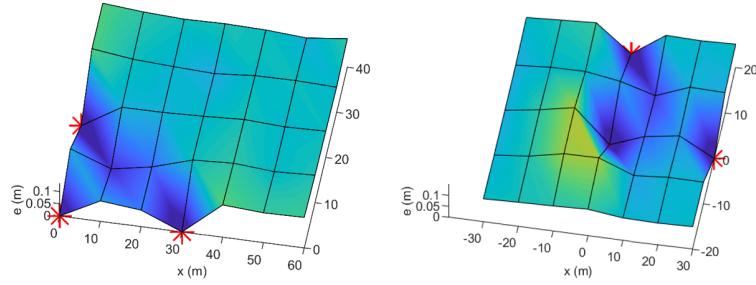


Abbildung 3: Netzwerkaufbau mit Least Squares Methode

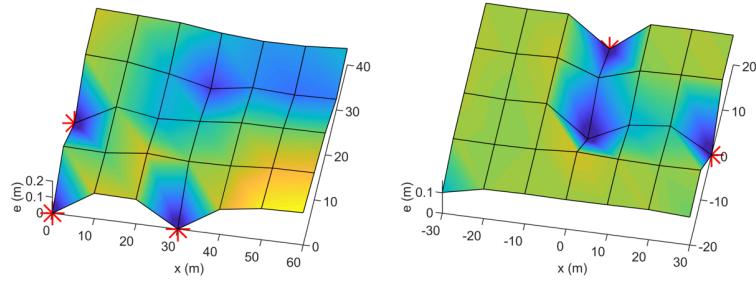


Abbildung 4: Netzwerkaufbau mit Taylorreihenentwicklung

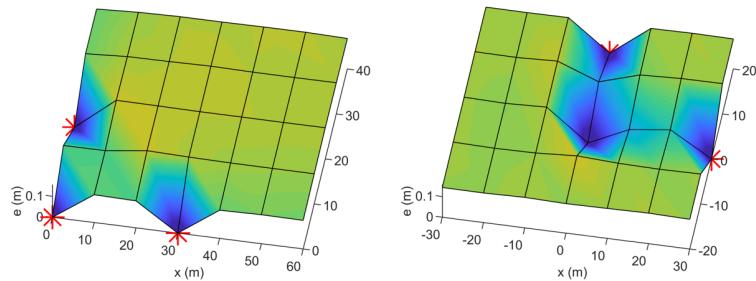


Abbildung 5: Netzwerkaufbau mit TSML

Um mögliche Filteransätze zu wählen bzw. zu bewerten, wurden schließlich wie auch schon eingangs erwähnt, dynamische Testmessungen zur Lokalisierungsgenauigkeit der Tags unter gestörten Sichtbedingungen in einem leerstehenden Bürogebäude durchgeführt. Untersucht wurden verschiedene Methoden zur Filterung der Messpunkte nach Line Of Sight (künftig LOS) und Non Line Of Sight (künftig NLOS) genannt. Für diese Methode wurde die Signalstärke als ein Maß für eine gute Sichtverbindung zu den Anchors verwendet. Dabei wurden die Signale durch verschiedene Schwellwerte kategorisiert. Die Abbildung 6 zeigt den Vergleich der rohen Messdaten zu den anhand der Signalstärke gefilterten NLOS Daten.

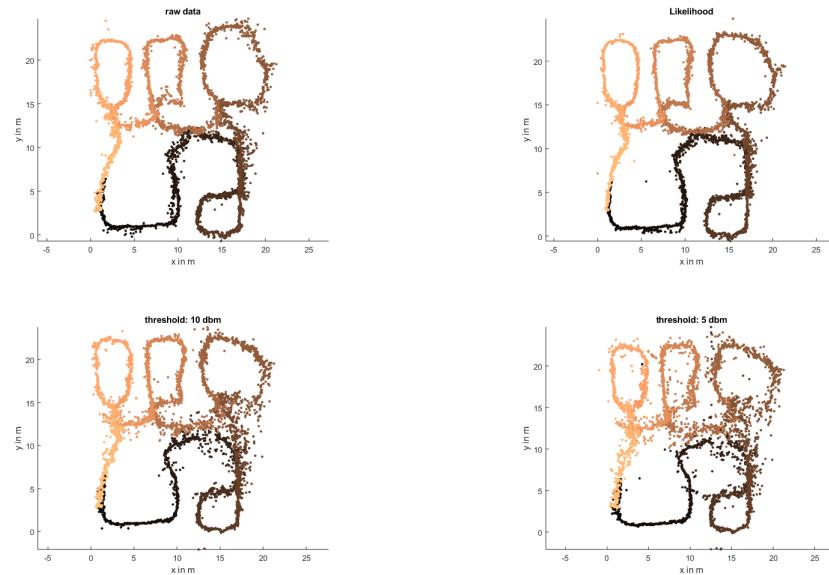


Abbildung 6: Vergleich rohe Messdaten oben links zu Signalstärke NLOS Filter unten rechts, unten links und Two Stage Maximum Likelihood Estimation oben rechts

Widererwartend brachte diese Methode nicht den gewünschten Mehrwert. Ein weiteres vielversprechendes Verfahren ist die Filterung mittels der Two Stage Maximum Likelihood Estimation Methode. Ein Ergebnis der Untersuchungen mit diesem Verfahren ist in der Abbildung 6 oben rechts dargestellt. Es zeigte sich, dass so eine relativ gute Abschätzung für die Messpunktberwertung abgegeben werden konnte. Um die Messdaten des Systems für die Lokalisierung auf künftigen Roboterplattformen anwenden zu können, waren weitere Vorverarbeitungsschritte notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Sprungfilter implementiert. Die Abbildung 7 zeigt die gefilterten Ergebnisse im Vergleich zu den Rohmessdaten während einer spiralförmigen Testfahrt. [Neu23]

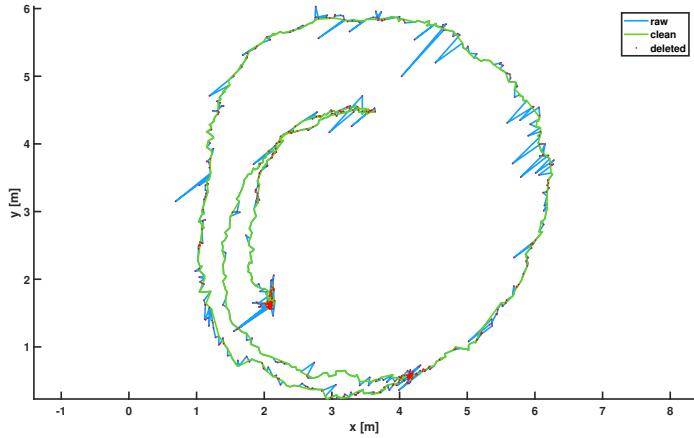


Abbildung 7: Ergebnisse des implementierten Sprungfilters: blau Rohdaten, grün gefilterte Ausreißer und Sprünge

Für die abschließenden Tests wurden ganzheitliche Datensätze der verschiedenen Systeme und Domänen aufgezeichnet. Dies konnte durch die hergestellte Kompatibilität der RTLS Flares zur Middleware ROS geschehen. Die Tests und Datenaufzeichnungen wurden in umfangreichen Messkampagne im so genannten „Hardware in the Loop“ Labor des Fraunhofer IOSB-ASTs, künftig HiL genannt, durchgeführt. Neben diesen wurden einige Messungen auch im Freiland aufgezeichnet. Diese beiden Messkampagnen unterschieden sich nicht nur in der Wahl ihrer Umgebung und somit in den vorhandenen Störeinflüssen sondern auch im grundlegenden Aufbau. Während die Messungen im Labor von einem statisch eingemessenen Koordinatensystem ausgehen, wurde bei der Messung im Freiland ein Koordinatensystem gewählt, welches sich mit dem robotischen Fahrzeug bewegt. Ziel dieser Messungen im Außenbereich ist es, die Relativpositionen von Objekten zum Fahrzeug zu bestimmen, ohne zusätzliches Wissen über globale Koordinatensysteme, deren Struktur und der jeweiligen Transformationen untereinander. Diese Situationen decken im wesentlichen Anwendungsfälle der Logistik ab, in denen Waren oder Güter identifiziert und zur weiteren Manipulation möglichst genau lokalisiert werden müssen. Für die Untersuchungen im HiL wurde ein kartesisches Koordinatensystem mit Ausrichtung an der räumlichen Struktur des Labors gewählt. Dafür wurden die Positionen der feststehenden RTLS-Anchor mittels Tachymeter eingemessen. Zweck ist die Schaffung einer genauen Referenz die auch zur späteren Validierung dienen soll. Dabei wurden die beiden Längswände des Labors mit je 6 Anchor versehen, 3 in knapper Höhe 0,3 m über dem Fußboden und 3 in 3 m Höhe. Zudem wurde ein Wandsystem, mit der Möglichkeit verschiedener Beplankungen aufzunehmen, raummittig als definiert änderbarer Störeinfluss eingebaut. Die Abbildung 14 zeigt dies. Auf definierten Bahnen sollen somit wiederholgenau Messfahrten zur Datenerhebung getätigter werden können.

Für das UWB-Funklokalisierungssystem wurden im Projekt zwei unterschiedliche Hardwareausprägungen angestrebt. Eine Variante für die Tags zur Integration in mobile Roboter und eine Zweite, die als sogenannte Anchor das Lokalisierungsnetzwerk aufspannen. Als Tags konnte die bereits existierende Version der sogenannten „*RTLSflares*“ nutzbar gemacht werden. Da diese bereits weitestgehend miniaturisiert war und keine moderneren Funkchips auf absehbare Zeit verfügbar waren, wurde die Hardware zu den Tags im Projektverlauf nicht weiterentwickelt. Wesentliche Verbesserungen hätten sich nur durch Änderungen hinsichtlich der Aufbau- und Verbindungstechnik ergeben: Die Verwendung von sogenannten *Bare Dies* hätten einen noch kompakteren Aufbau ermöglichen, allerdings ist die erwartete Stückzahl innerhalb der ange strebten Verwertung zu gering, um hier diesen Technologiesprung durchzuführen. Die Fertigung der Module würde dann Reinraum-Technik erfordern, sodass dies nur im Nachgang erstrebenswert erscheint, wenn Stückzahlen größer als 1 Millionen Einheiten absehbar sind. Für die Anchormodule wurde während des Projekts ein neues Konzept entwickelt. Dies sieht neben dem erhöhten IP-Schutz für die Module einen roboterunabhängigen Kommunikationsrueckkanal vor.

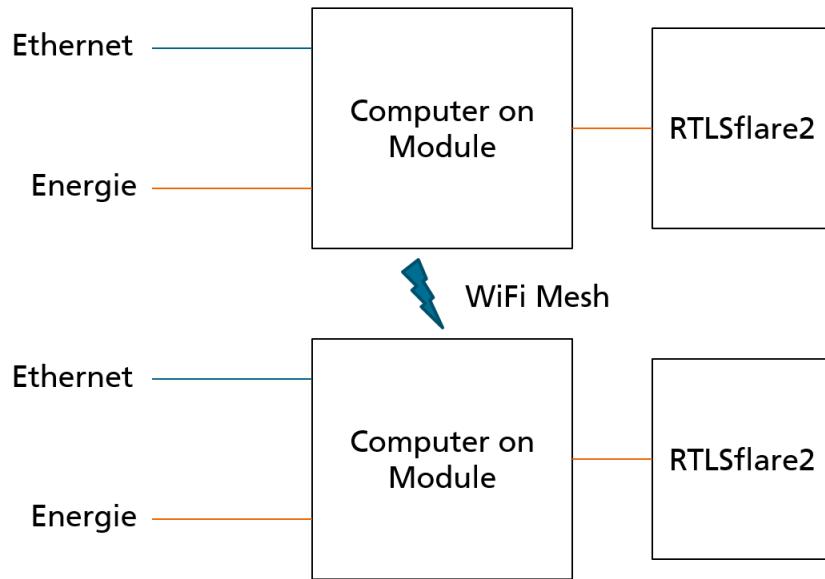


Abbildung 8: Konzept für die neuen Anchormodule

Das entwickelte Konzept, dargestellt in Abb. 8, ist so gestaltet, dass die Hardware der Tags auch in ein größeres Gehäuse aufgenommen werden kann. So kann die elektrische Energieversorgung auch unter dem Schutz vor den szenariospezifischen Umgebungseinflüssen gewährleistet werden. Für die Anchormodule wurde zusätzliche Rechenleistung installiert. Dadurch konnte eine Ethernet-Netzwerkinfrastruktur ermöglicht und letztlich auch die Möglichkeit geschaffen werden, räumlich verteilte mobile Systeme zentral zu überwachen, ohne die dezentrale Struktur

des Lokalisierungssystems aufzugeben. Hardwaretechnisch wurden hierfür Computer on Module Systeme verwendet. Das entwickelte Konzept konnte in 5 Labormustern realisiert werden. Die Abbildung 9 zeigt ein CAD-Modell des Hardwareentwurfs der ersten Labormuster.

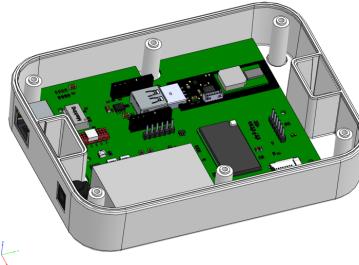


Abbildung 9: CAD der Anchorzusatzmodule

Die entwickelten Systeme bieten neben dem Netzwerkinterface auch die Möglichkeit, Log- oder Messdatensätze auf einer integrierten SD-Karte zwischen zu speichern und Parametersätze für das Lokalisierungssystem über diese SD-Karte zu lesen. Die Energieversorgung ist über den Standard IEEE802.3af realisiert wurden.

Um die Voruntersuchungen zur UWB-Funklokalisierung im Projekt bestreiten zu können, wurden Anpassungen an der vorhandenen Firmware der *RTLSflares* vorgenommen. Dies betraf im Wesentlichen die folgenden Punkte:

- Auswahl der Anchor entsprechend des Abstands zum Tag
- Ausgabe der Kanalparameter wie empfangene Leitung und Leistung im vermuteten *First Path*
- vereinfachte Vorgabe der Anchorpositionen beim externen Positionen der Referenzen
- erweiterte Reportfunktionalität der RTLS Flares

Durch diese Änderungen konnten einige Voruntersuchungen deterministischer durchgeführt werden.

Im Weiteren konnte für die Zusatzmodule eine Meshfunktionalitäten sowie die bereits erwähnte Datenzwischenspeicherung und Adhoc Umkonfiguration der Module implementiert werden. Durch die im Kommunikationsprotokoll der RTLS-Flares implementierten speziellen Tag-Reports können künftig alle verwendeten Tag-Module in einem Netzwerk die Positionsinformationen anderer Tags abgreifen. Durch diese Funktionalität ist es nun möglich, die Flares einfacher in bestehende Systeme zu integrieren. Diese Erweiterung half auch bei der Entwicklung übergeordneter Filteralgorithmen, da mit den Informationen anderen Teilnehmer im Netzwerk ein besseres Verständnis der Einsatzumgebung gewonnen werden konnte.

Durch die Änderungen an der USB-Datenschnittstelle konnte die Stabilität der Kommunikation

mit der Applikation erhöht werden. Dabei wurde bei der Protokollwahl auf Generalisierbarkeit geachtet. Durch diesen Schritt konnten die RTLS-Flares letztlich auch in der bereits etablierten Roboter Middleware ROS implementiert werden.

Ein wesentliche Verbesserung der inhärenten Kommunikation des RTLS-Systems konnte durch die Anpassung der Signalenergie pro Datenpaket erzielt werden. Durch diesen Schritt zum Standard IEEE 802.15.4a wurden etwaige Reichweiteinbußen in Kauf genommen, um die Anzahl der möglichen Sendeslots pro Zeiteinheit zu erhöhen. Das verbesserte das Zeitverhalten nachhaltig, somit konnte auch der Paketfilter effizienter gestaltet werden. Die Ortsauflösung der RTLS-Flares in Netzwerken mit mehreren Teilnehmern konnte so erheblich gesteigert werden.

2.1.4 Kartierung und Sensordatenfusion

Die ersten Datensätze zur Voruntersuchung der Radarlokalisierung und Kartierung konnten mit der am IOSB-AST verfügbaren Fahrplattform KATE aufgezeichnet werden. Dieses ursprüngliche fahrerlose Transportsystem wurde durch zusätzliche Komponenten wie Energieversorgung und Rechentechnik soweit umgerüstet, dass die im Projektverlauf entstandenen Sensorsysteme aufgenommen und definiert geführt werden konnten. Bei den so aufgezeichneten wiederholbaren Messdaten handelte es sich um die Radodometrie der Fahrplattform, ein Ein-Ebenen360° Scan abgebildet durch zwei auf der Diagonalen des Fahrzeuges angeordnete Ein-Ebenen-Scanner der Firma Sick, sowie ein im Zentrum ausgerichteter Mehr-Ebenen-360°-Scanner der Firma Velodyne. Die notwendigen Radar-Daten lieferte ein vom Projektpartner Indurad zur Verfügung gestelltes Einebenen-RaDAR-System. Die Abbildung 10 zeigt das aufgebaute System inklusive der verwendeten Rechentechnik.

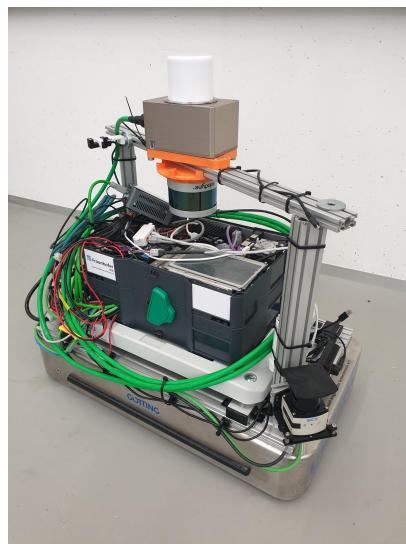


Abbildung 10: Mockup Sensoraufbau auf fahrerlosem Transportsystem KATE

Für die Messungen zu den Voruntersuchungen konnten ebenfalls das leerstehende Labor und die angrenzenden Büroräume genutzt werden. Die Abbildung 11 zeigt eine statische Messung in einem leeren Laborraum. Dabei sind zum Vergleich die Daten des RaDAR-Systems, im Folgenden RaDAR-Scan genannt, mit den Daten der beiden verbauten Ein-Ebenen-Scannern, im folgenden LiDAR-Scan genannt, gegenübergestellt.

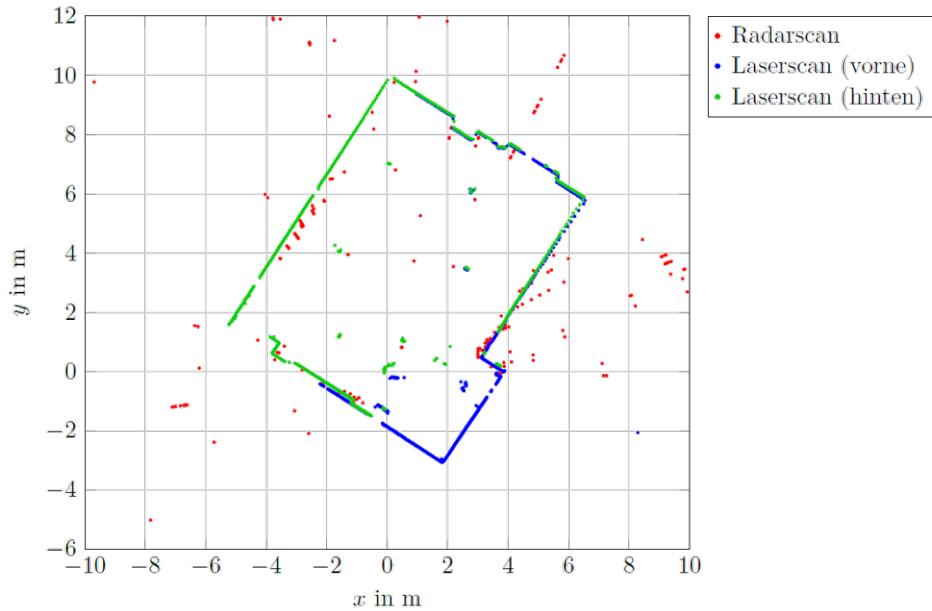


Abbildung 11: Vergleich Radar-Scan und LiDAR-Scan

Deutlich ist im LiDAR-Scan die Struktur des Raumes zu erkennen, während im RaDAR-Scan eine Mehrfachreflektion und Scanpunktthäufungen in der Nähe der Wände zu verzeichnen sind. Die Häufelungen und Reflektionen sind dabei abhängig von der Scan-Position und -Ausrichtung. Diese Effekte machten weitere Vorverarbeitungsschritte der RaDAR-Scans vor dem Scan-Matching bzw. Slam notwendig. Zur Bewertung und als Referenz wurde vom Testszenario eine colorierte Punktfolge mit einem FARO 3D Scanner aufgenommen. Die Abbildung 12 zeigt die erstellte Punktfolge.

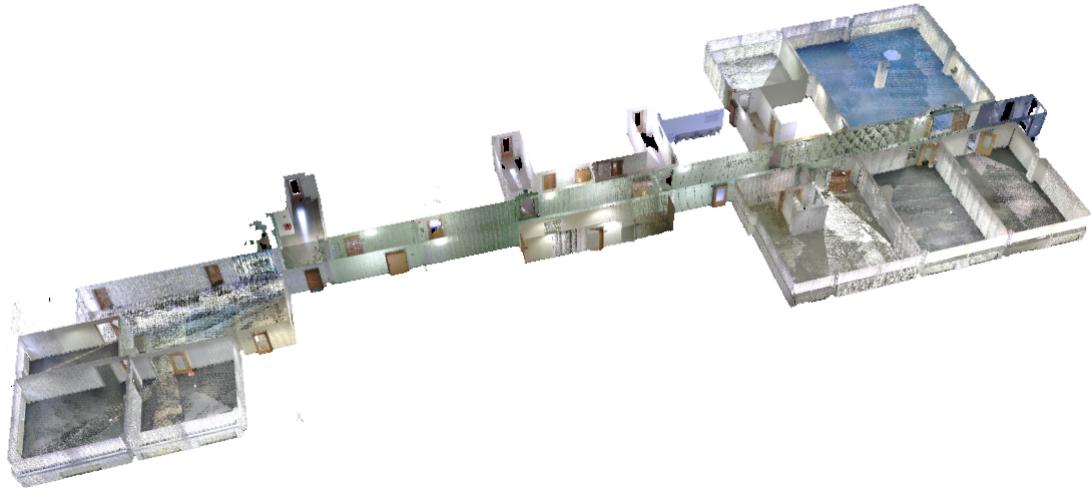


Abbildung 12: 3D-Punktwolke als Referenzmessung. Aufgezeichnet mittels FARO S150

Die nachfolgenden dynamischen Messungen wurden im Zusammenhang mit den Testfahrten für die UWB-Lokalisierung durchgeführt. Auf Basis der so aufgezeichneten Messdaten konnten erste Erkenntnisse zu möglichen Scan-Matchern für die relative Lokalisierung gewonnen werden. Die im Weiteren beschriebenen Verfahren konnten so auf benötigte Ausführungszeit und somit auf Tauglichkeit für eine Echtzeitanwendung bewertet werden. Die Abbildung 13 zeigt einen dieser Vergleiche der relativen Fahrzeuglokalisierung über die Radodometrie und die berechneten Odometrien über die Scanmatcher RTCSM und NDTSM. Für Aussagen über die Genauigkeit der Scanmatcher für die absolute (globale) Lokalisierung wurden weitere Testmessungen mit externen Referenzen aufgezeichnet.

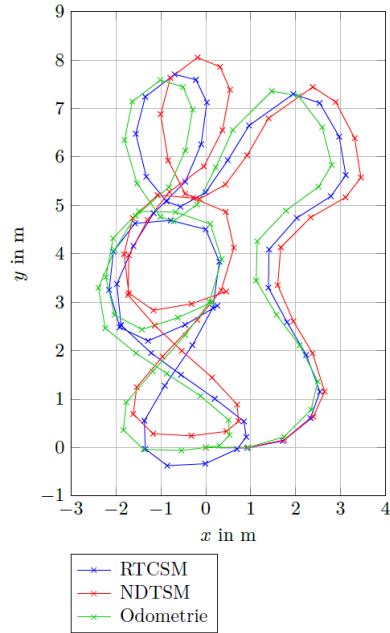


Abbildung 13: Vergleich der Radodometrie mit der relativen Lokalisierung mittels RTC und NDT Scanmatchern

Diese Datenerhebung konnte ebenfalls parallel mit der für das RTLS-Lokalisierungssystem im HiL stattfinden. Zu den aufgezeichneten RaDAR-, RTLS- und LiDAR-Messdaten erfolgte die zeitsynchrone Aufnahme von globalen Positionsdaten unter Zuhilfenahme eines robotischen Tachymeters zur Verfolgung eines Prismas.

Diese Messmethode bietet bei direkter Sicht auf das Prisma eine Genauigkeit im Millimeterbereich. Die somit aufgezeichneten Positionsdaten wurden fortan als Ground-Truth in den Datensätzen verankert.

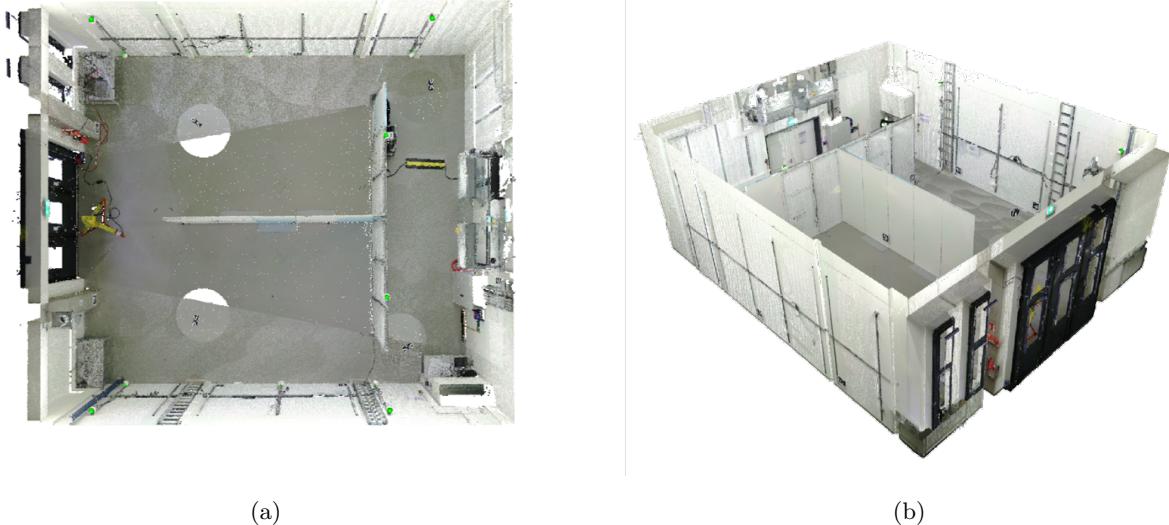


Abbildung 14: 3D Aufnahme des Aufbaus eines Szenarios im HiL(Hardware in the Loop Labor des Fraunhofer IOSB-AST (a) Topview, (b) in Perpektive

Um verschiedene Szenarien im Labor aufzeichnen zu können, wurde die Grundfläche wie bereits erwähnt mittels Messeschnellbauwandsystem unterteilt. Hierzu wurde wie in Abbildung 14 Wandsysteme in Form eines T in der Mitte des Raumes platziert. Eine direkte Sichtverbindung zwischen den Raumhälften wurde somit unterbunden. Die Wandsysteme bestehen aus Aluminiumrahmen, die mit verschiedenen Wandbelägen versehen werden können. Die Messungen konnte so unter verschiedenen Bedingungen für die Funk- und Radarausbreitung wiederholt werden. Die mittleren Wandbeläge wurden zu den jeweiligen Messungen mit reinen bzw. mit aluminiumkaschierten Kunststoffplatten beplankt. So können mit Hilfe des Systems verschiedene definierte Umgebungsbedingungen geschaffen werden, wie sie in der Lebensmittelindustrie über Lagerlogistik bis hin zu normalen Haushalten vorkommen. Als Ergebnis konnten wertvolle multisensorische synchronisierte Messdatensätze erstellt werden. Sie beinhalten Messdaten der verschiedenen Systeme und Domänen. Neben den bereits genannten RTLS-Messdaten(UWB) sind dies LiDAR, RaDAR, Ground-Truth(Tachymeter), auch die Odometriedaten der Fahrzeugplattform und Daten von verschiedenen Kamerasystemen sowie IMU-Daten mit Beschleunigungs-, Drehraten- und Magnetometerdaten. Um die visuellen Daten wie Kamera LiDAR gezielt zu stören, wurde in dedizierten Messungen der Raum ab einen bestimmten Zeitpunkt mit künstlichem Bodennebel geflutet.

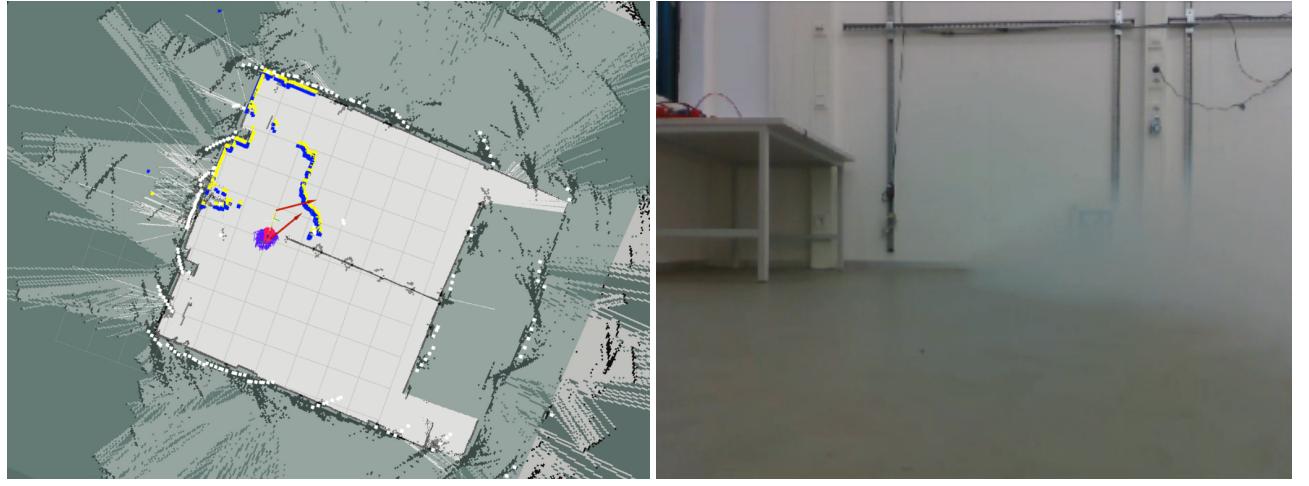


Abbildung 15: Lokalisierung der Scanmatcher für LiDAR und RaDAR während Sichtbehinderung durch Nebel auf einer Belegtheitskarte (a) LiDAR-Daten in Gelb und Blau, RaDAR-Daten in Weiß (b) Kameraansicht aus dem Fahrzeug während der Sicht einschränkung

Die Abbildung 15 zeigt die Scanmatcher in einer aufgezeichneten Karte während der Testfahrt im HiL zum Zeitpunkt der schlechten Sichtbedingungen. Zu erkennen sind die LiDAR Messdaten in Gelb und Blau die RaDAR Messdaten in Weiß. Die Belegtheitskarten mit verschiedenen Grauwerten spiegeln die Karten der Umgebung für RaDAR und LiDAR im Overlay wieder. Neben den Karten ist zur Verdeutlichung der Situation ein Live- Bild der Kamera des Fahrzeugs abgebildet. Im Bereich der Sichtbehinderung ist deutlich die Abweichung der LiDAR-Messdaten von der zugrundeliegenden Karte zu erkennen, wohingegen die RaDAR-Messdaten weiterhin auf die bestehenden Features in der Karte treffen. Dies hat gezeigt, dass die RaDAR Messdaten weiterhin für eine stabile Lokalisierung beitragen können.

Wesentlicher Kern der SLAM-Verfahren ist das sogenannte Scan-Matching. Ziel dessen ist es, eine Transformation zu berechnen, welche den aktuellen Scan optimal auf dem zuvor aufgenommenen Referenzscan abbildet. Dabei wird der Berechnungsprozess der Transformation als Registrierung der Scans bezeichnet. Es konnten drei unterschiedliche Scan-Matching-Verfahren implementiert werden: Der Normal Distribution Transformation Scanmatcher, fortan NDTSMS genannt, der Realtime Correlative Scanmatcher, fortan RTCSM genannt, und ein Scanmatcher basierend auf der Fouriertransformation, FFTSM genannt.

Um die Transformation der Scans für die Registrierung zu bestimmen, wird beim NDTSMS ein Optimierungsproblem gelöst. Die Scans werden dazu in ein horizontaless Grid eingetragen.

Für jede Zelle, in die mindestens drei Scanpunkte des Referenzscans fallen, wird eine Normalverteilung aus allen Scanpunkten des Referenzscans innerhalb dieser Zelle berechnet. Jede dieser Zellen enthält somit einen Schwerpunkt und eine Kovarianzmatrix. Die Normalverteilung repräsentiert die Wahrscheinlichkeit, an einer beliebigen Stelle innerhalb der Zelle einen Scanpunkt zu messen. Für die Registrierung eines aktuellen Scans wird dieser zunächst mit einer Transformation in das Koordinatensystem des Referenzscans transformiert. Anschließend erfolgt anhand der Normalverteilungen innerhalb der Zellen für jeden Scanpunkt die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, diesen Scanpunkt an der transformierten Position zu messen. Eine Summe über alle Einzelwahrscheinlichkeiten der Scanpunkte bildet einen Gütwert, der die Wahrscheinlichkeit repräsentiert, dass die Aufnahme des aktuellen Scans unter der Transformation relativ zum Referenzscan stattfand. Eine Maximierung dieses Gütwertes führt auf die optimale Überlagerung der Scans und somit auf die optimale Transformation. Für die effiziente Berechnung des Beobachtermodells verwendet das RTCSM-Verfahren zwei Raster-Lookup-Tabellen mit unterschiedlichen Auflösungen. Jede Zelle der Lookup-Tabellen stellt hierbei eine diskrete Position einer Karte der realen Welt dar. Die Zellen enthalten Wahrscheinlichkeitswerte, was ein Sensor an der zur Zelle gehörigen Position innerhalb der Karte ein Objekt misst. Als Karte verwendet das RTCSM-Verfahren den Referenzscan. Somit erfolgt die Generierung der Lookup-Tabellen aus dem Referenzscan, wobei der Ursprung des Referenzscans im Zentrum der Lookup-Tabellen liegt. [Ols09] Mit einer Transformation T gemäß einer Pose des Posenraumes erfolgt die Projektion des aktuellen Scans in das Koordinatensystem des Referenzscans. Somit kann für jeden Scanpunkt des aktuellen Scans ein Wahrscheinlichkeitswert, an dieser Position ein Objekt zu messen, aus der Lookup-Tabelle ausgelesen werden. Die Summe dieser Wahrscheinlichkeitswerte für alle Scanpunkte ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, den aktuellen Scan mit den Parametern der gewählten Transformation T relativ zum Referenzscan aufgenommen zu haben. Die Durchführung der Transformation des aktuellen Scans mit anschließender Wahrscheinlichkeitsberechnung über alle Scanpunkte für alle Posen eines Posenraumes stellt die Auswertung des Beobachtermodells dar. Hierbei repräsentiert diejenige Pose, die zum maximalen Gesamtwahrscheinlichkeitswert führt, die Transformation der optimalen Überlagerung der beiden Scans. [Mes19] Beim FFTSM-Verfahren erfolgt die Ermittlung der Transformation zwischen zwei Scans durch die Ausnutzung der Verschiebungseigenschaft der FT. Hierbei werden zunächst der Rotationswinkel und anschließend die Parameter der Translation zwischen den Scans bestimmt. Für die Berechnung des Rotationswinkels zwischen den Scans werden Bilder aus dem Referenz- und dem aktuellen Scan generiert.

Es zeigt sich, dass bei moderaten Bewegungsänderungen die gewählte Implementierung des RTCSM die für ein Onlineverfahren günstigsten Zeitverhalten aufweist.

Auf Basis der untersuchten Scanmatcher wurde mit Hilfe des Radarsystems und des implementierten partikelfilterbasierten SLAM-Karten aufgenommen. Diese ähneln denen der mittels

LiDAR aufgezeichneten Belegtheitskarten. Einen wesentlichen Unterschied stellen die Reflektionen, Mehrwegeausbreitung und Durchdringbarkeit verschiedener Medien dar. Sind die mittels LiDAR aufgezeichneten Karten oft für den menschlichen Betrachter noch gut lesbar, da sie Ähnlichkeiten zu Grundrisszeichnungen aufweisen, ist es bei Karten mittels RaDAR schon schwerer möglich, Strukturen wiederzuerkennen.

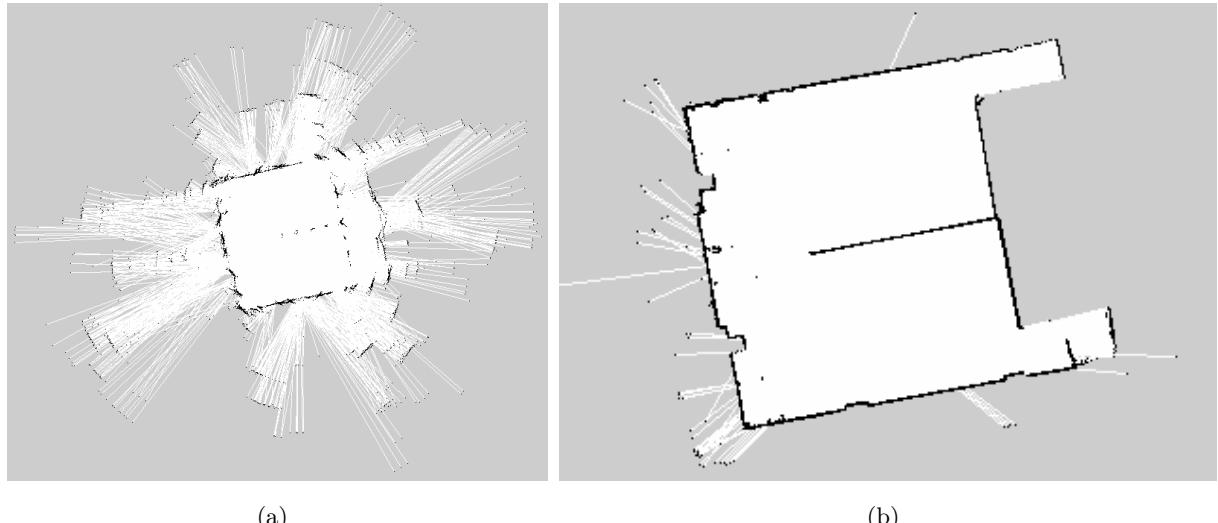


Abbildung 16: Vergleich (a) RaDAR- mit (b) LiDAR-Karte des HiL-Labors am Fraunhofer IOSB-AST

Die Abbildung 16 zeigt zwei Karten im direkten Vergleich. Erkennbar ist hier vor allem die Durchdringung der Leichtbauwandstrukturen und die Mehrfachechos an stark echogenen Bau teilen wie Wandstützen des Messeschnellbauwandsystems.



Abbildung 17: Messaufbau zur Sensorqualitätsbewertung, RTLSAnchor auf schwarzem Stativ, Tachymeter-Referenzmessstation auf gelben Stativ, Fahrplattform mit vorbereiteter Sensortechnik

Die Abbildung 17 zeigt einen Messaufbau der Fahrplattform mit den Sensoren der RTLS-Flares sowie dem Radar iSDR-C der Firma Indurad. Das angebaute Prisma stellt dabei den Zielmarker für die Positionsreferenzstation das Leica Tachymeter MS60 dar.

Mit Hilfe der beschriebenen Messkampagnen konnten die Genauigkeiten der verschiedenen Systeme RTLS, Rad-Odometrie, visuelle Odometrie so wie Lokalisierung mittels RaDAR und LiDAR quantifiziert werden. Für das RTLS-System wurde die Genauigkeiten in Abhängigkeit der an die Sichtbedingung untersucht. Hierbei wurde nach LOS(line of sight) und NLOS(non line of sight) Situationen unterschieden.

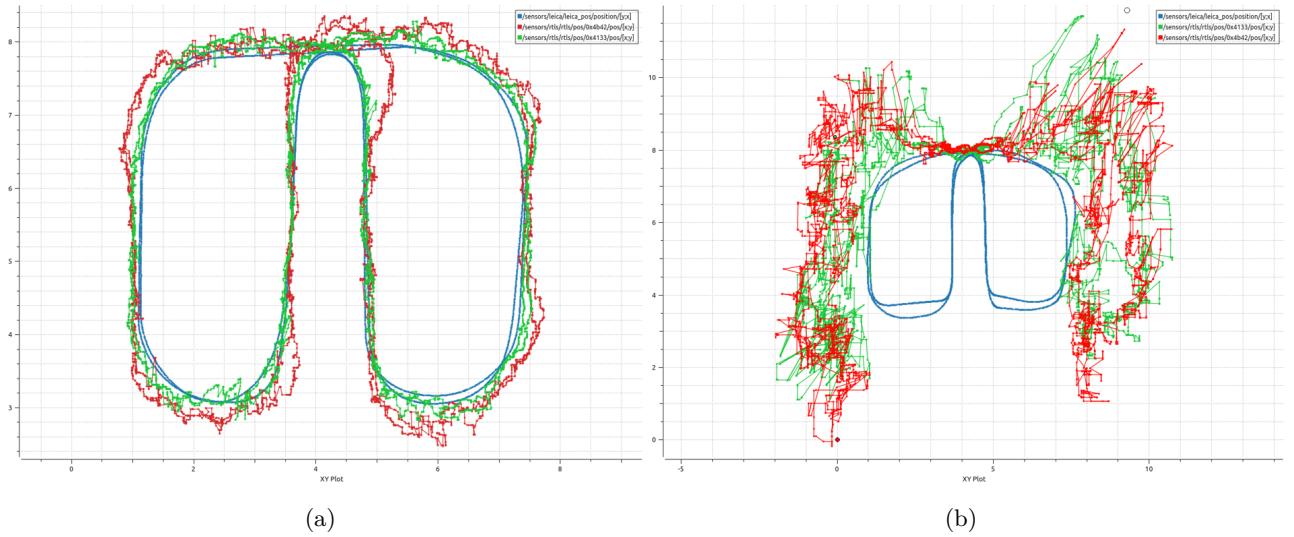


Abbildung 18: Vergleich der RTLS Lokalisierung
 (a) Line of Sight mit der RTLS Lokalisierung
 (b) Non Line of Sight

Die Abbildung 18 stellt einen Vergleich der RTLS-Lokalisierung unter den verschiedenen Sichtbedingungen dar. Als Referenz (Ground Truth) ist zudem die Lokalisierung mittels Prisma und der robotischen Totalstation in Blau abgebildet. Die Kurven spiegeln die Positionen während der Messfahrten im HiL um das aufgebaute Wandsystem wieder. Neben der gemessenen Position der RTLS-Flares über dem Prisma (in Grün) ist auch die Position eines weiteren RTLS-Systems an der Fahrzeugfront (in Rot) aufgezeichnet. Das nicht spurtreue Folgen des Pfades in Grün ist mit der Drehschemelkinematik des Versuchsfahrzeuges zu erklären. Mit der Bildung des Vektors aus einer zeitlich zusammengehörigen Messung der Fahrzeugfront und dem -heck wird die Ausrichtung des Fahrzeugs im aufgespannten Koordinatensystem ermittelt. Zu erkennen ist, dass die Lokalisierungsgüte im abgeschatteten Bereich sich von wenigen Zentimeter um ein Vielfaches verschlechtert auf Bereiche von wenigen Metern. Die Reflexionen und Mehrwegeausbreitungen an den Aluminium kaschierten Wänden spielen hierbei eine wesentliche Rolle. Um im Filter die Steuerung über die Vertrauenswerte der Messsignale zu gewährleisten, wurden Metriken in den Messdaten gesucht, die eine sichere Detektion von LOS und NLOS ermöglichen.

Zur Fusion der Sensordaten aus den verschiedenen Domänen wurde die Implementierung eines Kalmanfilters verwendet. Neben den Modellbeschreibungen der Lokalisierungsverfahren bildeten hier die Vertrauenswerte der Lokalisierungen aus den verschiedenen Sensorendomänen eine wesentliche Grundlage. Das implementierte Filter konnte mit Hilfe der aufgezeichneten Messwerte parametrisiert werden. Zur Steuerung des Filters wurde die Varianzen der verschiedenen Messverfahren verwendet. Anhand spezieller Metriken konnten sie so an die jeweilige Umgebungssituationen für die Funklokalisierung (z.B. LOS oder NLOS) angepasst werden. Somit

konnte Schwankungen bei der Lokalisierung ausgeglichen werden.

2.1.5 Entwicklung Simulation und Demonstratoren

Zur Unterstützung der Simulation des Service-Roboter wurde ein universelles Roboterbeschreibungsmodell erstellt. Für die Beschreibung des Roboters wurde das URDF Format (universal robot description format) gewählt. Die Abbildung 20 zeigt die Baumstruktur des erstellten Modells. Beginnend von *BaseLink* werden die Positionen und Achsen der Gelenke beschrieben.

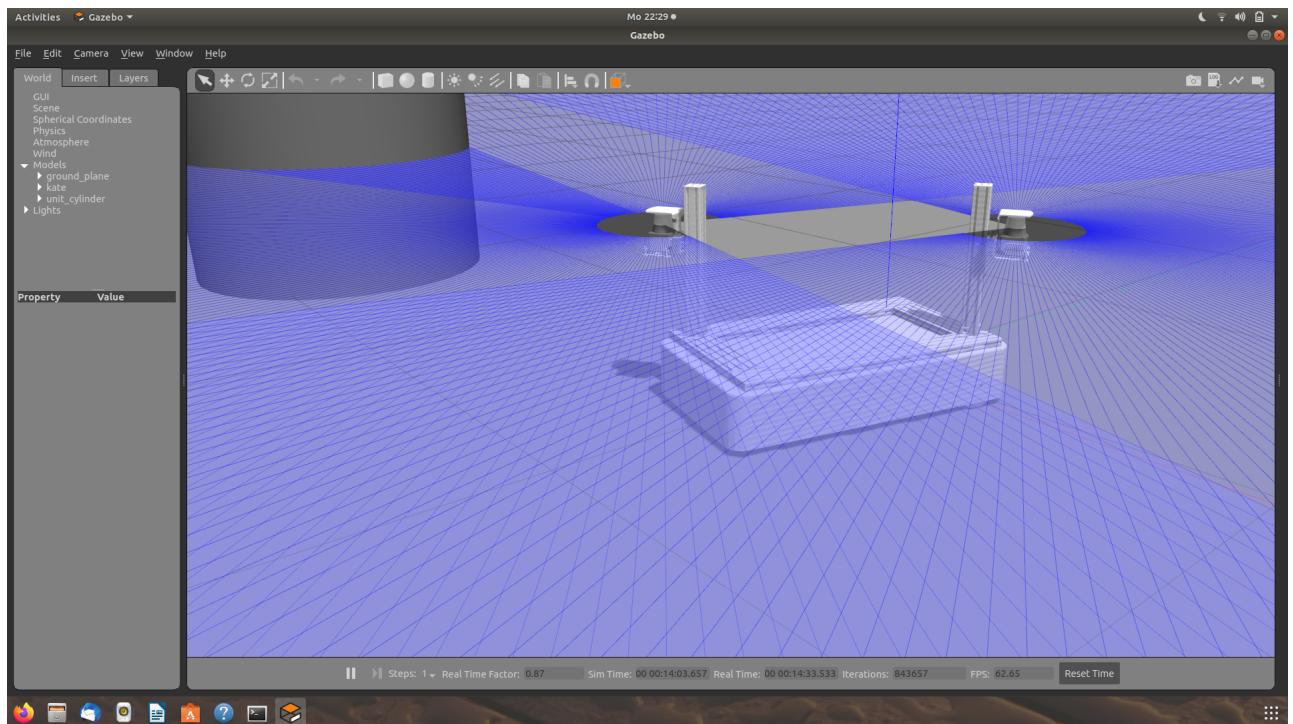


Abbildung 19: URDF Modelldarstellung in Simulationsumgebung inkl. modellierter 2D-LiDAR-Sensorik als blaue Strahlen angedeutet

Somit beinhaltet das Beschreibungsmodell neben den geometrischen Abmessungen und Massenverteilungen auch die kinematische Beschreibung des Roboters. Die Mockup-Plattform, die auch für die ersten Testmessungen Verwendung fand, wurde hier beispielhaft modelliert. Die Abbildung 19 zeigt eine Darstellung des Robotermodells. Eingebettet wurde es in die Simulationsumgebung Gazebo. Durch diesen Schritt wurde es möglich, die verwendeten LiDAR- und Kamera-Sensoren zu modellieren. Um eine Simulation zu erlangen, die realitätsnah an den Einsatzszenarien ist, wurden Teile eines nahrungsmittelverarbeitenden Betriebs digitalisiert. Die Räumlichkeiten zur Fleischproduktverarbeitung des assoziierten Partners *Chefs Culinar* wurden unter Zuhilfenahme eines FARO Focus S150 eingescannt. Die so gewonnene colorierte 3D-Punktwolke wurde in verschiedene vereinfachte Bereiche als Mesh in die ROS-GAZEBO Simu-

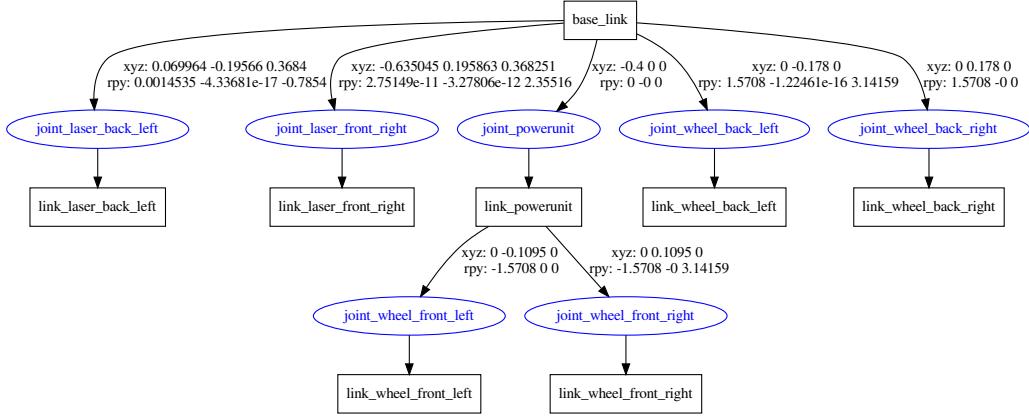


Abbildung 20: Baumstruktur URDF Modell

lation eingearbeitet. Die Simulation der UWB-Funklokalisierung und der des RaDARs wurde auf Grund der notwendigen unterschiedlichen Materialeigenschaften dieser Umgebung nicht in diesem Framework realisiert. Eine Einbindung in das simulierte Szenario hätte zu einer sehr komplexen Simulation geführt.

Um die Lokalisierung in den verschiedenen Szenarien zu demonstrieren und weiter zu entwickeln, wurden Fahrplattformen angeschafft, die in der Lagerlogistik zum Transport von Kleinladungsträgern bereits etabliert sind. Sie bestehen aus einem Antriebs- /Lenkmodul, welches an der Front des Fahrzeugs drehbar gelagert verbaut ist. Das Chassis verfügt weiterhin über 2 in Querrichtung fixierte Räder am Heck. Gesteuert wird die Antriebseinheit über die Differenzgeschwindigkeit der beiden am sogenannten Drehschemel verbauten Antriebsräder. Integriert in der Antriebseinheit ist zudem ein Winkelgeber, der die aktuelle Verdrehung des Drehschemels zur Chassislängsachse bestimmt. Über die Differenzengeschwindigkeit der Antriebsräder und dem gemessenen Winkel kann nun ein Lenkwinkel und eine laterale Geschwindigkeit des Drehschemels und somit der Fahrplattform eingestellt werden. Der aktuelle Zustand des Drehschemels kann über den verbauten CAN Bus ausgelesen und kommandiert werden. Über die Einstellung der Parameter für den Achsabstand Spurweite und Radgröße ist eine direkte Kommandierung der Fahrplattform mittels Längsgeschwindigkeit und Lenkwinkel möglich. Das bedeutet, dass die unterlagerte Geschwindigkeits- und Lenkwinkelregelung bereits integriert ist.

Die Abbildung 21 zeigt die beschriebenen Fahrplattformen. Dabei ist eine der beiden mit einem zusätzlichem Kurzhubmechanismus ausgestattet, um im Logistikzenario eine beispielhafte Last wie etwa für diesen Bereich typische Kleinladungsträger aufzunehmen.

An diesen Plattformen wurden die Funklokalisierungsmodule sowie die RaDAR-Sensorkomponenten



Abbildung 21: robotische Drehschemelfahrplattformen der Demoszenarien. Links mit integrierten Kurzhubtisch, rechts Standardausführung

mechanisch und elektrisch integriert. Als Rechentechnik wurde das beschaffte Compact PCI Serial System verbaut. Die Highlevelfilteralgorithmen so wie die damit verbundene Datenfusion laufen auf dieser Rechenkomponente. Zur Kommandierung und Steuerung der Fahrplattform bietet die verwendete Rechentechnik ausreichend Performanz, um auch die Pfadplanung und dessen Regelung mit abzubilden. Das System wurde so gewählt, dass es einfach möglich ist, die verschiedenen Hardwareschnittstellenmodule, wenn nötig nachzurüsten.

Die Abbildung 22 zeigt den aktuellen Stand eines der Fahrzeuge. Der für die Tests und Messkampagnen genutzte 2D-RaDAR des Partners Indurad befindet sich zentral über der feststehenden Hinterachse des Fahrzeuges.

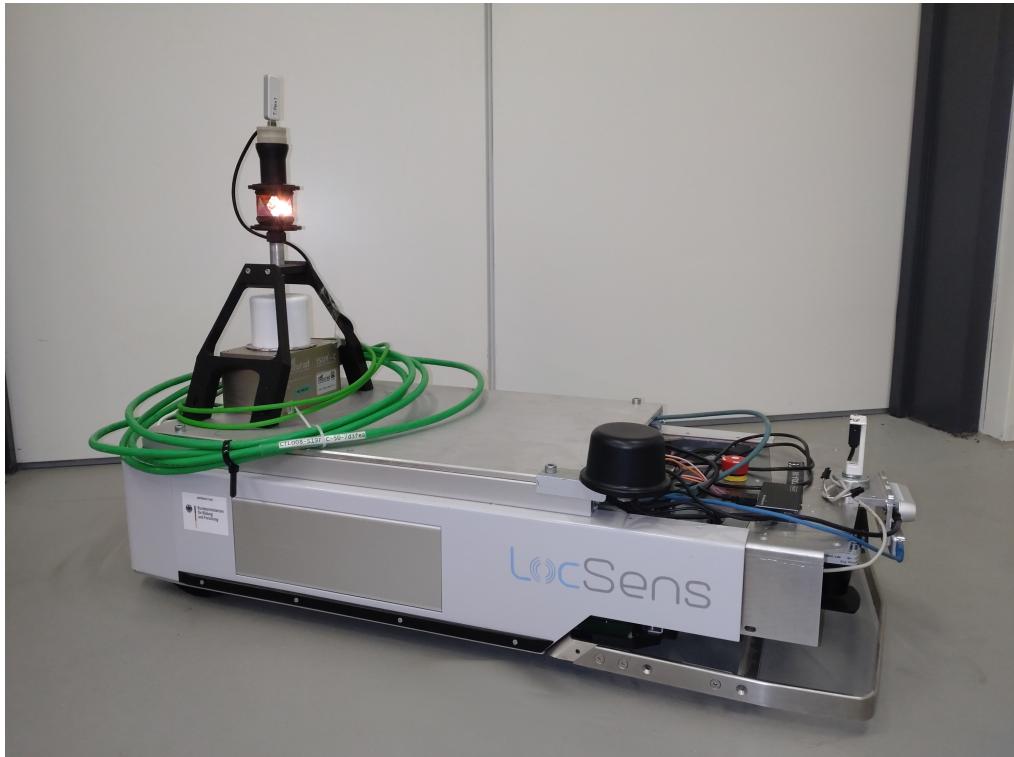


Abbildung 22: Sensor und Messaufbau der Fahrzeugplattform KATE mit Sensoren zur Kartierung und Lokalisierung mittels LiDAR, RaDAR, UWB und vis. Odometrie

Weiter wurde über dem RaDAR-System das Prisma zur Ground-Truth Bestimmung durch das robotische Tachymeter angebracht. Das mobile RTLS-Flare-System wurde direkt über dem Prisma montiert. Eine weiteres System wurde in der Längsachse des Fahrzeuges vor der Lenkeinheit verbaut. Dies soll neben der Lokalisierung zur Bestimmung der Fahrzeugrichtung dienen. Um Daten für die visuelle Odometrie zu akquirieren, wurden mehrere Vergleichskamerasysteme an der Fahrzeugfront montiert. Gewählt wurden zu diesem Zweck Kameras, die der Partner Cura3D für die Entwicklung der Odometrie bereits benutzte. Es wurden für die Partner relevante Kameras des Typs „Intel Realsens“ verbaut. Um in den Szenarien Logistik und Reinigung das gleiche Sensorsetup zur Verfügung zu haben, wurde zudem der bereits am Fahrzeug verbaute Sicherheits-LiDAR der Firma Hokuyo gegen ein Sick-LiDAR der Baureihe „TIM“ getauscht. Letztlich wurden die Schnittstellen der Sensoren zur Middleware angepasst und die genauen Positionen im Roboterbeschreibungmodell (URDF) aufgenommen.

Die Schnittstellen zu den entwickelten Sensoreinheiten und zur Fahreinheit wurden gemeinschaftlich im Konsortium spezifiziert. Deren Implementierung wurde letztlich bis zur gewählten Middleware umgesetzt. Die Schnittstellen der Sensoreinheit des RaDARs wurden zudem mit dem Partner Indurad während eingehender Tests verfeinert. Letztlich wurden diese Schnittstel-

len auch zur Datenaufzeichnung der beschriebenen Messkampagnen genutzt.

Auf Grund der Modularität konnten die Lokalisierungskomponenten somit speziell auf die Szenarien und deren Einsatzumgebung abgestimmt werden. Für die Lokalisierung des Logistikzenarios wurden die Module der Radarlokalisierung gestützt mit der UWB-Funklokalisierung hard- und softwaretechnisch gekoppelt. Für das Szenario wurde von statischen Hindernissen, die in einer vorab aufgezeichneten Karte markiert sind, ausgegangen. Diese Annahme wurde getroffen, da nicht alle Hindernisse in der Umgebung so echogen sind, dass sie vom Radar erfasst werden können. Das Kartenmaterial wurde jeweils mit Hilfe der Daten des am Fahrzeug bereits verbautem LiDAR-Systems erzeugt und mit der Lokalisierung des RTLS- und RaDAR-Systems in Deckung gebracht. So konnten für die Pfadplanung und Regelung auch Kunststoff- oder Papptiere aus der Einsatzumgebung mit einbezogen werden, die für das Radar nicht als Hindernis wahrgenommen wurden.

2.1.6 Validierung

Die abschließenden Arbeiten im Projekt beschäftigten sich mit der Validierung der Lokalisierungs- und Fusionsalgorithmen. Hierbei wurden in Dauertestes auch Aspekte hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit untersucht. Die bereits beschriebene Umgebung im HiL-Labor wurde dafür durch zwei Lastübergabestationen erweitert. An diesen soll nach der Szenariendefinition die Last in Form von Kleinladungsträgern im Speziellen eine 40x30 cm großen Eurobox von den Fahrplattformen automatisiert aufgenommen und abgegeben werden. Durch die fixe Postion und relativ geringe Toleranz der Übergabetische ist eine genaue Zielanfahrt wichtig. Diese hängt neben der Bahnreglergenauigkeit stark von der Lokalisierung in der aufgebauten Umgebung ab. Um eine Endlosschleife zu generieren, wurde die Last jeweils nach Abgabe durch das im Labor statisch verbaute Portalrobotersystem zum Ausgangspunkt der Lastaufnahme zurück transportiert.



Abbildung 23: mech. Adaption des Sensormessaufbau an der Fahrplattform mit Hubvorrichtung für das Evaluationsszenario

Die Abbildung 23 zeigt die mechanischen Anpassungen der Fahrplattform an die Übergabetsche des Szenarios. Dabei wurde der Hubtisch erhöht. Da das Beamforming RaDAR des Partner Indurad durch die globalen Lieferengpässe von Bauteilen noch nicht einsetzbar war, wurde wieder das Drehspiegelradarsystem verwendet. Der Lastaufnahmeturm wurde dabei schmal gehalten, um möglichst wenig Sichtfeld zu verlieren. Gleichzeitig hat es den Vorteil, zwei der neu entwickelten Radarsysteme seitlich neben dem Turm aufzunehmen. Alle weiteren Sensoren konnten unter den Abdeckungen und Blenden des Fahrzeuges mechanisch integriert werden. Das Prisma zur Referenzmessung ist in diesem Bild nicht montiert.



Abbildung 24: Frontansicht auf das Validierungszenario im HiL-Labor

In der Abbildung 24 sind die Übergabestationen in der aufgebauten Validierungsumgebung im HiL-Labor erkennbar. Diese bestehen aus je zwei Säulen mit auskragenden Armen, die als Ablagetisch dienen. Die Stationen wurden symmetrisch im Raum rechts und links der mittigen Trennwand aufgebaut. Auch bei diesen Tests wurde an verschiedenen Zeitpunkten der Versuchsraum mit bodenbedeckendem Nebel geflutet. Durch die Trennwand konnte dies meist auch räumlich auf eine der beiden Raumhälften begrenzt werden.



Abbildung 25: durch Nebel teilweise blockierte LiDAR-Daten(weiß) und RaDAR-Daten(cyan) eingebettet in aktuelle Kamerasicht der Versuchsplattform

Die Abbildung 25 zeigt die Sicht der LiDAR- und RaDAR-Sensoren als Messpunkte eingebettet in die aktuelle Kamerasicht der Versuchsplattform. Dabei ist in Weiß die durch die nebelwand blockierte Sicht des LiDARs und in Cyan die Sicht des RaDAR-System auf die Raumecke zu erkennen.

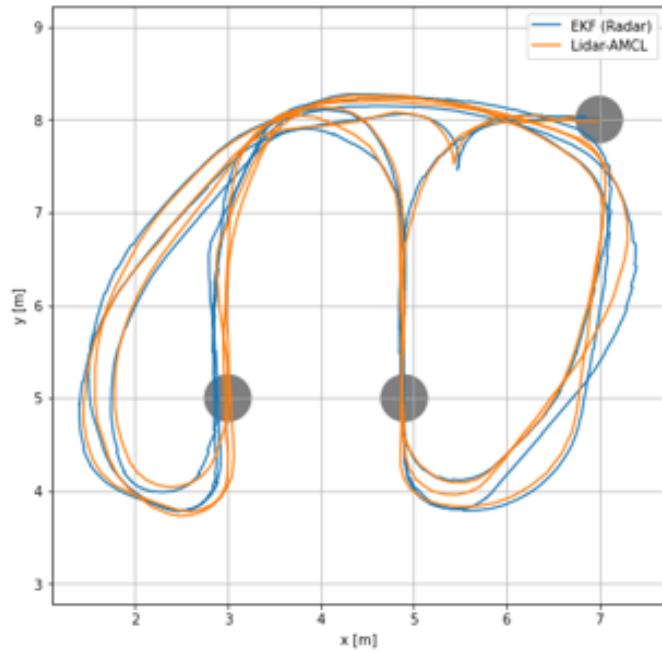


Abbildung 26: Vergleich LiDAR-Lokalisierung mit RaDAR-Lokalisierung bei voller LiDAR Sichtweite

Als Ergebnis der Validierung und Dauertests ist in Abbildung 26 beispielhaft ein Vergleich der State of the Art Lokalisierung eines LiDAR-Systems mittels AMCL und der entwickelten Lokalisierung mittels RaDAR-System in Kombination mit einem EKF dargestellt. Die grauen Punkte im Bild stellen Startpose sowie die beiden Übergabestationen dar. Die blaue Spur markiert die gemessene Bahn der Fahrplattform mittels RaDAR-EKF, die orangene Spur stellt die simultan gemessene Bahn mittels LiDAR und AMCL dar. Die zu erkennenden höhere Abweichungen im rechten Bildteil konnten dem geringeren Auflösungsvermögen des RaDAR-Systems zugeordnet werden. Dies wirkt sich gerade in den Passagen, in denen wenige Features detektierbar sind, aus. Weiterhin sind leichte Sprünge in der Spur der RaDAR-EKF-Loakisierung zu erkennen. Diese sind mit der nachlaufenden Datenausgabe des langsamen Drehspiegelradarsystems zu erklären. Eine Validierung der Algorithmen mit den im Projekt entstandenen schnelleren Beamforming RaDAR-System steht noch aus. Mechanisch und elektrisch konnten zwei der aufgebauten Systeme bereits an einer der beiden Fahrplattformen angepasst werden.

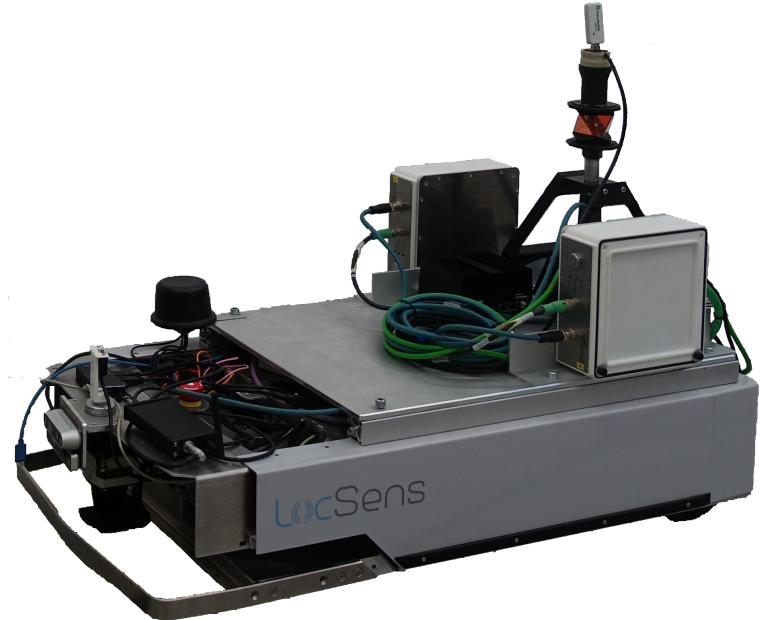


Abbildung 27: Fahrplattform mit integrierten 3D Beamformingradar (weiße Boxen) des Partners Indurad

Die Abbildung 27 zeigt die Systeme auf der rechten und linken Seite der Fahrplattform. Weiterhin ist auf der Abbildung das Referenzprisma über dem kinematischen Mittelpunkt der Fahrplattform sowie ein RTLS-Flare System darüber zu erkennen. Unter der demontierten Frontblende der Fahrplattform sind zudem ein LiDAR-System und die verbauten Kameramodule zu erkennen.

Zur Validierung der UWB-Lokalisierung wurde wie eingangs erwähnt eine künstliche NLOS-Situation mit einer LOS-Situation verglichen. Die Ergebnisse einer der Untersuchung des neuen Verfahrens im Vergleich zum State of the Art Verfahren sind in Abbildung 28 und 29 dargestellt.

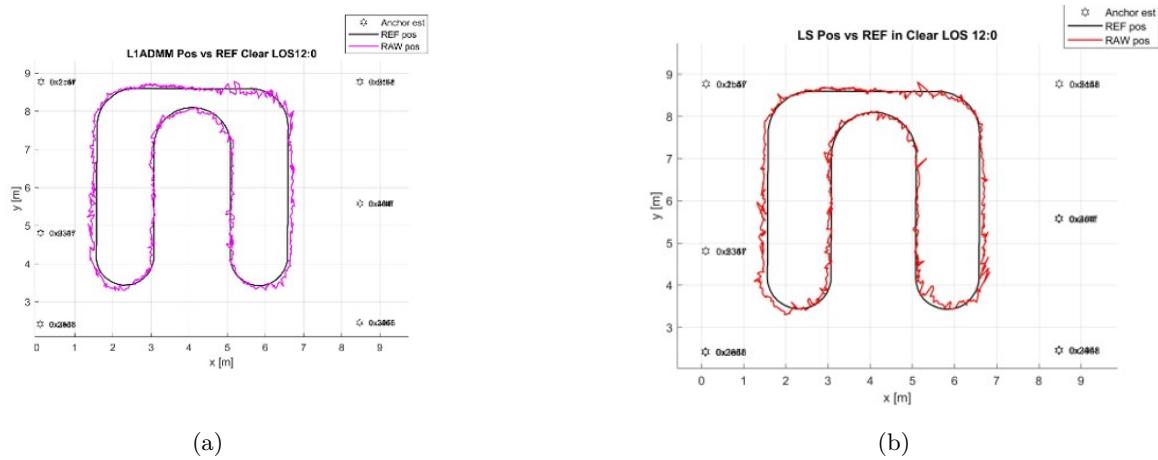


Abbildung 28: Vergleich der RTLS-Lokalisierung (a) im Projekt entwickeltes Verfahren mit dem (b) State of the Art Verfahren in Umgebung mit reiner LOS Bedingung

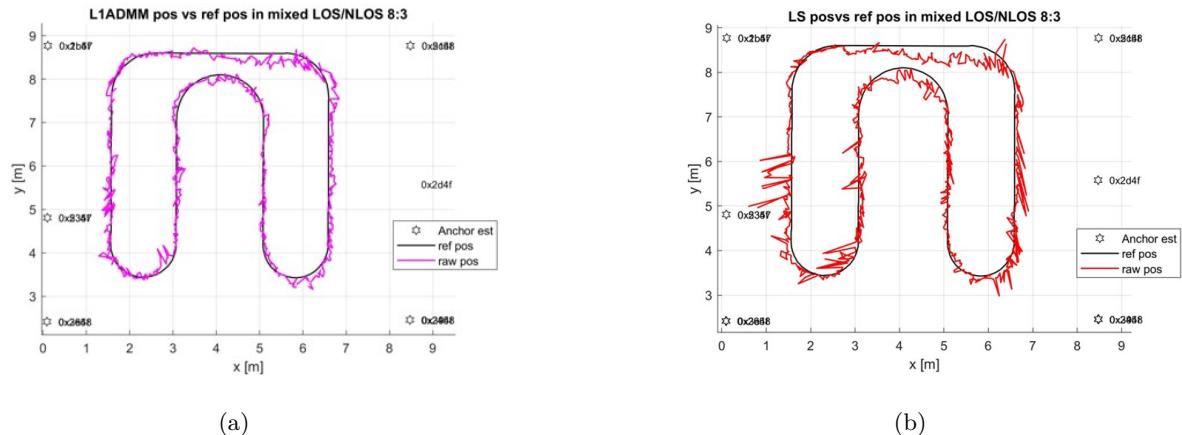


Abbildung 29: Vergleich der RTLS-Lokalisierung (a) im Projekt entwickeltes Verfahren mit dem (b) State of the Art Verfahren in Umgebung gemischten LOS NLOS Bedingungen

Deutlich zu erkennen sind hier die geringeren Schwankungen der Positionen auch unter NLOS-Situationen sowie eine bessere Spurtreue im Vergleich zur Referenz.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Um zeitnah nach Projektstart erste Erfahrungen mit RaDAR-Sensorsystemen zur Umgebungs-wahrnehmung zu erlangen, wurde ein in der Automobilindustrie etabliertes RaDAR-System der Firma Smartmicro zur Detektion von Hindernissen beschafft. Dies half für die ersten Voruntersuchungen bis der Partner Indurad eines seiner deutlich performanteren Systeme zur Verfügung stellen konnte.

Für die Herstellung reproduzierbarer LOS- bzw. NLOS-Situationen wurde ein System bestehend aus Messeschnellbauwänden der Firma B-Matrix beschafft, welche mittels Kunststoff bzw. Metallbeschichteten Wandbelägen ausgestattet werden kann. Dieses modulare System kann flexibel im HiL-Labor aufgebaut werden, um verschiedene Umgebungssituationen zu simulieren.

Von der Firma EKF wurde ein Compact serial PCI System beschafft. Dieses bildet in Kombination mit den beschafften Fahrplattformen der Firma Götting KG die Basis für die Untersuchungen der Lokalisierungsverfahren auf mobilen Roboterplattformen.

2.3 voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Neben der wissenschaftlichen Verwertung der Ergebnisse in Veröffentlichungen können die Ergebnisse der UWB-Lokalisierung für verschiedene Applikationen in der mobilen Robotik Anwendung finden. So bieten sich mit den Ergebnissen beispielsweise die Möglichkeit der besseren Kooperation von Mensch und Roboter durch eine einfachere umgebungsunabhängige Lokalisierung von Personen bzw. mobilen Robotern. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Stückgüter für die Lagerlogistik temporär mit lokalisierbaren Tags auszustatten, um diese einfacher in der Umgebung zu detektieren. Für die Verfahren zur Radarlokalisierung gibt es neben den im Projekt beschriebenen Szenarien weiterhin Anwendungen im Outdoorrobotikbereich sowie den Bereichen der Lokalisierung im Bergbau sowohl Unter- als auch Übertage.

Die entstandenen Datenfusionsalgorithmen können durch die Arbeiten im Projekt relativ einfach um die Lokalisierungsquellen von GPS- bzw. GNSS-Geräten erweitert werden.

2.4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind keine weiteren Stellen bekannt geworden, die eine Relevanz zu den entwickelten Ergebnissen gehabt hätten.

2.5 Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Neben einer Veröffentlichung auf der International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet) mit dem Titel „Bootstrapping a Wireless Localization System“ im Jahr 2021 erstellt durch Norbert Fränzel, Norbert Greifzu und Prof. Andreas Wenzel, konnten 3 qualifizierende Abschlussarbeiten mit Bezug zum Projekt und veröffentlicht werden.

Die Titel der Arbeiten lauten:

- „Untersuchung von Scan-Matching-Verfahren für die relative Lokalisierung eines mobilen Roboters“,
- „Position Estimation Via Lp-Localization in Wireless Sensor Network“ sowie
- „Entwicklung eines erweiterten Kalman-Filters auf Basis des Multilaterationsverfahrens zur Positionsschätzung in drahtlosen Sensornetzwerken“.

Sie wurden zusammen mit der Technischen Universität Ilmenau speziell der Fakultät für Informatik und Automatisierung betreut und in der Universitätsbibliothek veröffentlicht. Die Autoren Torben Meseke, Prashanthakumar Hirematha und Victoria Neuhäuser konnten sich durch die Arbeiten zum Master of Science weiter qualifizieren.

Literatur

- [Frä21] Norbert Fränzel. “Bootstrapping a Wireless Localization System”. In: 10.1109/CommNet52204.2021.9641939. 4th International Conference on Advanced Communication Technologies und Networking (CommNet), 2021.
- [Hir23] Prashanthakumar Hirematha. “Position Estimation Via Lp-Localization in Wireless Sensor Network”. Magisterarb. 2023.
- [Mes19] Torben Mesecke. “Untersuchung von Scan-Matching-Verfahren für die relative Lokalisierung eines mobilen Roboters”. Magisterarb. 2019.
- [Neu23] Victoria Neuhäuser. *Entwicklung eines erweiterten Kalman-Filters auf Basis des Multilaterationsverfahrens zur Positionsschätzung in drahtlosen Sensornetzwerken*. 2023.
- [Ols09] Edwin B. Olson. “Real-time correlative scan matching”. In: Int. Conf. on Robotics und Automation(ICRA’09), 2009.